

4. ПРИМЕНЕНИЕ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ЗОНАХ С ОПАСНОЙ ДИНАМИКОЙ ПОКРОВОВ

А.И.Захаров¹, Л.Н.Захарова¹

¹ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

М.А.Лебедева²

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Методы радиолокационной интерферометрии имеют большой потенциал для выявления подвижек подстилающих покровов, опасных для транспортной инфраструктуры и трубопроводного транспорта, однако существует масса факторов, препятствующих получению ожидаемого результата. Среди наиболее значимых негативных факторов – временная декорреляция отраженных сигналов. Правильный выбор методов проведения интерферометрических измерений и способов обработки полученной информации является определяющим для достижения искомого результата. В статье рассматриваются различные сценарии проведения интерферометрических измерений с целью выявления опасной динамики подстилающей поверхности в зоне нахождения транспортной инфраструктуры – в зависимости от параметров используемого РСА, сезонных условий проведения измерений, метеоусловий и наличия растительности в зоне съемки. Приведены результаты выявления опасной динамики подстилающей поверхности для различных географических регионов России.

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

Характер отражения сигнала поверхностью во многом определяется длиной волны сигнала, поскольку зависит от соотношения длины волны и среднего размера

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

мелкомасштабных неровностей поверхности. При зондировании растительных покровов и почв под растительностью длина волны определяет характер взаимодействия радиоволны с элементами архитектуры растения, глубину проникновения волны в растительный слой.

Характер подстилающей поверхности оказывает решающее влияние качество интерферограммы через степень временной декорреляции отражений, на методику проведения интерферометрических измерений. Развитая растительность в зоне съемки, во-первых, может экранировать подстилающую поверхность и маскировать динамику оползней или проседаний почвы. Во-вторых, изменения структуры верхней кромки растительности из-за вегетационных процессов, ветровое волнение растительности, приводят к декорреляции изображений и потере сигнала на интерферограммах. Перечисленные эффекты по-разному проявляются на разных длинах волн.

Выбор времени и длительности проведения измерений, несомненно, определяется моментом активности наблюдаемых процессов на подстилающей поверхности. Однако с точки зрения снижения временной декорреляции предпочтительно избегать наблюдений подстилающей поверхности с развитым растительным покровом в период вегетации. Известно, что нежелательно комбинировать измерения, проведенные в различные сезоны года, особенно зимние и летние снимки. Метеорологические явления типа осадков или процессы замерзания-оттаивания почв крайне негативно сказываются на когерентности отраженных сигналов. В то же время, использование длинноволновых радиолокаторов позволяет снизить чувствительность измерений к указанным негативным факторам.

Особенностью интерферометрической схемы измерений динамики поверхности является требование совместной обработки сеансов, полученных с близких в пространстве траекторий носителя, или орбит. Перпендикулярная компонента интерферометрической базы (расстояния между точками съемки) влияет на пространственную декорреляцию эхо-сигналов, а также определяет чувствительность разности фаз к рельефу. Чем больше перпендикулярная компонента базы, тем больше пространственная декорреляция. Кроме того, в этом случае чувствительность разности фаз к рельефу возрастает, что нежелательно в схеме дифференциальной интерферометрии, когда точность знания рельефа подстилающей поверхности невысока.

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

Расстояние между повторяющимися орбитами, или пространственная база (а точнее, перпендикулярная составляющая базы), определяет степень пространственной декорреляции сигналов интерферометрической пары, а также чувствительность разности фаз сигналов на интерферограмме к рельефу поверхности.

Влияние негативных эффектов типа временной декорреляции может быть снижено при использовании современных методик организации интерферометрических наблюдений. Использование метода естественных постоянных отражателей дает возможность наблюдать стабильные точечные цели и получить устойчивые измерения разности фаз отраженных сигналов даже в случае очень сильной временной декорреляции в пределах снимка. Наиболее эффективен этот метод при наблюдении урбанизированных территорий, где множество элементов инфраструктуры служит естественными постоянными отражателями. Недостатком этого метода является необходимость работы с большим набором разновременных изображений с тем, чтобы методами статистического анализа выявить набор естественных отражателей.

Если же плотность расположения естественных постоянных отражателей низка, или они отсутствуют, то можно воспользоваться искусственными точечными отражателями типа уголковых отражателей. Искусственные цели имеют преимущество в том, что их расположение на изображении заранее известно, можно заранее оценить уровень отраженного сигнала и предсказать точность измерения подвижек этих целей вместе с покровом, на котором они установлены. Не требуется проводить большую серию измерений. Оценка динамики подстилающей поверхности в месте расположения искусственного отражателя может быть сделана даже по одной паре снимков (при наличии достаточно точной цифровой модели рельефа). Недостатком искусственных отражателей может быть высокая стоимость их изготовления.

Общим недостатком метода постоянных отражателей является «точечность» получаемых измерений динамики, то есть получаемый измерения подвижек относятся только к элементу изображения, в котором находится точечная цель.

