

Сравнение результатов дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA ASAR/ENVISAT и данных наземных GPS измерений по зоне землетрясения в Японии

А.А. Феоктистов¹, А.И. Захаров², П.В. Денисов¹, М.А. Гусев¹.

¹Научный центр оперативного мониторинга Земли; ОАО “Российские космические системы” 127490, г. Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25; E-mail: alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru.

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН; 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. Введенского, д. 1; E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

Представлены предварительные результаты совместного анализа данных PCA ASAR/ENVISAT по зоне землетрясения в Японии 11.03.2011 г. и прецизионных результатов подспутниковых GPS-измерений.

Preliminary results of the joint analysis of ASAR/ENVISAT data DInSAR processing and precision results of ground GPS-measurements are submitted.

Ранее были представлены промежуточные результаты проводимого в НЦ ОМЗ ОАО “Российские космические системы” первого цикла дифференциальной интерферометрической обработки с использованием данных европейского радиолокатора с синтезированной апертурой (PCA) ASAR/ENVISAT (С-диапазон, длина волны излучения 5,6 см) по территории острова Хонсю, Япония, пострадавшей от одного из самых мощных в истории Японии землетрясений, произошедшего 11 марта 2011 г. [1]. Выбор данной территории был обусловлен тем, что для нее оказались доступными не только данные PCA, но и прецизионные результаты подспутниковых GPS-измерений [2].

Съемка проводилась в режиме IMSc пространственным разрешением 30 м. Общие размеры отснятой территории – 738x72,5 км² (6160*212435 пикселей). Даты съемки – 19.02.2011 г. и 21.03.2011 г. Длина нормального компонента базовой линии равнялась 200,44 м (критическая величина базовой линии равна 2109,15 м). Обработка проводилась с использованием программного пакета SARscape 4.3, созданного фирмой Sarmaps.a., Швейцария. При проведении обработки использовались опорная цифровая модель местности SRTMV4, а также данные прецизионных подспутниковых GPS-измерений [1,3].

Был проведен анализ средних значений когерентности; полученные результаты показали, как и следовало ожидать, см. [4-6], что при изменении размеров окна с 3*3 до 21*21 имело место их монотонное падение с 0,23 до 0,13 – очень низкий уровень когерентности изображений [1, 6].

Особое внимание было уделено анализу предельных возможностей фильтрации в рамках модифицированного метода Goldstein; данный метод особенно эффективен при фильтрации сильно зашумленных интерферограмм [7]. Было установлено, в частности, что при изменении размера d_{FW} квадратных фрагментов, на которые разбивается интерферограмма для проведения БПФ, от 32 до 4096 имело место резкое увеличение площади той части интерферограммы, которая характеризовалась достаточно четкой структурой фрингов [1, 6].

В данной работе представлены предварительные результаты совместного анализа данных PCA ASAR/ENVISAT по зоне землетрясения в Японии 11.03.2011 г. и прецизионных результатов подспутниковых GPS-измерений.

1. Оценка общего диапазона возможных ошибок в цифровых картах смещения (ЦКС), связанных с фильтрацией интерферограммы.

Прежде всего, необходимо напомнить, что 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 РСА регистрирует одновременно с амплитудой. Наиболее существенные ошибки, возникающие в процессе формирования ЦКС, могут возникать вследствие проявления следующих двух основных причин. С одной стороны, на тех участках интерферограммы, которые характеризуются высоким уровнем зашумленности (например, из-за недостаточного уровня подавления шумов на этапе фильтрации интерферограммы) программа развертки фазы может не "обнаружить" некоторое количество фрингов, а "потеря" каждого фринга, естественно, приводит к уменьшению максимальной величины смещений на величину, равную половине длины волны излучения РСА, т.е. 2,8 см. С другой стороны, при проведении фильтрации таких сильно зашумленных интерферограмм, как в данном случае, с использованием экстремально высоких значений параметра d_{IW} возникает угроза, что программа сможет как бы дополнительно "сформировать" ложные фринги, причем по аналогии с предыдущим случаем появление каждого такого фринга приводит к ошибке в 2,8 см, но теперь уже в сторону увеличения максимальной величины смещений.

