

Исследование динамики волжских берегов в районе Ульяновска методом радиолокационной интерферометрии

Л.Н. Захарова, А.И. Захаров

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190 Московская обл., г.Фрязино, пл. Введенского, 36
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

В работе обсуждается применимость методики дифференциальной интерферометрии к данным ERS-1/2, ENVISAT и PALSAR для анализа подвижек почвы в районе города Ульяновска. Проведён анализ параметров съёмки, оказывающих влияние на результат. Выявлены территории, подверженные динамике. Продемонстрирована пригодность данных как С-, так и L-диапазона для изучения динамики поверхности по городским территориям. Показано преимущество сенсора L-диапазона для анализа подвижек почвы.

Ключевые слова: РСА, дифференциальная интерферометрия, оседание поверхности.

Введение

Радиолокационная интерферометрия — один из эффективных современных инструментов для дистанционного измерения подвижек земной поверхности [1]. При соблюдении требований к условиям съёмки и знании о характере подвижек точность измерения достигает долей рабочей длины волны радиолокатора [2].

В настоящей работе возможности радиолокационной дифференциальной интерферометрии по данным нескольких радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования применены к изучению динамики земной поверхности в черте города Ульяновска. Правый берег Волги в Ульяновске ежегодно страдает от сотен микро- и макро-оползней, что нередко наносит вред частным хозяйствам и ставит под угрозу городские коммуникации, промышленные и жилые районы, примыкающие к оползнеопасным районам. Медленнотекущее опускание земной поверхности на глинистых почвах, вызывает напряжения в толще верхнего слоя, которое при определённом пороговом значении приводит к оползневым явлениям.

Выявление районов действующего оседания почвы, потенциально опасных катастрофическими явлениями, сравнение влияния параметров съёмки на результат — две основные цели предлагаемой вниманию работы.

Метод измерения

Измерение подвижек почвы методом радарной интерферометрии может быть реализовано при использовании двухпроходной схемы съёмки земной поверхности (с повторяющихся орбит). В случае смещения участка поверхности за время, прошедшее между двумя проходами космического аппарата, изменяется разность расстояний от инструмента до поверхности по сравнению с соседними несмещёнными участками, что сказывается на разности фаз двух изображений. Интерферограмма (двумерное изображение, в котором каждый элемент содержит разность фаз рассеянного сигнала для первого и второго прохода космического аппарата), вычисляемая по формуле

$$\varphi = \text{Arg}\langle z_1 z_2^* \rangle, \quad (1)$$

(где φ — разность фаз, z_1, z_2 — величина полученного сигнала для первого и второго прохода), показывает изменение разности фаз от одного элемента изображения к другому, которое можно преобразовать в величину относительного сдвига поверхности по формуле

$$\Delta r = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi, \quad (2)$$

где Δr — величина сдвига поверхности в направлении обзора, $\Delta\varphi$ — изменение разности фаз, λ — длина волны.

Вообще говоря, разность фаз, полученная по формуле (1), содержит, помимо фазы, причиной которой был сдвиг поверхности, и другие составляющие, в которых проявляется зависимость фазы от наклонной дальности и от рельефа, от ошибок в баллистических данных, и, наконец, шумовую компоненту. Всё это было учтено при обработке.

Таким образом, изменение разности фаз на 2π соответствует сдвигу поверхности на расстояние, равное половине длины волны. Для использованных в работе данных PCA C-диапазона на борту ERS-1,2 и ENVISAT это расстояние составляет около 2.8 см, для PCA L-диапазона (PALSAR) — 11.8 см.

Для того чтобы эффект подвижек был замечен при анализе интерферограммы, необходимо, чтобы большие пласты поверхности, заметно превосходящие по размерам элемент изображения, смещались как единое целое, без нарушения микрорельефа (иначе говоря, чтобы не происходила декорреляция изображений — или происходила в слабой степени). Декорреляция изображений может стать непреодолимой помехой при интерферометрическом анализе данных и в случае неаккуратного совмещения изображений перед обработкой. Для достижения положительных результатов необходимо совмещение изображений с точностью до долей элемента изображения.

