

УДК 528.7

## КОСМИЧЕСКИЙ РАДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ СМЕЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СООРУЖЕНИЙ. ОПЫТ КОМПАНИИ «СОВЗОНД»

Ю. И. Кантемиров

Компания «СОВЗОНД», бизнес-центр «Милан»  
Россия, 115563, Москва, ул. Шипиловская, 28а. E-mail: y\_kantemirov@sovzond.ru

*Рассматриваются технологии радарной интерферометрии постоянных рассеивателей и интерферометрии серий малых базовых линий, реализованных в программном комплексе SARscape (Exelis VIS, США-Франция). Приводится их сравнительный анализ и примеры их совместного применения при мониторинге смещений и деформаций земной поверхности и сооружений на месторождениях полезных ископаемых.*

*Ключевые слова: Радарная интерферометрия, мониторинг смещений земной поверхности, деформационный мониторинг.*

## SATELLITE SYNTHETIC APERTURE RADAR MONITORING OF GROUND AND CONSTRUCTIONS DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS. «SOVZOND» COMPANY EXPERIENCE

Yu. I. Kantemirov

“SOVZOND” company, business-center “Milan”  
28a Shipilovskaya st., Moscow, 115563, Russia. E-mail: y\_kantemirov@sovzond.ru

*Persistent scatterers SAR interferometry and small baselines series SAR interferometry techniques of SARscape software (Exelis VIS, USA-France) are considered in the article. Comparative analysis of these two techniques and examples of their complex usage during ground and constructions displacements and deformations monitoring on oil and gas and ore fields are presented.*

*Keywords: SAR interferometry, ground displacements monitoring, deformations monitoring.*

Как известно, по результатам многопроходных космических радарных съемок одной и той же территории, выполненных с одинаковыми параметрами и геометрией съемки, возможно оценивать смещения земной поверхности или зданий и сооружений с сантиметровой (для земной поверхности) и даже с миллиметровой (для зданий и сооружений) точностью [1–3]. Для решения этой задачи необходимо выполнение интерферометрической обработки радарных снимков многопроходной серии.

Возможность такой обработки реализована, например, в программном комплексе SARscape (Exelis VIS, США-Франция), эксклюзивным дистрибьютором которого на территории России и СНГ является компания «СОВЗОНД».

На практике для решения задач космического радарного мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений применяются технологии интерферометрической обработки Persistent Scatterers Interferometry (интерферометрия постоянных рассеивателей радарного сигнала) и Small Baselines Series Interferometry (интерферометрия серий малых базовых линий), реализованные в программном обеспечении SARscape.

**Последовательная интерферометрия постоянных рассеивателей радарного сигнала (PS).** Этот вариант радарной интерферометрии характеризуется максимально возможной точностью оценки смещений (2–4 мм для зданий и сооружений при условии ис-

пользования на входе не менее 30 радарных съемок за период не менее 1 года). Входными данными для обработки должны являться радарные снимки одной и той же территории за разные даты, сделанные в одной и той же геометрии съемки спутникового радара [4].

Программой выбирается основное изображение, на которое автоматически – с точностью до 1/100 пикселя корегистрируются (взаимно отождествляются) остальные снимки интерферометрической цепочки. Далее программа строит так называемые интерферограммы (комплексно поэлементно перемноженные фазовые слои радарных снимков) по каждой паре снимков. Затем для каждой пары оцениваются величины когерентности (меры корреляции фаз радарных снимков). Также для каждой пары строятся карты величин стандартных отклонений амплитуд снимков.

Затем программой определяются точки – постоянные (или устойчивые) рассеиватели радарного сигнала. Для выбора точек используется несколько порогов (порог корреляции амплитуд, порог когерентности, порог пространственного и временного отклонений величин смещений первой итерации и т. д.). После того как постоянные рассеиватели определены – для них выполняется процедура оценки фазовых разностей и мультивременной развертки фазы для точечных целей. Именно в разности фаз каждого снимка «защита» величина смещений за период между съемками этих снимков.

