



Общероссийский математический портал

Д. С. Нощенко, А. С. Пережогин, О методе радарной интерферометрии для оценки деформации земной поверхности, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2010, выпуск 1(1), 54–61

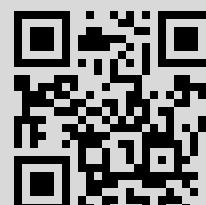
DOI: <http://dx.doi.org/10.18454/2079-6641-2010-1-1-54-61>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 77.82.199.43

20 июля 2016 г., 04:43:07



УДК 004.67

О МЕТОДЕ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д.С. Нощенко¹, А.С. Пережогин²

¹ Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга,
683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

² Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: drew72156@yandex.ru

Рассмотрены технологии SAR, InSAR, D-InSAR. Описана процедура обработки интерферограмм и работа с программным пакетом ROI_PAC. В качестве дополнения приведен список ресурсов, предоставляющих данные SAR для исследования.

Ключевые слова: интерферометрия, деформации земной коры, дистанционные методы

© Нощенко Д.С., Пережогин А.С., 2010

MSC 68N01

ABOUT RADAR INTERFEROMETRY FOR STUDYING EARTH'S STRAIN

D.S. Noschenko¹, A.S. Perezhogin²

¹ Kamchatka State University by Vitus Bering, 683032, Petropavlovsk-Kamchatskiy,
Pogranichnaya st., 4, Russia

² Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Krai, Paratunka, Mirnaya st., 7,
Russia

E-mail: drew72156@yandex.ru

In article SAR, InSAR, D-InSAR methods are represented. Program ROI_PAC of interferometry processing is discussed. There are some basic links for investigation of InSAR.

Key words: Earth's deformation, remote sensing, InSAR

© Noschenko D.S., Perezhogin A.S., 2010

Введение

Развитие методов прогнозирования природных и техногенных катастроф постоянно сталкивается с проблемой того, какие изменения геофизических полей предшествуют этим событиям. В геофизике создаются методы прогнозирования сейсмических событий на основе наблюдения естественных полей, вариации которых связывают с деформационными процессами земной коры. Существенный результат в понимании взаимосвязи геофизических процессов земной коры может быть получен в результате исследования полей деформаций горных пород в сейсмоактивной области. Следует отметить, что здесь необходимо как построение физико-математической модели геофизических процессов, так и привлечение экспериментальных данных деформаций земной поверхности. Одним из методов изучения изменений деформационного процесса земной коры на большой территории является технология InSAR.

В настоящей статье рассматриваются основная идея и методология обработки данных радарной интерферометрии, программная реализация которой представлена в свободно распространяемой программе ROI_PAC. На примере тестовых данных, которые включены в программный пакет ROI_PAC, получены смещения земной поверхности. Подробное описание процедуры обработки с помощью ROI_PAC и визуализации полученных данных в программе GMT дает возможность обработки данных интерферометрии для камчатского геодинамического полигона.

Технологии SAR, InSAR, D-InSAR

Synthetic Aperture Radar (SAR) – радар синтезированной апертуры – относится к технологиям радиоволнового сканирования. Метод был разработан в середине 40-х г. XX в. американским инженером по коммуникациям Дэвидом Санстейном. Исторический обзор технологии SAR приведен в работе [1].

SAR используется для получения качественных изображений земной (и любой другой хорошо отражающей радиоволны) поверхности. SAR-изображения могут служить материалом для получения иной информации. В частности, по данным SAR в результате некоторых преобразований можно оценить деформацию сканированной поверхности в течение некоторого времени. Благодаря крайне низкой атмосферной абсорбции по отношению к радиоволнам наблюдения могут проводиться даже при высокой облачности.

Рассмотрим концепцию SAR [2, 3] на примере работы орбитального спутника, аналогично в случае использования других средств – аэрозондов, самолетов и т. д. Сигнал, передаваемый излучателем спутника, представляется в виде гармонической функции

$$A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где A – амплитуда, $(\omega t + \varphi)$ – текущая фаза сигнала.

Пусть задана некая орбита, и аппарат проходит по этой орбите, посылая волны одновременно на узкий, но достаточно протяженный участок поверхности. Данный участок, в свою очередь, делится на ячейки, причем одной ячейке соответствует пара зарегистрированных значений: амплитуда и фаза сигнала, отраженного от поверхности. Площадь такой ячейки определяет пространственное разрешение антенны и зависит исключительно от используемого оборудования. Таким образом, при прохождении участка поверхности записывается двумерный массив данных, каждый

элемент которого представляется в виде комплексного значения в тригонометрической форме, содержащего амплитуду и фазу отраженного сигнала:

$$A(\cos \varphi + i \sin \varphi).$$

Делается это для того, чтобы далее можно было оперировать такими данными, например, для получения изображений. Строки и столбцы массива представляют собой SAR-координаты (азимут и диапазон наклона), а сам формат данных называется комплексным изображением SAR.