Для оценки общего диапазона возможных ошибок в ЦКС, связанных с фильтрацией интерферограммы, была выполнена операция развертки фазы (методом MinimumCostFlow, рекомендованным для использования в случае сильно зашумленных интерферограмм) для восьми интерферограмм, рассчитанных со значениями параметра d_{IW} , равными 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048 и 4096 пикселям. Далее была выполнена операция преобразования фазы в смещения и последующего геокодирования, на выходе которой были сформированы следующие восемь ЦКС (нижний индекс соответствует значению параметра d_{IW}): ЦКС₃₂, ЦКС₆₄, ЦКС₁₂₈, ЦКС₂₅₆, ЦКС₅₁₂, ЦКС₁₀₂₄, ЦКС₂₀₄₈ и ЦКС₄₀₉₆.

При этом для всех восьми интерферограмм было задано одно и то же значение высоты (взятое из опорной ЦММ SRTMV4) для одной и той же вспомогательной ОТМ вблизи южной границы изображения; величина смещения для этой точки условно была принята равной нулю. Таким образом, при проведении расчетов восьми ЦКС варьировался только один параметр – размер d_{IW} квадратных фрагментов, на которые разбивается интерферограмма. Размер ячейки ЦКС – 30 м, усреднение ЦКС проводилось с окном 7*7 ячеек.

Для каждой из восьми ЦКС были определены минимальные (MIN) и максимальные (MAX) величины смещений, которые представлены в таблице 1. Минимальные значения смещений оказались достаточно стабильными – разброс значений не превышал 1-2 см (отрицательные значения, естественно, являются следствием того, что на изображениях находились точки, у которых проекции смещений на направление наклонной дальности были меньше (или даже имели другой знак), чем у вспомогательной ОТМ вблизи южной границы изображения, см. выше.

Таблица 1. Минимальные и максимальные величины смещений для восьми ЦКС

Значение параметра d_{IW} , пиксели	32	64	128	256	512	1024	2048	4096
MIN, см	-09	-11	-11	-09	-09	-08	-08	-11
MAX, см	178	203	228	241	241	241	243	241

Основной интерес представляли максимальные значения смещений. Для первой ЦКС – с самым низким уровнем фильтрации шумов – максимальное значение смещения было равно 178 см; для пяти последних ЦКС – с высоким уровнем фильтрации шумов – на уровне 241 см. Еще у двух ЦКС – с промежуточным уровнем фильтрации – максимальные значения смещений "оказались" также на промежуточном уровне – 203 и 228 см. Общий диапазон изменения максимальных значений смещений оказался равным 63 см. Таким образом, некорректный выбор значения параметра d_{IW} способен привести к возникновению очень серьезных ошибок.

Попутно был проведен еще один дополнительный эксперимент – была рассчитана "по-пиксельная" разность двух ЦКС – ЦКС₁₀₂₄ и ЦКС₃₂ (с высоким и низким уровнем фильтрации шумов, соответственно; нижние индексы указывают на значения параметра d_{IW}). Как и следовало ожидать, полученные результаты подтвердили, что разность величин смещений между отдельными реализациями ЦКС "накапливается" по всей площади изображения (т.е. она не локальна в пространстве).

2. Методика выбора оптимальных значений параметра d_{IW} .

В данном разделе представлены основные результаты экспериментальной отработки методики выбора оптимального значения параметра d_{IW} . Обработка проводилась с дополнительным использованием прецизионных результатов подспутниковых GPS-измерений. Был проанализирован "косейсмический" файл с данными GPS-датчиков, установленных в зоне землетрясения, в котором были зафиксированы величины основных смещений земной поверхности, произошедших в интервале времени от 5:00 до 6:30 UTC (UniversalTimeCoordinated – Всемирное координированное время). Данные о векторах смещений фиксировались в координатах East (восточная), North (северная) и Vert (вертикальная). Начало систем координат – в точках размещения каждого из GPS-датчиков. Само землетрясение произошло в 05:46:23 UTC.

