

Применимость радиолокационной интерферометрии к мониторингу деформаций земной поверхности в районе Северомуйского участка БАМ

Л.Н. Захарова¹, А.И. Захаров¹, М.А. Лебедева², В.А. Саньков²

¹ Институт радиотехники и электроники им В.А.Котельникова РАН
Пл.Введенского, 1, Фрязино Московской области, 141190

² Институт земной коры СО РАН
Ул.Лермонтова, д.128. Иркутск 664033
e-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

Приведены результаты интерферометрической обработки данных радиолокаторов космического базирования ENVISAT/ASAR Европейского космического агентства и ALOS/PALSAR Японского космического агентства, для территории, включающей участок оползневой опасности на железной дороге вблизи станции Казанкан. Показаны возможности и ограничения в использовании метода интерферометрии для обнаружения динамики поверхности для каждого из этих инструментов. Показано, что данные PALSAR, полученные с восходящего витка орбиты, являются предпочтительными для выявления оползневой активности на данном тестовом участке по ряду параметров. В ходе анализа обнаружены участки смещения отражающей поверхности на интервале времени два года.

The paper contains results of interferometric processing of space borne radar data: ENVISAT/ASAR (ESA) and ALOS/PALSAR (JAXA) for the territory of landslide hazard near Kazankan railway station on Baikal-Amur Mainline. Potentials and limitations in using interferometric method for both instruments are demonstrated. PALSAR data from ascending orbit were found to be preferred in several aspects. Data examination reveals scattering surface motion for the image pair with two years time interval between acquisitions.

Введение: цели работы и методы

Участок Байкало-Амурской железнодорожной магистрали вблизи Северомуйского тоннеля находится в районе активных геологических процессов, динамическое влияние нескольких разломных зон, расположенных в непосредственной близости от дороги, может негативным образом сказываться на состоянии железнодорожного полотна и окружающих объектов. В частности, нивелирование, проведенное на Северо-Муйском геодинамическом полигоне в 1986–1990 гг., показало значительные смещения геодезических пунктов, достигавшие величины 20 мм/г [1].

Данное исследование посвящено выявлению признаков таких смещений по архивным данным методом радиолокационной интерферометрии. Основой для оценки подвижек рельефа по данным радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) является разность фаз сигналов, принятых в двух сеансах при определённых условиях: траектории носителей должны быть близкими и почти параллельными, за время между съёмками микрорельеф поверхности не должен претерпеть заметных изменений, а также тропосферная обстановка в момент съёмки не должна сильно различаться.

Разность фаз $\Delta\varphi$ зависит от разности путей сигнала Δr прямым образом:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r, \quad (1)$$

где λ — длина волны радиолокатора.

При анализе интерферограммы (изображения, показывающего величину разности фаз) следует учитывать множество аспектов, а именно:

- неоднозначность фазового изображения (разрывы при переходе через значения, кратные 2π);

- пространственную и временную декорреляцию изображений, снижающую информативность разностно-фазовой картины;
- влияние геометрии съёмки (фиксация не истинного вектора разности путей Δr , а лишь его проекции на линию визирования);
- эффекты искажения геометрии поверхности за счёт рельефа (сокращение склонов, обращённых к радиолокатору; растягивание и/или затенение обратных склонов; наложение элементов, расположенных на равных дальностях от точки съёмки, но по-разному локализованных на местности);
- влияние на Δr рельефа местности, величины наклонной дальности, тропосферных флуктуаций и собственно сдвигов поверхности.

Ключевой величиной при построении разностно-фазовой картины, является интерферометрическая когерентность, которая показывает степень декорреляции изображений:

$$\gamma = \frac{|E(z_1 z_2^*)|}{E(z_1 z_1^*) E(z_2 z_2^*)} \quad (2)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют первой и второй съёмке, z — комплексная величина зарегистрированного эхо-сигнала, звёздочкой обозначено комплексное сопряжение, а $E()$ — операция вычисления среднего значения по пространственному ансамблю элементов. Интерферометрическая когерентность принимает значения от 0 до 1, она приближается к нулю в случае полной декорреляции изображений, когда информацию из интерференционной картины извлечь невозможно, и равна единице в случае идеальной корреляции (на практике не достижимой). Чем выше значение γ , тем надёжнее фазовые измерения, прочитываемые на интерферограмме.

Для целей эксперимента были отобраны архивные данные радиолокаторов высокого разрешения: ENVISAT/ASAR (Европейского космического агентства ESA) за 2004–2006 годы и ALOS/PALSAR (Японского космического агентства JAXA) за 2007–2009 годы.