На получение качественного изображения сильно влияет такой параметр, как когерентность. В данном случае этот термин можно рассматривать как качество объекта (поверхности), определяющее его способность рассеивать электромагнитные волны. Чем выше этот параметр, тем более точными будут конечные данные. Хорошо когерентными поверхностями являются, например, пустыни. На практике для получения четкого изображения необходимо несколько проходов спутника над сканируемым участком.

Рассмотрим процедуру получения изображений из комплексных данных SAR. Амплитудное изображение – это зарегистрированное изображение объекта. Монотонное изображение составляется по значениям амплитуды, взятым из исходных данных. Сами значения зависят не от химического состава отражающей поверхности, а от ее неровности. Чем выше неровность, тем более высокое значение амплитуды будет иметь сигнал, отраженный от нее (светлые участки), и наоборот, сигнал, отраженный от ровной поверхности, будет иметь низкое значение амплитуды (темные участки).

Посылаемая спутником электромагнитная волна описывается синусоидой (1) с периодом 2π . Обозначим через R расстояние до объекта зондирования – тогда излучаемая волна должна пройти расстояние $2R$. При этом имеет место следующая линейная зависимость фазы φ , длины волны λ и расстояния R :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R. \quad (2)$$

Из соотношения (2) следует, что волна, отраженная от объекта, расположенного на расстоянии R от антенны, получит то же изменение фазы, что и волна, отраженная от объекта с расстоянием αR , где α – множитель, пропорциональный длине волны λ . Таким образом, по одиночному набору данных SAR невозможно определить значения высот. Фазовое изображение в данном случае составляется по значениям фазы, взятым при $R < \lambda$. Как видно на рис. 1, визуализация фазы в данном случае не несет никакой информации [4].

Ранее было описано применение одиночного набора данных SAR для получения качественных изображений сканируемого участка. На самом деле можно добиться гораздо более интересных результатов, используя технологию InSAR и ее разновидность D-InSAR.

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) – метод, основанный на использовании, как правило, одного или двух орбитальных SAR-аппаратов при согласованном во времени получении нескольких наборов комплексных данных сканируемого участка с последующей обработкой этой информации [2, 5]. Конечными результатами обработки могут выступать Digital Elevation Model (DEM) – цифровая высотная модель, интерферограмма – визуализация результатов вычислений.

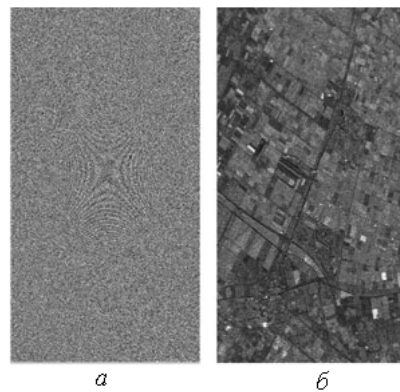


Рис. 1. Фазовое (а) и амплитудное (б) изображения, полученные из одиночного набора комплексных данных

Стоит отметить одно из важнейших приложений – создание карт деформации земной поверхности с использованием D-InSAR (Differential InSAR) [6, 7]. В таких системах, как ROI_PAC, применяются как InSAR, так и D-InSAR алгоритмы. Для работы D-InSAR на вход подаются как минимум одна DEM и две интерферограммы, полученные в результате InSAR-обработки.

В 1990 г. Европейским космическим агентством (ESA) на орбиту Земли был запущен аппарат ERS-1 с одиночной SAR-антенной. Спустя 5 лет вслед за ним отправился ERS-2 – практически копия первого. Было принято решение использовать эти аппараты для радарной интерферометрии, и с 1995 по 1996 гг. ERS-1, 2 работали в тандеме с 24-часовым интервалом. В начале 2000 г. оба аппарата завершили свою основную миссию. В 2002 г. стартовал наследник программы ERS – Envisat, который на момент запуска являлся крупнейшей спутниковой системой исследования Земли. Аппарат функционирует по сей день и несет на себе множество оборудования, в том числе антенну ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), работающую на частоте 5,3 ГГц. Более подробно с программами ESA можно ознакомиться на официальном ресурсе [8].