В результате предварительного анализа "косейсмического" файла были отобраны девять GPS-датчиков. В таблице 2 для каждого из отобранных датчиков представлены, соответственно, порядковый номер в таблице и координаты (долгота Lon и широта LAT в градусах). Далее – смещения по трем осям (East, North, Vert). В последней колонке приведены дополнительно рассчитанные величины модулей векторов смещений. Значения округлены с точностью до единиц см.

Таблица 2. Исходные данные для девяти GPS-датчиков

№	Lon, град	Lat, град	East, см	North, см	Vert, см	Модуль, см
1	141,15	38,54	341	-116	-34	362
2	141,16	38,66	326	-123	-27	350
3	140,95	38,32	302	-75	-27	313
4	140,76	37,56	209	-24	-24	212
5	140,83	38,93	196	-87	-05	214
6	140,47	37,68	175	-17	-7	176
7	140,39	36,48	90	-3	-16	91
8	140,54	36,18	82	-3	-17	83
9	140,18	36,54	77	1	-9	78

Как следует из представленных данных, преимущественное направление смещения земной поверхности – восточное.

Первая группа из трех GPS-датчиков (с порядковыми номерами 1-3) находилась в области максимальных деформаций земной поверхности; модуль векторов смещений менялся от 313 до 362 см. Вторая группа (порядковые номера 4-6) – в области средних

деформаций, смещения от 176 до 212 см; третья (порядковые номера 7-9) – в области относительно невысоких деформаций – от 78 до 91 см.

Для количественного сопоставления результатов спутникового радиолокационного мониторинга и подспутниковых GPS-измерений необходимо было 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.

С этой целью в координатах East/North/Vert была реализована специальная достаточно простая расчетная схема. В рамках этой расчетной схемы сначала проводился расчет трех направляющих косинусов для векторов смещений каждого GPS-датчика (по данным из таблицы 2). Далее рассчитывались направляющие косинусы для направления от каждого GPS-датчика на PCA. При проведении расчетов использовались значения углов I (Incidence – угол падения – между направлением от GPS-датчика на PCA и осью Vert) и A (Azimuth – азимут, отсчитываемый по часовой стрелке угол между осью North и проекцией на горизонтальную плоскость направления от GPS-датчика на PCA). Значения углов A и I, которые определяли направление от каждого GPS-датчика на PCA, брались из файлов ILOS и ALOS (для координат GPS-датчиков), автоматически рассчитываемых программным пакетом SARscape 4.3. Перемножением соответствующих направляющих косинусов (1) векторов смещений каждого GPS-датчика и (2) направлений от GPS-датчиков на PCA рассчитывались значения косинуса угла между этими направлениями. После чего рассчитывались искомые величины проекций векторов смещений на направления от GPS-датчиков на PCA.

Результаты проведенных расчетов величин проекций векторов смещений для каждого из девяти GPS-датчиков на направления от GPS-датчиков на PCA представлены во втором столбце таблицы 3. В последующих восьми столбцах таблицы 3 приведены соответствующие значения оценок для величин смещений для направлений от GPS-датчиков на PCA по данным каждой из восьми рассчитанных ранее ЦКС (там же указаны соответствующие значения параметра d_{1W}).