Степень декорреляции двух изображений обыкновенно обозначается словами «интерферометрическая когерентность» и вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{\left| \langle z_1 z_2^* \rangle \right|}{\left\langle z_1 z_1^* \right\rangle \left\langle z_2 z_2^* \right\rangle}, \quad (3)$$

где индексы 1 и 2 означают первое и второе изображение пары, угловые скобки — пространственное усреднение, а звёздочка — комплексное сопряжение. Нулевая интерферометрическая когерентность соответствует полной декорреляции изображений, единичная когерентность имеет место при идеальной корреляции.

Использованные данные

В работе были использованы данные, полученные четырьмя искусственными спутниками Земли с радиолокаторами на борту: ERS-1, ERS-2, ENVISAT, ALOS. Распределение дат съёмок по годам с 1992 по 2007 показано в табл.1. Тринадцать сцен ERS-1 и восемь сцен ERS-2 были сгруппированы в пары таким образом, чтобы перпендикулярная база интерферометра составляла не более 100 м с целью уменьшения влияния рельефа на результирующую разность фаз [3].

Таблица 1. Характеристики обработанных пар изображений.

Сенсор	Даты первой и последней съёмки	Миним. интервал между съёмками	Количество обработанных пар изображений	Частотный диапазон PCA	Примечания
ERS-1 SAR	30.05.1992 – 28.02.1996	35 дней	6	C	Плюс одна пара ERS-1/ERS-2 с интервалом 1 день
ERS-2 SAR	25.05.1995 – 05.10.1999	35 дней	13	C	
ENVISAT ASAR	30.10.2003 – 16.06.2005	35 дней	10	C	
ALOS PALSAR	05.08.2007 – 20.09.2007	46 дней	1	L	

Данные ENVISAT для тестового участка характеризуются расстоянием между трассами носителя, величины перпендикулярной базы составляют несколько сотен метров. Как следствие, сильно возросшая декорреляция практически не позволяет оценивать величину разности фаз.

Данные инструмента PALSAR, установленного на спутнике ALOS японского космического агентства JAXA, отличаются от предыдущих увеличенной длиной волны (L-диапазон), вследствие чего чувствительность к подвижкам теоретически уменьшается: один цикл изменения разности фаз от 0 до 2π соответствует четырёхкратно увеличенному сдвигу поверхности. Однако неоспоримым преимуществом более длинноволнового инструмента является лучшая когерентность изображений, и, как следствие, значительное увеличение площади участков достоверного измерения фазы, и меньшая чувствительность к изменениям структуры поверхности за промежутки времени, прошедший между съёмками.

Результаты обработки

Подробный анализ обработанных пар изображений ERS-1 и ERS-2 показывает несколько участков города, на которых интерферометрическая когерентность достаточно высока, чтобы разность фаз была информативной, и которые демонстрируют эффекты подвижек земной поверхности.

В качестве карты высот высокого разрешения была использована «тандемная» интерферограмма с разницей между съёмками 1 день, построенная по данным обоих сенсоров (первая сцена пары снята ERS-1, вторая — ERS-2). При таком маленьком интервале между съёмками эффект временной декорреляции весьма незначителен, и медленнотекущие процессы опускания поверхности (со скоростью нескольких сантиметров или миллиметров в год) также не оказывают влияния.

Гора Венец — исторический центр города — обрывом спускается к руслу Волги, и является одним из районов оползневой опасности. Три интерферограммы с разницей между съёмками около трёх и около четырёх лет показывают опускание почвы в этом районе величиной 9 и, соответственно, 12 мм, что позволяет оценить среднегодовую скорость оседания: около 3 мм в год. На 14 мм за два с половиной года осела поверхность земли вблизи склонов Соловьёва оврага, постоянно напоминающего о себе небольшими оползнями. В северной части города две интерферограммы с разницей почти 4 года также показали отрицательную динамику поверхности величиной около 8 мм.

