

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РСА ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОПОЛЗНЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА СЕВЕРМУЙСКОМ УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

ЗАХАРОВ А.И.¹, ЗАХАРОВА Л.Н.¹, ЛЕБЕДЕВА М.А.²

¹ – Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

² – Институт земной коры СО РАН

E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

Приведены предварительные результаты интерферометрической обработки данных радаров ENVISAT Европейского космического агентства и PALSAR Японского космического агентства, полученных в ходе съемки опасного оползневого участка железной дороги вблизи станции Казанкан. Проведено сравнение возможностей применения данных этих радаров, доступных из архива ранее проведенных съемок. Показано, что данные радара PALSAR L-диапазона, получаемые с восходящего витка орбиты, предпочтительны для выявления оползневой активности на данном тестовом участке по многим параметрам. В ходе анализа обнаружены участки смещения отражающей поверхности на интервале времени два года

Радиолокационная космическая интерферометрия (РКИ) является одним из сравнительно новых привлекательных методов измерения рельефа подстилающей поверхности. Съемка с повторяющихся орбит носителя даёт возможность обнаружения и измерения методом дифференциальной интерферометрии мелкомасштабных смещений отражающей поверхности за время между съемками. Метод успешно применялся обнаружения смещений почв из-за оползневых и карстовых процессов, хозяйственной деятельности типа откачки подземных вод, подземных горных разработок, а также вследствие сейсмической активности, была продемонстрирована возможность измерения подвижек субсантиметрового масштаба.

Результаты обработки радиолокационных измерений методами РКИ с целью выявления динамики подстилающей поверхности существенно зависят от множества факторов. Среди них параметры используемой радиолокационной аппаратуры, специфика подстилающей поверхности, особенности организации наземного сопровождения измерений и графика проведения измерений, а также метеоусловия в зоне съемки.

Временная декорреляция отраженных сигналов, приводящая к зашумлению измерений разности фаз на интерферограмме, является главным фактором, ограничивающим применимость этого метода. Временная декорреляция существенно зависит от интервала между съемками, типа отражающей поверхности и в разной степени проявляется на разных длинах волн зондирующего сигнала.

В данной работе была сделана попытка применения метода РКИ для мониторинга состояния оползневой зоны на Северомуйском участке Байкало-Амурской железной дороги, вблизи станции Казанкан. Объект нашего исследования располагается в северо-восточной части Байкальской рифтовой системы (БРС) в пределах Верхнеангарско-Муйской междувпадинной перемычки. Большое количество разломов генерального, регионального и локального масштабов определяют высокий уровень раздробленности земной коры района. Современная активность разломных процессов района подтверждается высокой сейсмической активностью. Нивелирование, проведенное на Северо-Муйском геодинамическом полигоне в 1986–1990 гг., показало значительные смещения геодезических пунктов достигающих 20 мм/г [1].

Основным материалом для изучения динамики подстилающей поверхности является радиолокационная интерферограмма. При выявлении подвижек подстилающей поверхности на интерферограмме необходимо учитывать, что разность фаз сигналов состоит из нескольких компонент:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{L} \cdot h - 2k\Delta r + 2ks_i + \Delta\varphi_0, \quad (1)$$

где h — относительная высота рельефа в интересующей нас точке относительно некоторой опорной, L — период неоднозначности по высоте, Δr — радиальное смещение (смещение по линии визирования) точки поверхности за время между съемками относительно радара, k — волновое число, $\Delta\varphi_0$ — неизвестная начальная разность фаз, s_i — тропосферная флуктуация длины пути сигнала.

Величина радиального смещения Δr может быть извлечена из измерений разности фаз $\Delta\varphi$ после компенсации влияния рельефа, учета тропосферных эффектов и устранения неизвестной начальной разности фаз $\Delta\varphi_0$.

Тропосферными эффектами (флуктуациями разности фаз из-за флуктуаций коэффициента преломления в тропосфере по трассе сигнала) можно пренебречь в случае малооблачной погоды без осадков. Неизвестная начальная фаза $\Delta\varphi_0$ может быть оценена по сигналам заведомо стабильной яркой цели, или по стабильной естественной протяженной цели с низким уровнем временной декорреляции. Влияние рельефа можно уменьшить при условии малой пространственной интерферометрической базы, либо используя данные о рельефе в виде цифровой модели.