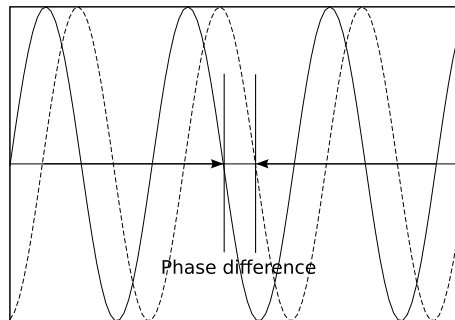
Пусть даны два спутника с солнечно-синхронными орбитами (аппарат появляется над одной и той же точкой один раз в сутки), проходящими на некотором расстоянии друг от друга. Первый спутник делает проход, сканируя участок поверхности. Через определенное время над этим же участком проходит второй спутник, также сканируя его, при этом он имеет несколько отличающийся от первого диапазон наклона. В результате получаются два и более наборов комплексных данных, на основе которых можно проводить вычисления различных параметров.

Ключевой момент в работе InSAR – использование разности фаз, или фазовый сдвиг (рис. 2). Так, зная разность фаз, можно определить высоты объектов сканирования. В случае использования одного аппарата расчеты упрощаются, поскольку отпадает необходимость применять алгоритм корректировки орбит, возникающих в результате различного угла наклона антенн первого и второго аппаратов.

Пусть даны два массива значений амплитуды и фазы данных SAR – первичный (master) и вторичный (slave). Рассмотрим основные этапы создания интерферограммы [2]:

1. Ко вторичному массиву применяется поэлементное сопряжение (B, ψ):

$$B(\cos \psi + i \sin \psi) \longrightarrow B(\cos \psi - i \sin \psi).$$

Рис. 2. Разность фаз Θ

2. Производится поэлементное умножение первичного массива на вторичный. В результате получим следующее:

$$A(\cos \varphi + i \sin \varphi) \cdot B(\cos \psi + i \sin \psi) = AB[\cos(\varphi - \psi) + i \sin(\varphi - \psi)],$$

где величина $(\varphi - \psi) = \Theta$ – разность фаз; AB – результирующая амплитуда.

3. Осуществляется расчет высот поверхности на основе значений разности фаз.

4. По данным шага 2–3 строится плоская интерферограмма.

5. Полученный образ имеет множество дефектов, в частности разрывы на изображении в значениях фазы, равной 2π . Причиной разрывов является следствие цикличности (период 2π) фазы. Процесс избавления от этого эффекта называется распаковкой фазы. Сначала значения фазы группируются таким образом, чтобы в пределах одной группы содержались значения от 0 до 2π . Затем подбирается для каждой группы коэффициент пропорциональности α в соотношении (2). В итоге получаем корректное значение фазы в каждой точке.

6. Производится генерация DEM. Данные шага 4 позволяют получить карту высот в SAR-координатах. Полученные значения должны быть соотнесены с условным эллипсоидом и пересчитаны на сетку для построения.

7. На следующем шаге производится карта деформации (алгоритм D-InSAR).

В общий алгоритм можно включить генерацию карт когерентности, позволяющих определить, с какой достоверностью были построены изображения деформации поверхности, DEM и т. д. (рис. 3). Когерентность вычисляется как произведение начальных амплитуд (шаг 2, результирующая амплитуда). Светлые участки демонстрируют высокое значение когерентности (высокая достоверность данных), аналогично темные участки соответствуют низкому значению когерентности.

Обзор программного пакета ROI_PAC

В настоящий момент существует несколько программных продуктов, позволяющих получать различные данные на основе InSAR, причем среди них представлены как коммерческие, так свободно распространяемые решения. Остановимся на пакете ROI_PAC (Repeat Orbit Interferometry Package). Данная программа существует в различных версиях под Unix-подобные системы (Linux, FreeBSD, Solaris, MacOS X). Ее открытый код доступен на Open Channel Foundation:

http://www.openchannelfoundation.org/projects/ROI_PAC. Последний стабильный релиз на момент написания статьи – 3.0.1. Различную документацию и дополнительное программное обеспечение можно найти на интернет-ресурсе: <http://www.roipac.org>.

