

3. Cumming I. G. and Wong, F. H. Digital processing of synthetic aperture radar data. Norwood, MA: Artech House, Inc., 2005.

4. ENVI – software package ENVI. Available at: <http://www.envisoft.ru/>.

5. Radar study of the Earth from space. Available at: <http://www.gis.gorodok.net/>.

6. Kashnikov Y. A., Ashikhmin S. G. Mekhanika gornykh porod pri razrabotke mestorozhdeniy uglevodorodnogo syr'ya (Rock mechanics in the development of hydrocarbon fields). Moscow, LLC Core-business centers, 2007.

© Хан В. Д., 2013

УДК 528.71

### СПУТНИКОВЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗОНЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ\*

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»  
Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, 51/25. E-mail: alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
имени В. А. Котельникова Российской академии наук  
Россия, 141190, Фрязино Московской области, площадь им. акад. Б. А. Введенского, 1.  
E-mail: izakhar@sunclass.ire.rssi.ru

*Сообщается о результатах дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA ASAR/ENVISAT по зоне землетрясения в Японии с использованием программного пакета SARscape. Представлены результаты совместного анализа данных дистанционного зондирования и подспутниковых GPS-измерений.*

*Ключевые слова: PCA, дифференциальная интерферометрия, деформация земной поверхности, ASAR/ENVISAT, SARscape, фильтр Goldstein, землетрясение.*

### SAR MONITORING OF TERRESTRIAL SURFACE DEFORMATION IN THE EARTHQUAKE ZONE USING GPS DATA

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>Research Center for Earth Operative Monitoring JSC “Russian Space Systems”

51/25, Dekabristov st., Moscow, 127490, Russia. E-mail: alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru

<sup>2</sup>Fryazino Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov  
of Russian Academy of Sciences

1 Vvedensky square, Fryazino, Moscow region, 141190, Russia. E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

*The results of ASAR/ENVISAT data DInSAR processing for earthquake in Japan by means of SARscape software are presented. Results of the joint analysis of SAR data and ground-based GPS precision measurements are presented.*

*Keywords: SAR, DInSAR processing, surface deformation, ASAR/ENVISAT, SARscape, coherence, interferogram, Goldstein filter, earthquake.*

В Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) ОАО «Российские космические системы» проводится отработка комплексных технологий интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки данных перспективных российских радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) с использованием тестовых данных современных зарубежных РСА. Исследуются практические возможности использования данных разных диапазонов для построения цифровых моделей местности (ЦММ) и цифровых карт смещений (ЦКС) по территории Российской Федерации; проводится

выбор оптимальных алгоритмов совмещения, фильтрации и развертки фазы для различных типов подстилающей поверхности.

Проведено несколько циклов интерферометрической обработки данных РСА COSMO-SkyMed (Италия), работающего в коротковолновом X-диапазоне с длиной волны излучения 3,1 см, включая: (1) серию из четырех изображений по территории Астраханской области, (2) серию из трех изображений по территории Краснодарского края (Черноморское побережье в районе г. Сочи) и (3) серию из 15 изображений по территории Амурской области (вблизи г. Шимановск).

\* Исследования выполнены в рамках ОКР «Регион В-Архив».

Съемка выполнена в период времени с ноября 2009 г. по январь 2010 г. в маршрутном режиме съемки HIMAGE с пространственным разрешением 3 м и размером кадра  $40 \times 40 \text{ км}^2$ . Кроме того, проведена интерферометрическая обработка данных PCA ALOS/PALSAR (Япония), работающего в длинноволновом L-диапазоне с длиной волны излучения 23,6 см; данные PCA ALOS/PALSAR получены по территории тестового полигона в Тверской обл. в период времени с декабря 2006 г. по февраль 2008 г. в маршрутном режиме съемки FBS с пространственным разрешением 7 м и размером кадра  $70 \times 70 \text{ км}^2$  [1].

Цель – отработка основных процедур дифференциальной интерферометрической обработки с использованием данных европейского PCA ASAR/ENVISAT (С-диапазон, длина волны излучения 5,6 см) по зоне землетрясения в Японии (11.03.2011 г.) и результатов прецизионных наземных GPS-измерений; выбор данной территории обусловлен возможностью одновременного доступа к спутниковым и наземным данным, размещенных в открытом доступе в сети Интернет (Группа по наблюдению Земли. URL: <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>). Даты съемки – 19.02.2011 г. и 21.03.2011 г. Режим съемки – IMS, пространственное разрешение 30 м. Общие размеры отснятой территории –  $738 \times 72,5 \text{ км}^2$ . Обработка проводилась с использованием программного пакета SARscape 4.3 (фирма Sarmap s. a., Швейцария) и опорной цифровой модели местности SRTM V4 [2].