Нами использованы радиолокационные данные различных космических аппаратов, применялись различные методики интерферометрической обработки, подбирались различные сценарии съемки.

Так как оползневый процесс на тестовом Казанканском участке имеет довольно долгую историю, было решено ориентироваться на архивные данные радиолокационных наблюдений зарубежных РСА сравнительно высокого разрешения. Для целей исследования нами было выбрано и заказано для обработки 9 интерферометрических пар радара ALOS/PALSAR (радар L-диапазона), сделанных на восходящих орбитах и 13 пар радара ENVISAT (радар С-диапазона), сделанных на нисходящих орбитах. При подборе данных предпочтение делалось парам снимков с малыми пространственными базами, что снижает влияние рельефа на интерферограммах. Кроме того, с целью устранения влияния рельефа, некоторые пары снимков, полученных с малым временным интервалом, использовались для построения цифровых моделей рельефа. При составлении интерферометрических пар с большим интервалом времени между съемками с целью выявления динамики поверхности выбирались снимки, сделанные в одно и то же время года, что позволило снизить влияние временной/сезонной декорреляции.

Анализ геометрии съемки данного оползневого участка на восходящих и нисходящих орбитах с учетом потенциального направления движения оползня и уклона рельефа местности показал, что взаимное положение линии визирования и вектора смещения поверхности может быть критичным для получения результата. Поскольку радиолокатор чувствителен к радиальной составляющей перемещения поверхности, правильно интерпретировать измерения радиального смещения при съемке поверхности с одного направления можно лишь, зная истинное направление смещения. Рассмотрим случай вертикального смещения точки A отражающей поверхности (см. рис. 1 ниже).

Пусть точки радиолокационной съемки в первый и второй моменты съемки совпадают и находятся в точке S . При смещении точки A подстилающей поверхности на величину h по вертикали за время между моментами 1 и 2 наблюдений наклонная дальность R_1 до этой точки становится равной R_2 . Изменение наклонной дальности $R_2 - R_1$ до этой точки можно достаточно точно связать с её вертикальным перемещением h формулой

$$\Delta r = R_2 - R_1 = -h \cos \theta, \quad (2)$$

где θ — угол падения волны сигнала, равный в данной геометрии съемки углу обзора.

Если же точка A перемещается на расстояние g по горизонтали в сторону аппарата S , то изменение наклонной дальности $R_2 - R_1$ до этой точки можно связать с её горизонтальным перемещением g по формуле

$$\Delta r = R_2 - R_1 = -g \sin \theta \quad (3)$$

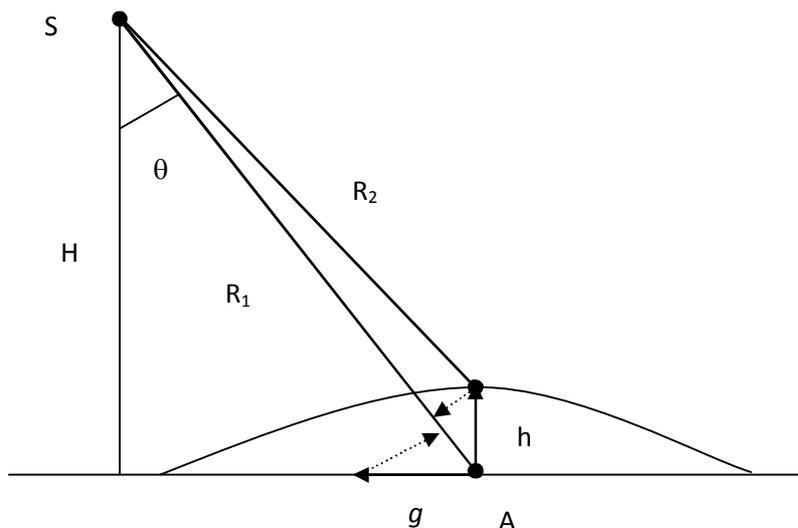


Рис. 1. Вычисление проекции перемещения подстилающей поверхности на радиальное направление.

