

**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**

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” 127490, г. Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25; E-mail: [alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru](mailto:alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru).

<sup>2</sup>Фрязинский 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](mailto:aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru)

*Сообщается о промежуточных результатах первого цикла дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA ASAR/ENVISAT по зоне землетрясения в Японии 11.03.2011 г. с использованием программного пакета SARscape 4.3. Проведен анализ зависимости полученных результатов от значений основных параметров процедуры обработки.*

*The results of ASAR/ENVISAT data differential InSAR processing for 11.03.2011 earthquake territory in Japan by means of SARscape software packages are presented. Earth surface deformation estimations are analysed.*

В докладе представлены промежуточные результаты проводимого в НЦ ОМЗ ОАО “Российские космические системы” первого цикла дифференциальной интерферометрической обработки с использованием данных европейского радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) 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. Выбор данной территории был обусловлен тем, что для нее оказались доступными не только данные РСА, но и прецизионные результаты подспутниковых GPS-измерений, необходимые для получения количественных точностных характеристик [1]. Съёмка проводилась в режиме IMS с пространственным разрешением 30 м. Общие размеры отснятой территории – 738x72,5 км<sup>2</sup> (6160\*212435 пикселей). Даты съёмки – 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 Sarmap s.a., Швейцария. При проведении обработки использовались опорная цифровая модель местности SRTM V4, а также данные прецизионных подспутниковых GPS-измерений.

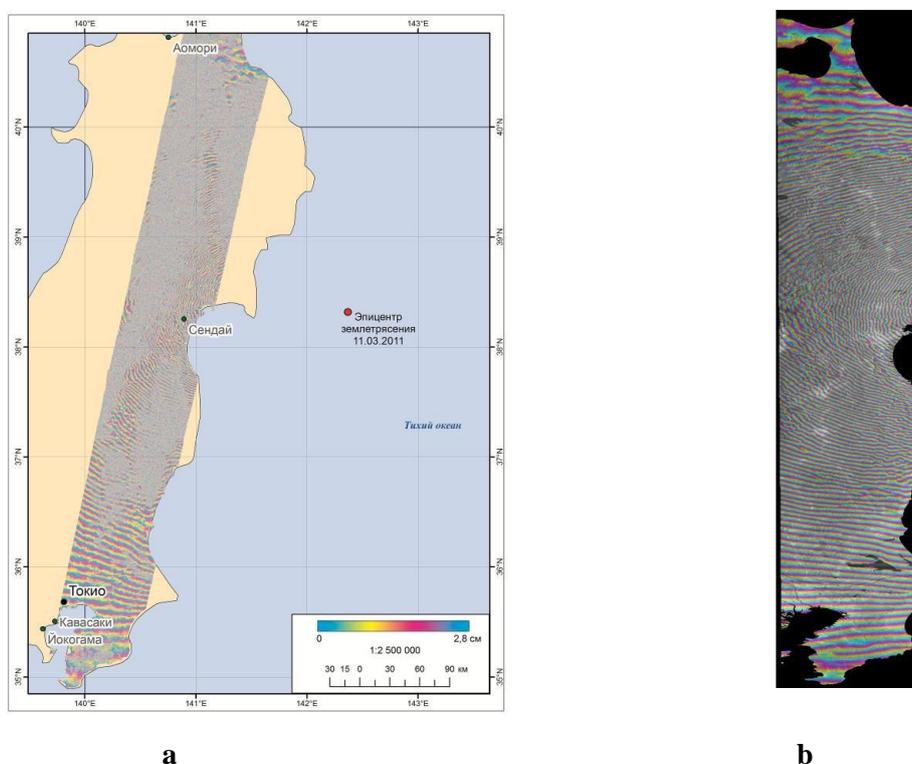
Границы отснятой территории отображены на рис. 1 а. Цветные интерферометрические полосы (фринги) на изображении отражают фазовое распределение, связанное со смещениями элементов земной поверхности по полю наблюдаемого участка местности (по направлению наклонной дальности, т.е. на спутник). Каждый фринг соответствует смещению, равному половине длины волны излучения РСА (т.е. 2,8 см). Эпицентр землетрясения обозначен красной точкой. Нетрудно видеть, что в центральной части полосы, наиболее близкой к эпицентру, пространственная частота фрингов максимальна (с периодом порядка 2000 м). На краях полосы, по мере удаления от эпицентра, пространственная частота фрингов значительно падает (период порядка 12-15 км).