Анализ зависимости результата от условий съёмки и параметров инструментов

Анализ взаимного расположения снимающей аппаратуры, линии визирования, местных уклонов и направления движения оползня вблизи станции Казанкан показали, что данные ENVISAT на этот район малоинформативны в плане оценки развития оползневой процесс, поскольку оползень перемещается в направлении, почти ортогональном линии распространения, и, таким образом, та составляющая вектора смещения поверхности, к которой чувствителен метод, исчезающе мала. Кроме того, этот радиолокатор работает на частоте около 5.3 ГГц, таким образом, длина волны составляет 5.6 см, и временная декорреляция (при минимальном сроке повторной съёмки 35 суток) сильно влияет на информативность изображения. Тем не менее, для нескольких из обработанных пар сеансов ENVISAT, локально интерферограмма обладает удовлетворительной когерентностью. Обнаружены несколько фрагментов повышенной когерентности, свидетельствующих о динамике поверхности. В зоне динамического влияния Муяканского разлома обнаружены два типа деформаций, которые можно определить, как тектонические — линейно локализованные и площадные. Первые приурочены непосредственно к зоне сместителя разлома, прослеживающегося в основании уступа Муяканского хребта. Площадные деформации, локализующиеся вблизи окончания Муяканского разлома на СВ замыкании Муяканской впадины и в западном борту Улан-Макиткской впадины, не могут быть

прямо объяснены за счет сейсмогенных движений, однако могут являться следствием изменений параметров среды внутри зоны разлома [2].

Данные PALSAR вследствие другой ориентации трассы полёта, а также меньшей рабочей частоты (1.3 ГГц, длина волны около 24 см) оказались более удачны в плане возможности изучения оползневого процесса вблизи станции Казанкан. На интерферограмме, сделанной для временного промежутка около двух лет (январь 2007 года – январь 2009 года), видны области, подверженные динамике. Эти области локализуются на склонах и в непосредственной близости железнодорожных путей и мостов. Ранее исследователями по данным наземных измерений были обнаружены значительные смещения в данных областях [3].

На рис.1 показаны (не в истинном масштабе) четыре угла, определяющих величину проекции смещения поверхности на линию визирования. Это угол обзора q , угол a между направлением движения носителя и горизонтальной составляющей вектора смещения, угол уклона поверхности e , и угол c между направлением смещения и поверхностью. Для иллюстрации выбрано смещение, произошедшее в результате выдавливания нижней части заштрихованной «линзы», которое, предположительно, происходит в районе одного из мостов.

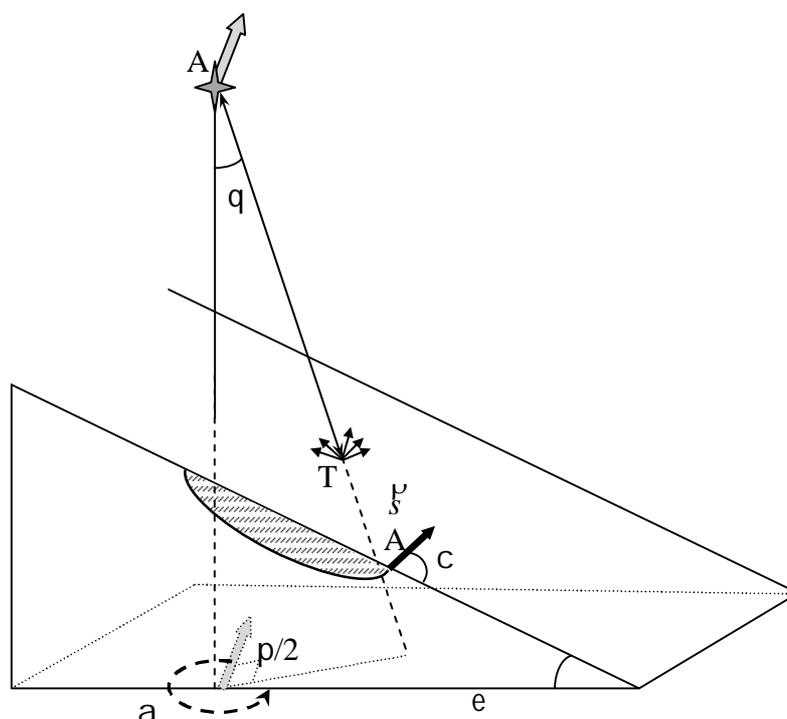


Рис. 1. Геометрия съёмки с учётом взаимной ориентации трассы полёта носителя РСА и уклонов местности в районе оползня

Сигнал, излученный из точки А, достигает в точке Т поверхности Земли, наклоненной под углом e к горизонту, происходит его рассеивание поверхностью, после чего регистрируется эхо-сигнал, вернувшийся обратно. Во время повторной съёмки происходит то же самое, с небольшим отклонением в положении точки А. В результате смещения поверхности изменяется разность хода сигнала и, следовательно, разность фаз в соответствии с формулой (1). Поскольку разность хода фиксируется только в направлении на спутник, вместо истинного вектора смещения s^u возможно измерить лишь его проекцию на линию визирования АТ. Согласно [4], величина проекции равна

$$|\hat{S}| \cdot (\sin \theta \sin \alpha \cos(\chi - \varepsilon) + \cos \theta \sin(\chi - \varepsilon)) \quad (3)$$

В случае Казанканского оползня величина в скобках составляет около 0.4 и является положительной, таким образом, на интерферограмме смещение вверх, как показано на рисунке, будет выглядеть как удаление от точки съёмки, что и наблюдается на полученной интерферограмме (тёмные пятна, на которые указывают стрелки на рис.2б).