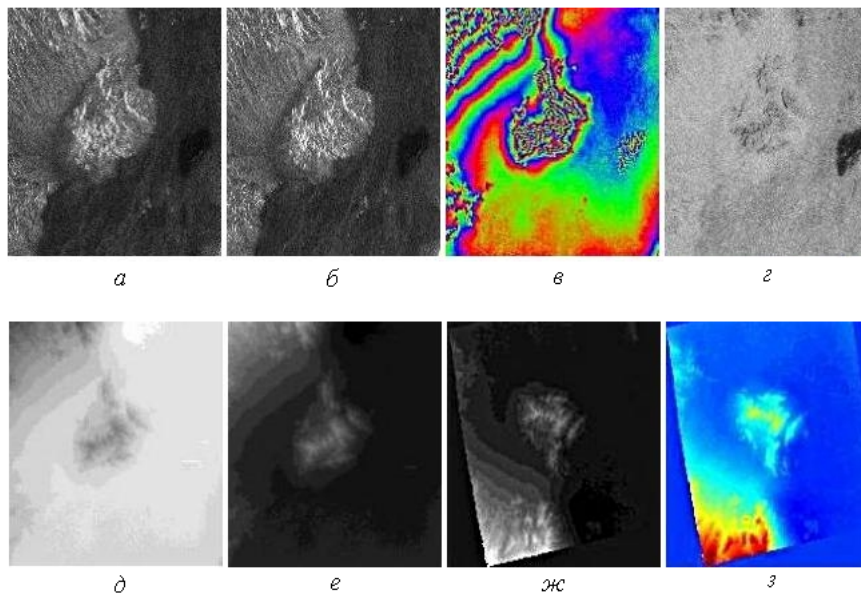


Рис. 3. Пример изображений InSAR и их обработки: *master*-изображение (а), *slave*-изображение (б), дифференциальная интерферограмма (в), карта когерентности (г), нераспакованная фаза (д), карта высот (е), DEM с наложением высот (ж) и цветовой модели (з)

Проект ROI_PAC стартовал в лабораториях JPL-Caltech в 1980 г. Сегодня программа с успехом применяется для получения дифференциальных интерферограмм. ROI_PAC представляет собой собрание perl-скриптов и несколько бинарных файлов. Основная работа заключается в поочередном запуске этих скриптов с соответствующими параметрами. Дистрибутив в целом имеет объем порядка 50 Mb, стоит также загрузить тестовые данные (еще около 2 Gb).

Пакеты, необходимые для работы ROI_PAC, и вспомогательные утилиты:

```
perl:           интерпретатор Perl
roi_pac:       сам дистрибутив программы
roipac2grdfile: конвертер ROI_PAC -> GMT
getorb:       обработка данных орбит формата Delft univ.
fftw3:        алгоритм быстрого преобразования Фурье
GMT mdx dgx:  визуализаторы
netcdf:       унифицированный формат данных netCDF
```

Входными данными ROI_PAC являются комплексные данные SAR, данные орбит (необходимы для корректировки параметров в процессе обработки), данные DEM (могут быть получены во время работы).

Окончательный результат обработки – это файл формата *.unw – unwrapped interferogram (распакованная интерферограмма) и связанный с ней *.rsc – файл ресурсов. Первый содержит два бинарных массива – значения высот и фазовый сдвиг. Файл ресурсов содержит дополнительную информацию об интерферограмме в тестовом формате.

Пример обработки и визуализации данных SAR

На примере данных спутников ERS рассмотрим процедуру обработки. В директории `../ROI_PAC/test_dir` должны содержаться следующие подкаталоги:

```
930110      # исходные данные SAR,
950523      # датированы 93.01.10 и 95.05.23 соответственно
DEM         # данные DEM
PRC         # данные орбит формата PRC
```

Перед выполнением необходимо убедиться, что все переменные окружения ROI_PAC установлены корректно:

```
# шаг 1: препроцессинг
cd 930110; make_raw.pl PRC SARLEADER* 930110
cd ../950523; make_raw.pl PRC SARLEADER* 950523
# шаг 2: с помощью файла (init.proc) запускаем главный процесс
cd ../; process_2pass.pl init.proc
```