Таким образом, для каждой из выбранных точек восстанавливается хронология изменения фазы во времени, которая затем математически пересчитывается в смещения в миллиметрах. Дополнительно в процессе обработки применяется специальный фильтр, удаляющий возможное влияние атмосферы на интерферометрическую фазу.

Результатом обработки является векторный файл точек (шейп-файл для программы ArcGIS и kml-файл для программы Google Earth), в атрибутах которых записаны:

- смещения на каждую дату съемки в мм;
- среднегодовая скорость смещений в мм/год;
- суммарная величина смещений в мм;
- когерентность;
- высота над эллипсоидом wgs-84.

Усовершенствование технологии интерферометрии постоянных рассеивателей, разработанное в 2009 г. М. Константины и другими [5], заключается в следующем:

- результаты интерферометрической обработки нередко осложнены различными осложняющими факторами, в том числе низкочастотными, дающими системную ошибку определения смещений, возрастающую от одной границы снимка к другой. К таким помехам можно отнести влияние неточности знания орбит спутника, влияние непараллельности орбит спутника, атмосферные артефакты и др.;

- различные вариации технологий интерферометрической обработки, в том числе, вышеописанная технология PS, предлагают различные решения по удалению вышеуказанных систематических ошибок;

- в рамках наиболее поздней из модификаций интерферометрических технологий – методики PSP IfSAR – предлагается инновационный подход, позволяющий удалить эти систематические ошибки за счет дополнительной совместной обработки пар соседних постоянных отражателей (вышеуказанные систематические ошибки характеризуются низкочастотной пространственной изменчивостью, поэтому отдельная обработка именно соседних друг с другом отражателей, позволяет избавиться от этих ошибок);

- дополнительным преимуществом данной технологии является большая максимально достижимая плотность точек – до 30 000 точек на км<sup>2</sup> (для плотно застроенных территорий).

Основным недостатком технологии постоянных рассеивателей (и PS и PSP) является ее применимость только для застроенных территорий, либо территорий без растительности, а также для отдельных зданий и сооружений при съемке в высоком разрешении.

**Перекрестная интерферометрия серий малых базовых линий (SBas).** Интерферометрия серий малых базовых линий, в отличие от интерферометрии постоянных рассеивателей, является менее автоматизированным методом и требующим большей квалификации исполнителя. В этом случае, усиливается вклад статистики в финальный результат за счет перекрестной обработки очень большого количества интерферометрических пар при том же самом количе-

стве исходных снимков [6]. Для обработки по этому методу (в отличие от технологий PS и PSP) не обязательно наличие 30 снимков, обработка возможна и при меньшем их количестве.

Например, в случае 15-проходной цепочки, количество пар снимков достигает 105.

Из них, по величине наименьшей пространственной базы, выбираются, к примеру, 30–40 пар. Пары могут быть перекрестными (первый проход с вторым, второй с третьим, первый с третьим, второй с четвертым и т. п.). Обработка каждой пары ведется в полуавтоматическом режиме с выполнением нижеуказанных четырех шагов:

1. Автоматическая корегистрация (взаимное отождествление), расчет интерферограммы, синтез фазы рельефа, вычитание фазы рельефа из интерферограммы, фильтрация дифференциальной интерферограммы, расчет когерентности, развертка фазы;

2. Набор точек с известными координатами и высотами для коррекции орбитальных параметров;

3. Расчет скорректированных фильтрованных дифференциальных интерферограмм и развернутых фаз;

4. Инверсия полученных перекрестных во времени развернутых фаз по методике SBas с восстановлением последовательной во времени истории смещений.

В итоге также восстанавливается хронология смещений от первого снимка цепочки до последнего.

**Опыт компании «СОВЗОНД».** Компания широко применяет вышеуказанные технологии PS, PSP и SBas при мониторинге смещений и деформаций земной поверхности и сооружений на месторождениях полезных ископаемых и на других объектах.