**1. Анализ средних значений когерентности.** Процедура расчета значений когерентности выполнялась с использованием штатных программных средств пакета SARscape после операции усреднения (Multilooking) со значениями коэффициентов по дальности и азимуту, равными, соответственно, 1 и 7, после чего размеры изображения в пикселях стали равными 6160\*30347. При проведении оценки значений когерентности для каждого пикселя изображения использовалось стандартное выражение, см. формулу (1) в [2], со следующими значениями размеров окна по дальности X и азимуту Y: 3\*3, 5\*5; 7\*7; 11\*11; 21\*21 (с объемами выборки 9, 25, 49, 121 и 441 пиксель, соответственно). Результаты расчетов средних по площади всего изображения значений когерентности показали, как и следовало ожидать, что при изменении размеров окна с 3\*3 до 21\*21 имело место их монотонное падение - с 0,23 до 0,13, см таблицу 1.

Таблица 1. Зависимость средних значений когерентности от размера окна.

Размеры окна X*Y	3*3	5*5	7*7	11*11	21*21
Средние значения когерентности	0.23	0.18	0.16	0.14	0.13

Необходимо отметить чрезвычайно низкий уровень когерентности у данной интерферометрической пары изображений. В связи с этим, как известно, см., например, [2], для получения адекватной оценки значений когерентности необходимо проводить расчеты при больших размерах окна по дальности X и азимуту Y, поскольку использование выборок небольшого объема приводит к завышению получаемых оценок, усиливающемуся в области низких значений истинной когерентности.



**Рис. 1. Границы отснятой территории (а). Интерферограмма после фильтрации с размером квадратного фрагмента, равным 4096 пикселям (б).**

**2. Анализ возможностей программы фильтрации.** Особое внимание было уделено анализу предельных возможностей фильтрации в рамках модифицированного метода Goldstein; как известно, данный метод особенно эффективен при фильтрации сильно зашумленных интерферограмм [3]. В рамках данного метода интерферограмма  $I(x,y)$  разбивается на совокупность квадратных фрагментов IW (Interferogram Window),  $I_{fr}(x,y)$ , а значения после фильтрации  $I_{fr}^{filtered}(x,y)$  для каждого фрагмента рассчитываются по формуле:

$$I_{fr}^{filtered}(x,y) = FFT^{-1}[FFT\{I_{fr}(x,y)\}Z_{fr}(u,v)] \quad (1)$$

где  $FFT$  и  $FFT^{-1}$  – прямое и обратное преобразования Фурье, а  $Z_{fr}(u,v)$  определяется соотношением:

$$Z_{fr}(u,v) = [S_{fr}^{mean}(u,v)]^{\alpha} \quad (2)$$

где  $S_{fr}^{mean}(u,v)$  – Фурье-образ исходного фрагмента  $I_{fr}(x,y)$ , который с целью снижения дисперсии свернут в пространственно-частотной плоскости со сглаживающим окном (обычно размером  $3*3$ ). Показатель степени  $\alpha$  линейно зависит от значения когерентности  $C$  (см. формулу (1) в [1]), усредненного по локальной окрестности (обозначим его через  $C^{mean}$ ). При этом  $\alpha$  принимает значения  $\alpha_{min}$  и  $\alpha_{max}$  при значениях  $C^{mean}$ , равных, соответственно, 1 и 0 (при этом степень фильтрация минимальна в области высоких значений когерентности и максимальна в сильно зашумленных областях). Размеры квадратных фрагментов интерферограммы, степень их переналожения при сдвиге, размеры окон для расчета значений когерентности и сглаживающего окна, а также параметров  $\alpha_{min}$  и  $\alpha_{max}$  задаются оператором.