**Основные результаты обработки.** На первом этапе исследований проведен анализ зависимости средних значений когерентности от размеров окна, используемого при проведении расчетов; полученные результаты показали, что при изменении размеров окна с  $3 \times 3$  до  $21 \times 21$  имело место их монотонное падение с 0,23 до 0,13 – очень низкий уровень когерентности изображений [2].

Особое внимание уделено анализу предельных возможностей фильтрации в рамках модифицированного метода Goldstein; данный метод особенно эффективен при фильтрации сильно зашумленных интерферограмм [2]. Установлено, в частности, что при изменении размера  $d_{IW}$  квадратных фрагментов, на которые разбивается интерферограмма для проведения быстрого преобразования Фурье (БПФ), от 32 до 4 096 пикселей имело место резкое увеличение площади той части интерферограммы, которая характеризовалась достаточно четкой структурой интерференционных полос [2].

Необходимо отметить, что наиболее существенные ошибки в процессе формирования ЦКС могут возникать по следующим основным причинам:

1) программа развертки фазы может не «обнаружить» некоторое количество интерференционных полос, а «неучет» каждой полосы, приводит к уменьшению максимальной величины смещений на величину, равную половине длины волны сигнала PCA, т. е. 2,8 см;

2) происходит формирование ложных полос вследствие фильтрации сильно зашумленных интерферограмм с использованием экстремально высоких значений параметров процедуры фильтрации, причем по

аналогии с предыдущим случаем появление каждой такой полосы приводит к ошибке в 2,8 см, но теперь уже в сторону завышения оценки для максимальной величины смещений.

Для оценки общего диапазона возможных ошибок в ЦКС, связанных с фильтрацией интерферограммы, выполнена операция развертки фазы (методом Minimum Cost Flow, рекомендованным для использования в случае сильно зашумленных интерферограмм [3; 4]) для восьми интерферограмм, со значениями ключевого параметра процедуры фильтрации  $d_{IW}$ , равными, соответственно, 32, 64, 128, 256, 512, 1 024, 2 048 и 4 096 пикселям. Далее выполнена операция преобразования фазы в смещения и последующего геокодирования, на выходе которой сформированы следующие восемь ЦКС (нижний индекс соответствует значению параметра  $d_{IW}$ ): ЦКС<sub>32</sub>, ЦКС<sub>64</sub>, ЦКС<sub>128</sub>, ЦКС<sub>256</sub>, ЦКС<sub>512</sub>, ЦКС<sub>1024</sub>, ЦКС<sub>2048</sub> и ЦКС<sub>4096</sub>. Для каждой из 8 ЦКС определены минимальные и максимальные значения получаемых оценок для величин смещений земной поверхности. Показано, что при изменении параметра  $d_{IW}$  от 32 до 4 096 пикселей общий диапазон изменения оценок для максимальных значений смещений оказался равным 63 см. Таким образом, некорректный выбор значения параметра  $d_{IW}$  способен привести к возникновению очень серьезных ошибок.

Отработка методики выбора оптимального значения параметра  $d_{IW}$  проводилась с дополнительным использованием прецизионных результатов подспутниковых GPS-измерений, находящихся в открытом доступе. Проанализирован «косейсмический» файл с данными GPS-датчиков, установленных в зоне землетрясения, в котором зафиксированы величины основных смещений земной поверхности. В результате предварительного анализа отобраны девять GPS-датчиков – по три датчика в областях максимальных, средних и относительно невысоких деформаций земной поверхности (с модулями векторов смещений в диапазоне от 313 до 362 см для первой области, от 176 до 212 см для второй и от 78 до 91 см для третьей).

Для количественного сопоставления результатов спутникового радиолокационного мониторинга и подспутниковых GPS-измерений необходимо рассчитать величины проекций векторов смещений каждого из девяти GPS-датчиков на направления от GPS-датчиков на PCA, чтобы обеспечить их «стыковку» с данными рассчитанных ранее восьми ЦКС (дифференциальная интерферометрия «работает» только с одним компонентом смещений земной поверхности – проекцией смещений на направление наклонной дальности; другие компоненты смещений не влияют на фазовый компонент радиолокационного сигнала, который PCA регистрирует одновременно с амплитудой). С этой целью в координатах East/North/Vert реализована специальная достаточно простая расчетная схема, в рамках которой рассчитывались:

1) направляющие косинусы для векторов смещений GPS-датчиков;

2) направляющие косинусы для направлений от GPS-датчиков на PCA;

3) значения косинуса угла между направлениями векторов смещений GPS-датчиков и направлениями от GPS-датчиков на РСА;

4) искомые величины проекций векторов смещений GPS-датчиков на направления от GPS-датчиков на РСА.