Стоит отметить также разную роль длины волны сигнала на эффективность использования естественных и искусственных постоянных отражателей. Как показывает мировой опыт, при работе на более длинных волнах выявляется большее количество естественных постоянных отражателей, чем на более коротких. При

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

использовании искусственных отражателей предпочтительно работать на более коротких волнах, так как ЭПР этих целей уменьшается в квадратичной зависимости от длины волны.

При анализе точности интерферометрических измерений динамики подстилающих покровов необходимо помнить, что подходы к оценке точности существенно зависят от методики проводимых измерений. Использование постоянных отражателей предполагает анализ сигналов ярких точечных целей, как правило, искусственного происхождения. Работа по естественным покровам позволяет получать площадные измерения динамики подстилающей поверхности.

Точность измерения подвижек поверхности σ_r в радиальном направлении (в направлении к радару) зависит от уровня фазовых шумов на интерферограмме σ_ϕ

следующим образом: $\sigma_r = \frac{\lambda \sigma_\phi}{4\pi}$. Уровень фазовых шумов при работе с яркими точечными целями равен

$$\sigma_\phi = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{SNR}}, \quad (1)$$

где SNR – отношение сигнал-шум, которое можно выразить через отношение эффективную площадь поверхности (ЭПР) точечной цели и ЭПР подстилающей поверхности в пределах элемента изображения, содержащего точечную цель.

При работе по протяженным естественным покровам оценки фазовых шумов и, как следствие, оценки точности измерения смещений более сложны. Краеугольным понятием в данном случае является когерентность отраженных сигналов, описывающая ранее упомянутую степень их декорреляции γ , которая определяется несколькими ранее уже упомянутыми факторами: $\gamma = \gamma_N * \gamma_{sp} * \gamma_{temp} * \gamma_{proc} * \gamma_{dop}$, а именно, декорреляции из-за тепловых шумов радиолокационной системы, пространственной декорреляции, временной декорреляции, декорреляции из-за неточностей процесса обработки и несовпадения доплеровских центроидов отраженных сигналов.

Нормированный коэффициент корреляции или когерентность двух комплексных сигналов S_1 и S_2 определяется как

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

$$\gamma = \frac{E S_1^* S_2^*}{\sqrt{E |S_1|^2 * E |S_2|^2}}, \quad (2)$$

распределение разности фаз (интерферометрической разности фаз) которого $\phi = \arg S_1^* S_2^*$, в зависимости от различных значения когерентности γ , описывается следующей формулой

$$P(\phi, \gamma) = \frac{1 - \gamma^2}{2\pi} * \left(\frac{1}{1 - \gamma^2 \cos^2 \phi} + \gamma \cos \phi * \frac{\frac{\pi}{2} + \arcsin \gamma \cos \phi}{1 - \gamma^2 \cos^2 \phi^{1.5}} \right). \quad (3)$$

Соответственно, дисперсия разности фаз σ_ϕ^2 может быть вычислена по формуле

$$\sigma_\phi^2(\gamma) = \int_{-\pi}^{\pi} \phi^2 P(\phi, \gamma) d\phi. \quad (4)$$

Пример зависимости среднеквадратичного отклонения σ_ϕ от степени когерентности приведен на рисунке ниже.

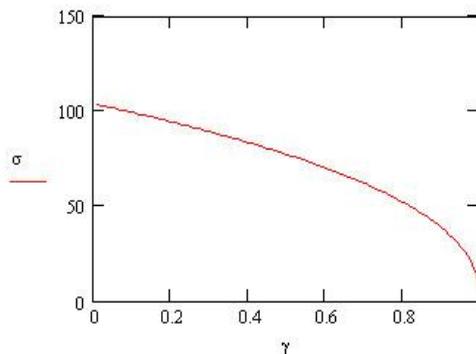


Рис.1. Зависимости среднеквадратичного отклонения σ_ϕ , град, от степени когерентности.

Несмотря на достаточно большой уровень ошибки при типовых значениях когерентности 0.4-0.6, характерных для естественных протяженных покровов, точность измерений может быть повышена за счет пространственного усреднения отсчетов интерферограммы по N отсчетов, вследствие чего фазовые ошибки могут

быть снижены примерно в \sqrt{N} раз и тем самым получены довольно высокие точности интерферометрических измерений за счет снижения пространственного разрешения.

В докладе рассматриваются примеры применения данных радара коротковолнового диапазона (X-диапазона) TERRASAR-X для наблюдения динамики оползневых и карстовых процессов в Нижегородской области, на Кубани и Черноморском побережье Кавказа. Для этих исследований характерно широкое использование наборов уголкового отражателей (из-за тотальной временной декорреляции отраженных сигналов естественных покровов), перемещения которых позволили контролировать нежелательные процессы подстилающей поверхности. Оцененная нами по формуле (1) точность измерения подвижек уголкового отражателя на оползневом склоне в месте прохождения магистрального газопровода вблизи селения Детляшко соответствовала теоретической точности и составила 1 мм при максимальных зарегистрированных подвижках 2-3 мм на 33- дневном интервале наблюдений.