2.1. На первом этапе был проведен сравнительный анализ результатов фильтрации в функции от размеров  $d_{IW}$  квадратных фрагментов IW, на которые разбивается интерферограмма. Расчеты проводились при значениях  $d_{IW}$ , равных 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048 и 4096 пикселям. Использовались задаваемые по умолчанию значения: (1) параметров  $\alpha_{min}$  и  $\alpha_{max}$ , равные 0,3 и 2,5, соответственно, и (2) размеров окна для расчета значений когерентности, равные  $3*3$ . Было установлено, данный параметр оказывает наиболее мощное влияние на процесс фильтрации; при увеличении  $d_{IW}$  имело место резкое увеличение площади той части интерферограммы, которая характеризовалась достаточно четкой структурой фрингов; если до начала фильтрации эта часть составляла порядка 30 процентов от общей площади интерферограммы, см. рис. 1 а, то после выполнения фильтрации со значением  $d_{IW}=4096$  она увеличилась практически до 100 процентов, см рис. 1 в. При этом не было зафиксировано сколько-нибудь значительной деформации структуры фрингов в областях с относительно высоким уровнем когерентности, где достаточно четкая структура фрингов имела место еще до начала фильтрации. Кроме того, отсутствовали сколько-нибудь заметные "краевые" эффекты вблизи границ изображения.

В заключение отметим, что рассчитанное с помощью штатных программных средств пакета SARscape среднее (по всему изображению) значение когерентности (после фильтрации) монотонно возрастало при увеличении размеров квадратных фрагментов и при значении  $d_{IW}=4096$  достигло значения 0,42 (при проведении расчетов когерентности использовалось окно с максимальными размерами, равными 21, см. замечание в конце раздела 1). Отметим, что среднее значение когерентности, рассчитанное с этим окном, до фильтрации равнялось 0,13, см. раздел 1. Таким

образом, фильтрация в рамках модифицированного метода Goldstein обеспечила более, чем трехкратное увеличение среднего значения когерентности.

2.2. На втором этапе был проведен предварительный анализ влияния на процесс фильтрации интерферограммы значений параметров  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$ . С этой целью была выполнена повторная фильтрация интерферограммы при значениях  $d_{\text{ГВ}}$ , равных (1) 4096 и (2) 512 с максимально возможными в текущей версии алгоритма значениями параметров  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$ , равными, соответственно, 3 и 4. Сравнительный анализ первой из вновь полученных интерферограмм и интерферограммы, полученной ранее, см. раздел 2.1, при  $d_{\text{ГВ}}=4096$  и штатных значениях параметров  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$ , равных 0,3 и 2,5, позволил установить, что общие изменения структуры фрингов оказались достаточно малосущественными; это может быть объяснено тем, что экстремально большие размеры фрагмента  $d_{\text{ГВ}}$  сами по себе уже обеспечили возможности эффективного подавления шумов. Напротив, сравнительный анализ второй из вновь полученных интерферограмм и интерферограммы, полученной ранее, см. раздел 2.1, при  $d_{\text{ГВ}}=512$  и штатных значениях параметров  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$ , равных 0,3 и 2,5, показал достаточно заметное увеличение размеров зоны, покрытой фрингами, что в целом также понятно – значение 512 существенно меньше, чем 4096, и после фильтрации с этим размером фрагмента остаточный уровень шумов был, видимо, значительно выше, что и позволило “проявить себя” возросшим значениям параметров  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$ . Итак, на основании вышеизложенного может быть сделан предварительный вывод о том, что относительная роль параметров  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$  возрастает при уменьшении размера фрагмента  $d_{\text{ГВ}}$ .