Для получения более общего выражения для произвольного линейного движения охарактеризуем вектор перемещения следующими параметрами: s — модуль перемещения, u — угол места, или угол уклона (отрицательное значение соответствует движению вниз), a — азимут перемещения ($a = 0$ при движении в направлении полета спутника; положительные значения угла a отсчитываются против часовой стрелки), определенными на рис. 2 ниже:

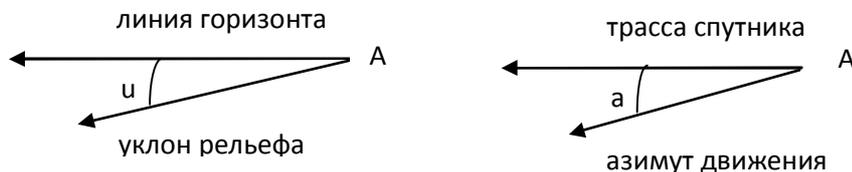


Рис. 2. Определение угла места, или уклона рельефа поверхности оползневого участка (на рисунке слева — вид сбоку), и азимута перемещения оползня относительно трассы спутника (на рисунке справа — вид сверху).

Тогда при падении радиоволн на поверхность под углом θ

$$\Delta r = R_2 - R_1 = -Ks, \tag{4}$$

где

$$K = (\cos u \sin a \sin \theta + \sin u \cos \theta). \tag{5}$$

В результате проведенной обработки выяснилось, что данные ENVISAT, полученные на нисходящем витке орбиты (именно такие данные доступны из базы имеющихся данных этого радара) практически невозможно использовать для изучения динамики данного оползневого участка. Из-за невыгодной геометрии съемки ENVISAT, при которой движение оползня направлено перпендикулярно линии визирования, проекция подвижек поверхности на радиальное направление очень мала и практически не проявляется на интерферограмме. Коэффициент K в (4), вычисляемый по (5) исходя из азимута $a=60^\circ$, угла скольжения $u = -18^\circ$ и угла падения радиоволны радара ENVISAT $\theta = 23^\circ$, равен -0.037 . Это означает, что, например,

смещение оползня по склону на 10 см составит в радиальном направлении всего -0.37 см, что сложно обнаружимо. Недостаточно высокое разрешение по поверхности этого радара при сравнительно малой площади оползня (приблизительно 300 м × 300 м) также мешает идентификации местоположения оползня и проведению измерений. Кроме того, чрезмерно высокий уровень временной декорреляции отраженных сигналов в С-диапазоне для данного типа местности приводит к практически полному зашумлению разности фаз.

В то же время, при съемке с восходящего витка ALOS/PALSAR, геометрия съемки оказалась существенно более предпочтительной, так как в этом случае смещение оползня направлено практически вдоль линии визирования, что улучшает возможность его выявления на интерферограмме. Для съемки радаром PALSAR с восходящего витка (именно такие съемки доступны из архива проведенных съемок для анализа) коэффициент K , вычисляемый исходя из азимута $\alpha = 240^\circ$, угла скольжения $\mu = -18^\circ$ и угла падения радиоволны радара PALSAR $\theta = 36^\circ$, равен 0.73. Это означает, что, например, смещение оползня по склону на 10 см составит в радиальном направлении всего 7.3 см, что близко к половине длины волны сигнала и может быть легко обнаружено на интерферограмме. Кроме того, данные L-диапазона обладают заметно большей устойчивостью к временной декорреляции: нами получены довольно качественные измерения разности фаз при комбинировании снимков, полученных с интервалом в 2 года, а также снимков, снятых в разные сезоны года.