Следует отметить, что в той же самой геометрии скольжение части поверхности вниз вдоль плоскости склона будет выглядеть на интерферограмме таким же образом (уменьшение значения разности фаз относительно соседних участков), и в данном случае необходимы дополнительные сведения о характере движения для верной интерпретации разностно-фазовой картины, полученной в результате интерферометрической обработки данных РСА. Однако метод позволяет точно установить и оконтурить области наличия смещений поверхности относительно расположенных вблизи неподвижных фрагментов.

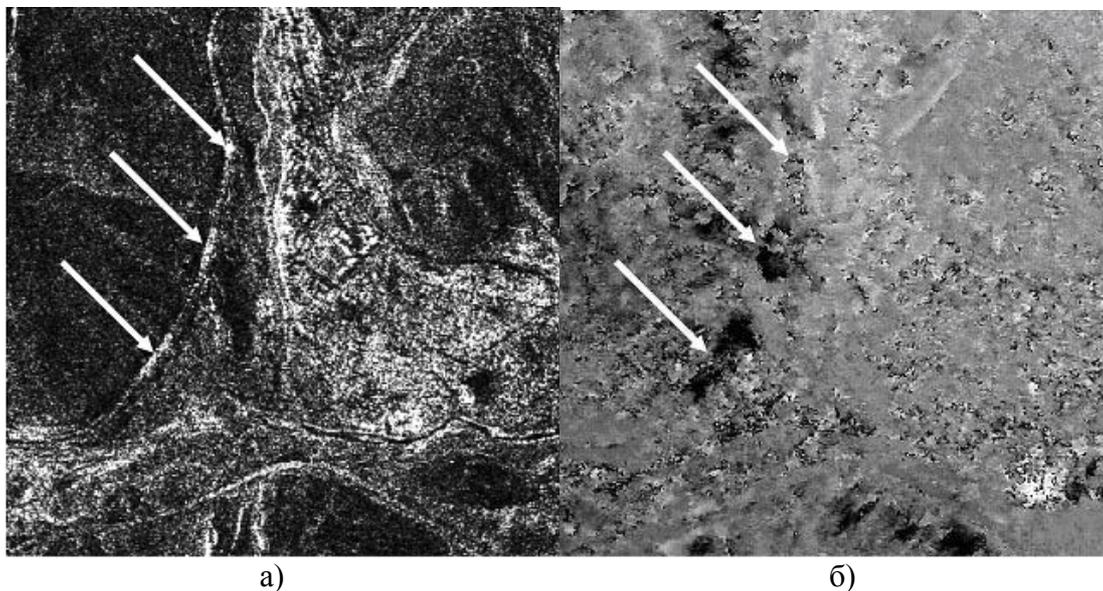


Рис. 2. Амплитудное изображение (а) и интерферограмма (б) района вблизи станции Казанкан. Стрелками показаны железнодорожные мосты

Заключение: полученные результаты

Как показали проведённые исследования, метод РСА-интерферометрии работает успешно при условии тщательно подобранных данных. При заказе съёмки необходим анализ направления ожидаемых смещений и сопоставление этой информации с геометрией съёмки. Далее, данные L-диапазона (PALSAR) лучше данных C-диапазона вследствие повышения интерферометрической когерентности при одних и тех же порядках изменения микрорельефа поверхности за время между съёмками за счёт большей длины волны сигнала.

Обнаруженные на интерферограмме смещения соответствуют ожидаемым, но для точной интерпретации необходимы дополнительные сведения о характере подвижек.

Авторы выражают благодарность Европейскому космическому агентству ESA за данные ENVISAT/ASAR, полученные по проекту Cat-1 6320, а также Японскому аэрокосмическому агентству JAXA за данные ALOS/PALSAR, предоставленные для исследования.

Литература

1. Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Коваленко С.Н., и др. Разломы и сейсмичность Северо-Муйского геодинамического полигона. Н: Наука, 1991. 111 с.
2. М.А. Лебедева, В.А. Саньков, Л.Н. Захарова, А.И. Захаров. «Картирование деформаций земной поверхности в зонах активных разломов северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы с использованием метода РСА-интерферометрии», труды Всероссийского симпозиума с международным участием, посвященного 80-летию со дня рождения академика Николая Алексеевича Логачева "Кайнозойский континентальный рифтогенез" 7-11 июня 2010г., в печати.
3. Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Лапердин В.К., Залуцкий В.Т., Попов О.Ю. Инженерно-геологические особенности Казанканского участка БАМ// Сергеевские чтения - М.: ГЕОС, 2004. -Вып. 6, С.438–442.
4. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Лебедева М.А. Применение метода РСА интерферометрии для мониторинга оползневой активности на Северомуйском участке железной дороги. Труды конференции ИРЭ, 2009.