Таблица 3. Величины смещений для направлений от GPS-датчиков на PCA

№	GPS	ЦКС							
		32	64	128	256	512	1024	2048	4096
1	196	164	192	220	228	231	231	234	232
2	193	159	187	216	224	227	227	230	227
3	177	142	170	199	207	210	210	210	208
4	117	083	103	125	134	137	137	137	137
5	128	098	126	149	157	160	160	166	169
6	111	101	115	129	132	132	132	132	132
7	46	47	50	50	50	50	50	50	51
8	39	33	39	39	39	39	39	39	40
9	44	51	51	51	51	51	51	51	51

Величины смещений, полученные из ЦКС для координат трех GPS-датчиков третьей группы из области относительно невысоких деформаций (порядковые номера 7-9), демонстрируют очень слабую зависимость от значений параметра d_{1W} . При изменении этого параметра от 32 до 4096 пикселей отклонения от среднего уровня в среднем не превышают 1 см. Представленные во втором столбце результаты проведенных расчетов величин проекций векторов смещений GPS-датчиков на направления от GPS-датчиков на PCA отличаются от этих средних значений на 4 и 7 см (для порядковых номеров 7 и 9, соответственно), а для GPS-датчика с порядковым

номером 8 результаты наземных наблюдений практически совпали со средним значением для спутниковых наблюдений.

Напротив, величины смещений, полученные из ЦКС для координат GPS-датчиков первой группы из области максимальных деформаций земной поверхности (порядковые номера 1-3), демонстрируют очень сильную зависимость от значений параметра d_{IW} . При изменении этого параметра в тех же пределах – от 32 до 4096 пикселей – значения величин смещений возрастают на 68, 68 и 66 см, соответственно. Нетрудно видеть – простое сопоставление полученных результатов наземных наблюдений (второй столбец) и результатов спутниковых измерений для координат GPS-датчиков первой группы позволяет установить, что наземные данные во всех трех случаях чуть превышают величины оценок, полученных с помощью ЦКС₆₄, (на 4, 6 и 7 см, соответственно) и относительно заметно ниже, чем данные из ЦКС₁₂₈ (на 24, 23 и 22 см, соответственно).

Результаты, полученные для второй, промежуточной, группы GPS-датчиков из области средних деформаций (порядковые номера 4-6), в целом соответствуют аналогичным результатам для области максимальных деформаций. Результаты наземных наблюдений (второй столбец) также достаточно близки к соответствующим значениям из ЦКС₆₄ (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. Таким образом, в данном случае оптимальное значение параметра d_{IW} оказалось равным 64.

3. Заключение.

Необходимо подчеркнуть, что представленные в данном разделе результаты были 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 полного объема наземных данных будет выполнен с использованием штатных программных средств новой версии 5.0 программного пакета SARscape, выпуск которой запланирован на ближайшее время и в которой предусмотрена возможность автоматического выполнения всех процедур сравнительного анализа результатов дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA и результатов измерений наземных GPS-датчиков

Литература

1. 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 / Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. // Материалы V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». – Муром 26-28 июня 2012 г. – ISSN 2304-1297 (CD-ROM). – С. 258-263.
2. <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php#Sat5>.
3. Практический опыт интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA COSMO-SkyMed, ALOS/PALSAR и ASAR/ENVISAT / Феоктистов А. А., Денисов П. В., Гусев М. А. // Материалы IX научно-технической конференции "Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли". Геленджик. 17-21 сентября 2012г. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП "ГНПРКЦ "ЦСКБ-ПРОГРЕСС" – НПП "ОПТЭК", 2012. – С. 240-244.

4. Основные результаты интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой X и L диапазонов / Феокистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: – ООО "ДоМира", 2012. – Т. 9. – № 2. – С. 106-110.
5. К вопросу о точности совмещения интерферометрических пар изображений / Феокистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. // Материалы V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». – Муром 26-28 июня 2012 г. – ISSN 2304-1297 (CD-ROM). – С. 538-543.
6. Перспективы разработки комплекса интерферометрической и дифференциально-интерферометрической обработки данных российских космических радиолокаторов с синтезированной апертурой / Феокистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. – М.: ООО «ДоМира», 2011. – Т. 8. – Номер 2. – С. 310–317.
7. Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M., Perski Z., Lilly P. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. No 9. P. 1-9.