Величины смещений, полученные по ЦКС для координат трех GPS-датчиков из области относительно невысоких деформаций, имели очень слабую зависимость от значений параметра  $d_{IW}$ . При изменении этого параметра от 32 до 4096 пикселей отклонения от среднего уровня в среднем не превышали 1 см. Результаты расчетов величин проекций векторов смещений GPS-датчиков на направления от GPS-датчиков на РСА отличались от этих средних значений всего на 4, 0,5 и 7 см, соответственно.

Напротив, величины смещений, полученные из ЦКС для координат GPS-датчиков из области максимальных деформаций земной поверхности, имели сильную зависимость от значений параметра  $d_{IW}$ . При изменении этого параметра в тех же пределах – от 32 до 4096 пикселей – значения величин смещений возрастали на 68, 68 и 66 см, соответственно. Сопоставление полученных результатов наземных наблюдений и результатов спутниковых измерений позволило установить, что наземные данные во всех трех случаях чуть превышают величины оценок, полученных с помощью ЦКС<sub>64</sub> (на 4, 6 и 7 см, соответственно) и относительно заметно ниже, чем данные из ЦКС<sub>128</sub> (на 24, 23 и 22 см соответственно).

Результаты, полученные для второй, промежуточной, группы GPS-датчиков из области средних деформаций, в целом соответствуют аналогичным результатам для области максимальных деформаций. Результаты наземных наблюдений также достаточно близки к соответствующим значениям из ЦКС<sub>64</sub> (их разность равна, соответственно, 14, 2 и 4 см). При изменении параметра  $d_{IW}$  в пределах от 32 до 4096 пикселей значения величин смещений также возрастают очень значительно – на 54, 71 и 31 см, соответственно.

Итак, продемонстрировано достаточно разумное согласование результатов спутниковых и наземных наблюдений и показано, что оптимальное значение параметра  $d_{IW}$  оказалось равным 64 пикселям.

В заключение необходимо отметить, что представленные результаты получены с использованием достаточно ограниченного массива данных наземных наблюдений и по этой причине их следует рассматривать как предварительные. Планируется, что повторный цикл исследований с использованием более полного объема наземных данных будет выполнен с использованием новой версии 5.0 программного пакета SARscape, в которой предусмотрена возможность автоматического выполнения всех процедур сравнительного анализа результатов дифференциальной интерферометрической обработки данных РСА и результатов измерений наземных GPS-датчиков.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Выполнен совместный анализ результатов дифференциальной интерферометрической обработки данных РСА ASAR/ENVISAT и подспутниковых GPS-

измерений по зоне землетрясения в Японии с использованием программного пакета SARscape 4.3.

2. Показана сильная зависимость характеристик создаваемых ЦКС от основных параметров обработки. На примере ключевого параметра процедуры фильтрации в рамках метода Goldstein – размера фрагмента интерферограммы для проведения БПФ – продемонстрированы возможности разработанной методики для выбора оптимальных значений параметров обработки с использованием данных наземных GPS-измерений.

3. Полученный опыт интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки будет использован при разработке программного обеспечения перспективных российских РСА.

4. Перспективы развития связаны с отработкой высокоточных методов постоянных отражателей PS и малых базовых линий SBAS, основанных на одновременной обработке большого числа радиолокационных изображений.

### Библиографические ссылки

1. Основные результаты интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой X и L диапазонов / А. А. Феоктистов, А. И. Захаров, П. В. Денисов, М. А. Гусев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : сб. науч. ст. 2012. Т. 9. № 2. С. 106–110.

2. 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 / А. А. Феоктистов, А. И. Захаров, П. В. Денисов, М. А. Гусев // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред : материалы V Всерос. науч. конф. (26–28 июня 2012, г. Муром).

3. Costantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. № 36(3). P. 813–821.

4. Exploring the SARscape Modulus for ENVI / Classbook. ITT Visual Information Solutions. 2010.

### References

1. Feoktistov A. A., Zaharov A. I., Denisov P. V., Gusev M. A. Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: Sb. nauch. st. Moscow, DoMira. 2012, Vol. 9. № 2, pp. 106–110.

2. Feoktistov A. A., Zaharov A. I., Denisov P. V., Gusev M. A. Trudy IV Vserossyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Aktualnye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroyeniya i informatsionnykh tekhnology” (Proceedings of the 5th Russian Conference «Radio-physics methods in remote sensing environments»). Murom, 26–28 June 2012.

3. Costantini, M. A Novel phase unwrapping method based on network programming. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998, no 36(3), pp. 813–821.

4. Exploring the SARscape Modulus for ENVI. ITT Visual Information Solutions. 2010.