2.3. Ранее отмечалось, что показатель степени  $\alpha$  в выражении (2) зависит от локальных значений когерентности; расчет этих значений проводится непосредственно в ходе выполнения процедуры фильтрации. Поскольку сами результаты расчета когерентности существенно зависят от размеров окна по дальности  $X$  и азимуту  $Y$ , см. раздел 1, на третьем этапе была проведена предварительная оценка влияния размеров этого окна на результаты фильтрации. С этой целью была проведена фильтрация интерферограммы при значениях  $d_{\text{ГВ}}$ , равных (1) 4096 и (2) 512 со штатными значениями параметров  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$ , равными, соответственно, 0,3 и 2,5, но со значениями  $X$  и  $Y$ , равными 21. Полученные результаты позволили установить, что данные изменения не сказались на конечных результатах фильтрации. Из этого может быть сделан только один вывод - пользователь может "организовать" расчет файла когерентности с нужными значениями размера окна, но в текущей версии самой процедуры фильтрации этот файл, не используется (а используются автоматически рассчитываемые значения когерентности с жестко зафиксированными размерами окна, равными, по-видимому,  $3*3$ ).

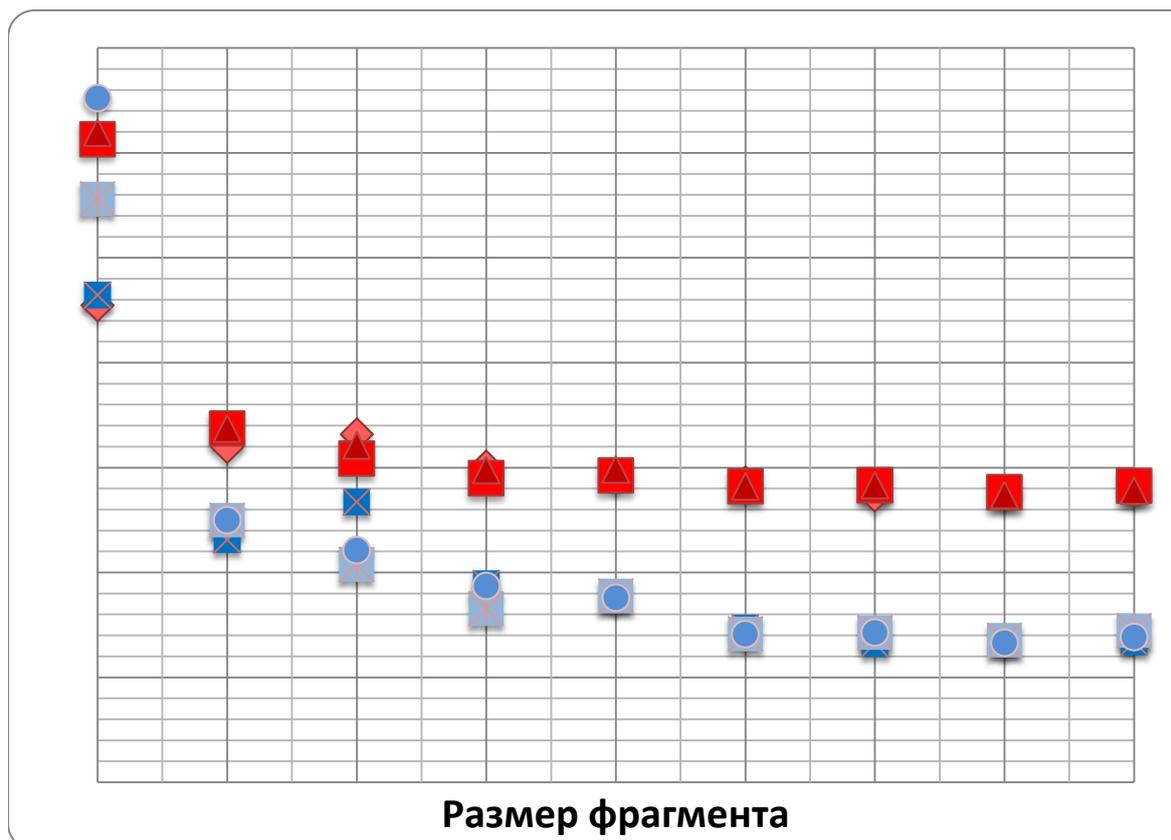
**3. Анализ локальных значений когерентности.** Ранее отмечалось, см раздел 2.1, что при проведении фильтрации в рамках модифицированного метода Goldstein при увеличении размера фрагмента интерферограммы  $d_{\text{ГВ}}$  имело место резкое увеличение площади той части интерферограммы, которая характеризовалась достаточно четкой структурой фрингов. В связи с этим была предпринята попытка провести оценку уровня когерентности для тех частей изображений, на которых при очередном увеличении значения  $d_{\text{ГВ}}$  впервые появлялись фринги с достаточно четкой структурой. Процедура выделения фрагментов проводилась в диалоговом режиме на экране монитора. Полученные результаты представлены на рис. 2. По оси абсцисс отложены значения размера фрагмента интерферограммы  $d_{\text{ГВ}}$ , а по оси ординат средние значения когерентности. Расчет когерентности проводился при двух размерах окна по дальности  $X$  и азимуту  $Y$ , равных  $3*3$  (синие точки) и  $21*21$  (красные точки). Для каждого значения  $d_{\text{ГВ}}$  были выделены по три фрагмента. Значение  $d_{\text{ГВ}}$ , равное 1, соответствует