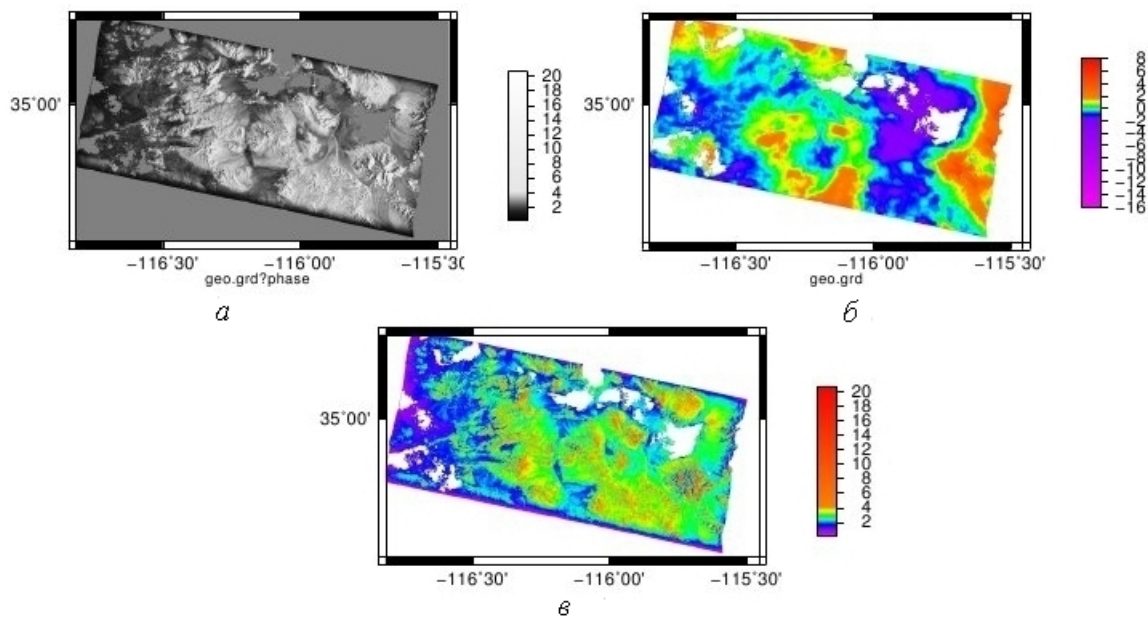


Рис. 4. DEM с наложением высот (а), разности фаз (б), цветовой модели (в)

В результате обработки в каталог `./int_930110_950523` будут записаны все выходные данные. Нас интересует окончательный результат `geo_930110_950523.unw` – его необходимо визуализировать. Для этого используем пакет GMT (Generic Mapping Tools), утилиту `roipac2grdfile` и скрипт `grd2pdf.pl`. Последний в нашем случае должен находиться в каталоге с бинарными файлами GMT:

```
# шаг 3: конверт unw -> grd
cd ./int_930110_950523;
roipac2grdfile -i geo_0110_950523.unw -o geo.grd -t real
# шаг 4: обработка grd; конверт grd -> pdf
cd ../../GMTxxx/bin;
```



```
./grd2pdf.pl --input geo.grd --output geo1.pdf --band magnitude  
./grd2pdf.pl --input geo.grd --output geo2.pdf --band phase  
./grd2pdf.pl --input geo.grd --output geo3.pdf
```

Ключ `band` при запуске последнего скрипта отвечает за выборку данных для визуализации. Результат показан на рис. 4. Легенда (см. рис. 4, б) показывает, на сколько сантиметров произошло смещение участка поверхности в период с 1993 по 1995 гг. Полученное изображение дает окончательную информацию о деформациях земной поверхности за рассматриваемый период.

Заключение

Приведенный обзор основных возможностей спутникового метода определения деформаций горных пород будет использован при оценке сейсмической опасности на основе изменения деформационного поля земной коры. Полученные результаты работы программы ROI_PAC дают возможность обработки данных территории камчатского геодинамического полигона. Важно отметить, что данные о деформациях могут быть использованы для оценки сейсмической опасности в пределах территории города Петропавловска-Камчатского и его окрестностей.

В целом информация о напряженно-деформированном состоянии горных пород позволяет создать математическую модель геофизических процессов в сейсмоактивных областях и объединить имеющиеся данные о региональных вариациях магнитного и электрического полей, выхода подпочвенного радона, интенсивности геоакустической эмиссии, уровня воды в скважинах, которые предваряют землетрясения.

Библиографический список

1. GART, JASON H. Electronics and Aerospace Industry in Cold War Arizona, 1945–1968: Motorola, Hughes Aircraft, Goodyear Aircraft. Phd diss., Arizona State University, 2006.
2. FERRETTI A. ET AL. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, February 2007). ESA Publication, 2007. 48 p.
3. CURLANDER J.C., McDONOUGH R.N. Synthetic aperture radar: systems and signal processing. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
4. http://www.ercim.eu/publication/Ercim_News/enw65/barbier.html
5. RAMON R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic, 2001.
6. MASSONNET D., FEIGL K. L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface // Reviews of geophysics. Vol. 36. № 4. 1998. P. 441–500.
7. BURGMANN R., ROSEN P.A., FIELDING E.J. Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation // Ann. Rev. Earth and Plan. Sci. Annual Reviews. 2000.
8. <http://www.esa.int>
9. http://www.geocomputation.org/1999/084/gc_084.htm