На рис. 3 приведён пример амплитудного изображения ALOS/PALSAR, снятого 17.01.2009, и развернутая интерферограмма, сформированная в ходе обработки пары снимков PALSAR от 17.01.2009 и 12.01.2007. Несмотря на зимнее время съемки и разницу между съемками в два года, отраженные сигналы имеют хорошую когерентность, что позволило получить обнадеживающие по чувствительности измерения подвижек. Места положений деформаций, наблюдаемых на интерферограммах, точно совпадают с расположением мостов, где по данным исследователей [2] обнаружены значительные подвижки. Наибольшие изменения дальности наблюдаются у среднего моста (см. рис. 3). Для данного способа комбинирования данных, при вычитании фазы сигнала более ранней съемки из более поздней, видимое смещение подстилающей поверхности вниз относительно точки наблюдения, приводит к уменьшению разности фаз. Два участка потемнения, свидетельствующие об опускании отражающей поверхности, находятся ниже железнодорожного полотна. Выше железнодорожных путей наблюдаются участки с разными по знаку смещениями разности фаз относительно среднего, что отражает, по-видимому, разнонаправленность векторов смещения.

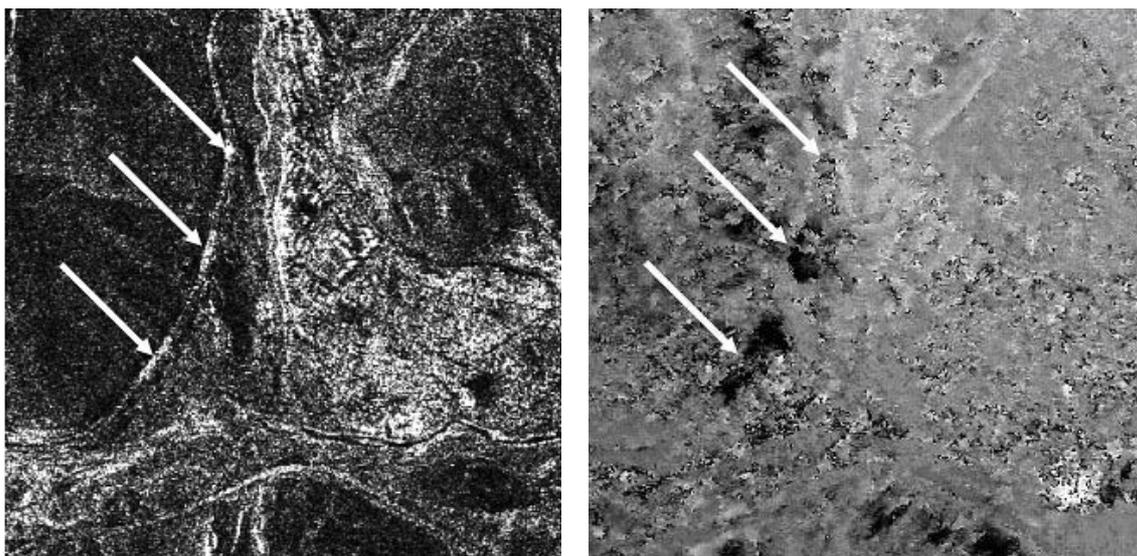


Рис. 3. Амплитудное изображение радара PALSAR (слева) и интерферограмма (справа). Стрелками указаны участки смещения почв в области оползней.

Развитие Казанканского оползня происходит с отрицательным знаком смещения в области цирка и положительным во фронтальной части, кроме того, вектор смещения разворачивается, происходит своеобразное выдавливание по цилиндрической плоскости скольжения [3]. В дальнейшем мы планируем более детально промоделировать оползневой процесс с разделением смещений во времени, анализом векторов смещений и геологических данных.

Оползневые процессы в районе ст. Казанкан только начинают свое развитие. В будущем возможно усиление процессов и зарождение новых оползневых цирков. Близость развития этих процессов к Северомуйскому тоннелю БАМ усугубляет риск катастроф.

Полученные предварительные результаты показывают, что применение метода РСА-интерферометрии имеет большой потенциал как для изучения уже произошедших событий, так и для мониторинга развивающихся процессов.

Авторы признательны европейскому космическому агентству (ESA) за радарные изображения ENVISAT полученные по проекту Cat-1 6320 и японскому аэрокосмическому агентству JAXA за радарные изображения ALOS/PALSAR, предоставленные для данного 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. 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.
3. Козырева Е.А., Тржцинский Ю.Б., Труфанов А.В., Федоренко Е.В. Катастрофическая активизация оползней – результат техногенных воздействий на геологическую среду. // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. – 2006. –Вып. 5. С. 138-149.