интерферограмме до фильтрации (на ней также выбраны 3 фрагмента с четкой структурой фрингов).

Как и следовало ожидать, все значения когерентности, рассчитанные с размерами окна 3\*3, выше аналогичных значений, рассчитанных с размерами окна 21\*21, причем различия усиливаются в области низких значений когерентности. Значения, рассчитанные с размерами окна 3\*3, не опускаются ниже 0,18, см. [2].

Значения, рассчитанные с размерами окна 21\*21, опускаются вплоть до уровня порядка 0,03; представленная на рис. 2 зависимость средних значений когерентности от  $d_{1W}$  позволяет оценить уровень когерентности для фрагментов изображения, на которых должны появиться фринги с четкой структурой при произвольном значении  $d_{1W}$ .

**4. Продолжение работ.** Планируется проведение детального анализа: (1) результатов развертки фазы в рамках методов Minimum Cost Flow и Region Growing и (2) результатов уточнения орбитальных параметров с использованием прецизионные данных подспутниковых GPS-измерений координат и смещений для набора опорных точек местности (ОТМ). Далее с целью количественной оценки уровня возможных ошибок, возникающих при выполнении отдельных ключевых процедур обработки (в частности, возможных искажений структуры фрингов на этапе фильтрации) планируется провести сравнительный анализ для набора цифровых карт смещений (ЦКС), рассчитанных при разных значениях параметров, а также с использованием данных других РСА.



**Рис. 2.** Зависимость средних значений когерентности для фрагментов изображений с впервые появившимися фрингами от размера фрагмента интерферограммы  $d_{1W}$ .

**5. Заключение.** Сообщается о промежуточных результатах первого цикла дифференциальной интерферометрической обработки с использованием данных

европейского PCA ASAR/ENVISAT по территории острова Хонсю, Япония, пострадавшей от землетрясения, произошедшего 11 марта 2011 г.

Продемонстрированы возможности резкого повышения уровня когерентности и увеличения площади той части интерферограммы, на которой фринги имеют достаточно четкую структуру, с помощью фильтрации в рамках модифицированного метода Goldstein; эффективность фильтрации монотонно возрастала при увеличении размеров квадратных фрагментов  $d_{IW}$ , на которые разбивается интерферограмма, вплоть до значения  $d_{IW}=4096$ .

При проведении обработки использовались данные PCA ASAR/ENVISAT с суперсайта [1]. Кроме того, использовались GPS-данные о смещениях земной поверхности (версия 0.1), также взятые с суперсайта [1].

### **Литература**

1. <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php#Sat5>.
2. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. К вопросу о точности совмещения интерферометрических пар изображений // В данном сборнике.
3. 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.