Среди последних проектов, выполненных с применением технологий PS, PSP и SBas, можно отметить следующие:

- мониторинг оседаний земной поверхности над Жезказганским месторождением медной руды (Казахстан) за 2011–2012 гг.;

- мониторинг деформаций бортов карьеров ОАО «Гайский ГОК» (Россия) и сооружений промышленной площадки предприятия;

- мониторинг деформаций бортов угольного разреза «Уртуйский» (Россия);

- мониторинг смещений земной поверхности над нефтегазовым месторождением Тенгиз (Казахстан) за 2004–2011 гг.;

- мониторинг смещений земной поверхности и сооружений над Уренгойским, Южнорусским, Заполярным и Астраханским нефтегазовыми месторождениями (Россия);

- мониторинг смещений и деформаций сооружений в городах Новый Уренгой и Сочи (Россия) и Астана (Казахстан).

Предлагаемые технологии интерферометрической обработки PS, PSP и SBas, реализованные в программном комплексе SARscape, позволяют осуществлять мониторинг смещений и деформаций как сооружений и даже отдельных и частей (PS и PSP), так и площадной мониторинг смещений земной поверхности на территориях без растительности (SBas).

На территориях с растительностью применяются все вышеуказанные технологии в комплексе, при необходимости, производится изменение настроек (усиление фильтрации интерферограмм, понижение порога когерентности при развертке фазы, понижение ожидаемой пространственной плотности постоянных рассеивателей и т. д.). В случае территорий, характеризующихся ярко выраженным зимним периодом с выпадением снега – радарный мониторинг выполняется в бесснежный период года за исключением случая застроенных территорий – по ним отработана технология мониторинга подвижек и деформаций зданий и сооружений и в зимний период. Точность этих методов многократно проверена по данным наземных инструментальных наблюдений.

Представляется целесообразным применение радарных интерферометрических методов для мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений на месторождениях полезных ископаемых, в городах, для мониторинга критических промышленных сооружений, трубопроводов, авто- и железных дорог и других объектов.

#### Библиографические ссылки

1. Рис У. Основы дистанционного зондирования. М. : Техносфера, 2006.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. М. : Радиотехника, 2010.
3. Richards M. A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing // IEEE Aerospace and Electronic. 2007. Vol. 22, № 9.
4. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential

SAR interferometry // Geoscience and Remote Sensing : IEEE Transactions on. 2000. Vol. 38, № 5. Part 1. P. 2202–2212.

5. Method of Persistent Scatterer Pairs (PSP) and High Resolution SAR Interferometry / M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa et al. // IGARSS. 2009. № 3. P. 904–907.

6. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry / P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti // IEEE Aerospace and Electronic. 2002. Vol. 40, № 11.

#### References

1. Rys U. Moscow, Tekhnosfera, 2006, 336 p.
2. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya (Radar systems zemleobzora space-based). Moscow, Radiotekhnika, 2010, 680 p.
3. M. Richards: "A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing". IEEE Aerospace and Electronic, Vol. 22, No. 9, September 2007.
4. A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca: "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry". Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 38, no. 5, Part 1, Sept. 2000, pp. 2202–2212.
5. M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa, F. Minati, F. Trillo. Method of Persistent Scatterer Pairs (PSP) and High Resolution SAR Interferometry. IGARSS, (3), 2009, 904-907.
6. P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti: "A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry". IEEE Aerospace and Electronic, Vol. 40, No. 11, November 2002.

© Кантемиров Ю. И., 2013

УДК 528.7

### ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ РАДАРНЫХ СЪЕМОК ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕМАТИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ИЗМЕНЕНИЙ

Ю. И. Кантемиров

Компания «СОВЗОНД», бизнес-центр «Милан»  
Россия, 115563, Москва, ул. Шипиловская, 28а. E-mail: y\_kantemirov@sovzond.ru

*Рассматривается технология расчета радарных мультивременных когерентных композитов. Приводятся принципы интерпретации цветов на таком композите. Рассматриваются примеры применения радарных и радарно-оптических композитов для задач тематического картографирования территорий и мониторинга вырубок в лесном хозяйстве.*

*Ключевые слова: радарные данные ДЗЗ, радарный мониторинг, радарные съемки, мониторинг изменений, тематическое картографирование, мониторинг вырубок леса.*