Другой пример интерферометрических измерений подвижек трубопроводов основан на обработке данных радаров ERS-1/2, когда в тандемной съемке на интервале в один день было выявлено проседание ниток газопровода Ямбург-Ныда из-за таяния мерзлого грунта под трубами в июне 1996 года:

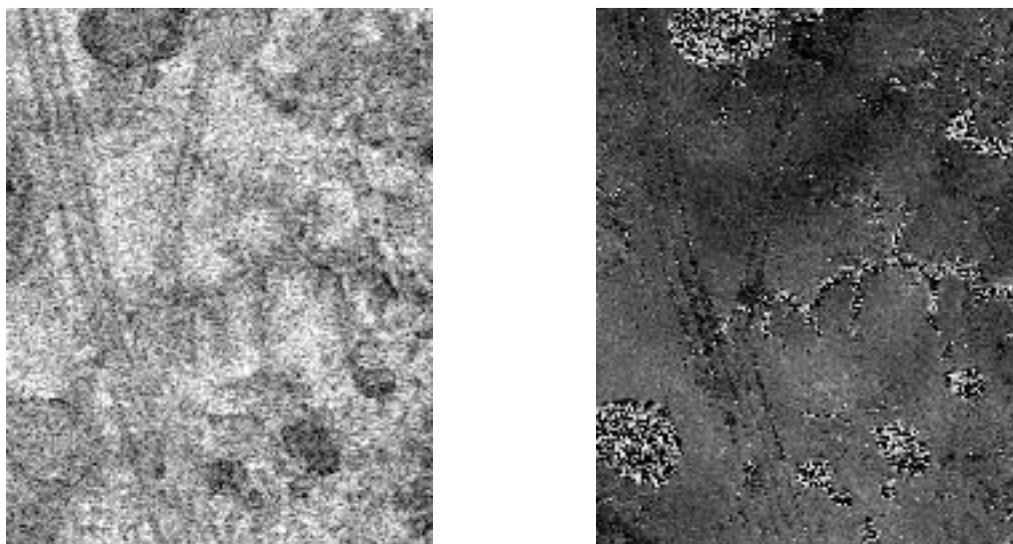


Рис. 2 Амплитудное изображение (слева) и интерферограмма (справа) газопровода для сеансов, снятых в тандемной схеме радарми ERS-1 и ERS-2 в июне 1996 года.

Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой

На аналогичной тандемной паре, снятой в январе 1996 года, подобная динамика отсутствует, что является следствием промерзания почв в зоне съемки и стабилизации подстилающей поверхности.

Завершающий пример возможностей интерферометрии для измерения динамики подстилающих покровов методами радиолокационной интерферометрии основан на использовании данных длинноволнового японского радара PALSAR L-диапазона.

На рис. 3 приведён пример амплитудного изображения ALOS/PALSAR и интерферограмма для пары снимков от 17.01.2009 и 12.01.2007. Несмотря на значительный временной интервал, отраженные сигналы имеют хорошую когерентность, что позволило получить обнадеживающие по чувствительности измерения подвижек. Довольно большие по площади подвижки поверхности позволяют проводить пространственное усреднение и за счет снижения пространственного разрешения получать высокие точности измерений даже при сравнительно низкой когерентности отраженных сигналов. Места положений деформаций, наблюдаемых на интерферограммах, точно совпадают с расположением мостов, где по данным наземных наблюдений обнаружены значительные подвижки.

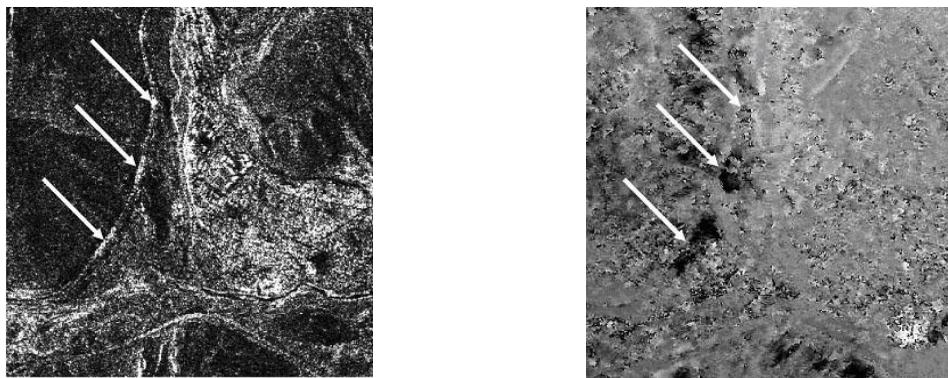


Рис. 3. Амплитудное изображение радара PALSAR (слева) и интерферограмма (справа). Стрелками указаны участки смещения почв в области оползней.

Итак, методы радиолокационной интерферометрии имеют большой потенциал для выявления подвижек подстилающих покровов, опасных для транспортной инфраструктуры и трубопроводного транспорта, причем правильный выбор методов проведения измерений и способов обработки является определяющим.