В районе Засвияжье также было обнаружено несколько участков, измеренная величина проседания поверхности — около 6 мм в год. Несколько измерений, проведённых по интерферометрическим парам с интервалами между съёмками меньше года, также показали на интересующих участках небольшие, но заметные эффекты (доли миллиметра за два или три месяца).

Обработка данных ENVISAT привела к ожидаемому, но малоинформативному результату: величины базы интерферометра оказались слишком близки к критическому значению, при котором наступает полная декорреляция изображений. Несколько весьма малых по площади участков с неплохой интерферометрической когерентностью на некоторых из десяти полученных интерферограмм оказались в стороне от районов предполагаемого опускания поверхности.

Единственная обработанная пара данных ALOS PALSAR с разницей между съёмками 46 дней и малой базой интерферометра (около 50 м) продемонстрировала намного лучшую когерентность. Даже области, покрытые растительностью, обыкновенно показывающие отсутствие корреляции на данных C-диапазона при таком интервале времени, обладают неплохой когерентностью (около 0.5). В отличие от интерферограмм C-диапазона, где информативная часть карты разности фаз выглядит редкими островками в море полной декорреляции, интерферограмма PALSAR почти по всему полю изображения показывает достоверные данные, и лишь небольшие участки оказываются полностью декоррелированными по причине произошедших на поверхности изменений. Так, наиболее интересный для анализа склон горы Венец, круто спускающийся к Волге и покрытый древесной растительностью, на всех интерферограммах C-диапазона, кроме тандемной, очень сильно зашумлён и не оставляет надежды на возможность каких-либо измерений по причине крайне низкой когерентности. Здесь же, на интерферограмме L-диапазона, весь правый берег Волги показывает вполне устойчивую корреляцию, и разность фаз такова, что можно заключить о заметном понижении этой части города: до 1.2 см за 46

дней с 8 августа по 20 сентября 2007 года. Следует отметить, что конец лета и начало осени — довольно дождливый период в средневолжском климате, а увеличение количества осадков может провоцировать достаточно быстрые смещения, приводящие к катастрофическим подвижкам верхнего слоя — оползням, ежегодно случающимся в Ульяновске.

Итоги

Проведённая работа показала возможность использования данных дистанционного зондирования для изучения долговременной динамики подвижек почвы.

Анализ показал важность выбора ключевых параметров съёмки для получения результата: даты (время года) съёмки, интервал между ними, частотный диапазон, база интерферометра.

При достаточном количестве данных С-диапазона можно получать достоверные результаты о подвижках земной поверхности в миллиметровой шкале. Данные L-диапазона в 4 раза загрубляют измерения подвижек, но при этом демонстрируют качественно другой уровень корреляции изображений.

Все данные, по которым возможно проводить измерения подвижек, показывают наличие динамики почвы в черте города Ульяновска.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Европейскому Космическому Агентству (ESA) за предоставленные в рамках проекта С1Р-3394 данные ERS-1,2 и ENVISAT. Авторы весьма признательны Японскому Космическому Агентству (JAXA) в связи с возможностью работы с данными ALOS PALSAR.

Литература

1. *Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl C., Rabaut T.* The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry // *Nature*, 1993. Vol. 364. P. 138–142.
2. *Strozzi T., U. Wegmüller, C. Werner, and A. Wiesmann.* Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy // *Proceedings of IGARSS'2000*. Honolulu, Hawaii, USA.
3. *Zakharova L.* Interferometric study of Landslides Activity of Volga River Banks. // *Proc. 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2006)*, Dresden, Germany, May 16–18, 2006.

Study of Volga Riverbanks dynamics in Ulyanovsk city by means of SAR Interferometry

L.N. Zakharova, A.I. Zakharov

*Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, Fryazino department
Russia 141190 Moscow region, Fryazino, Vvedensky sq., 1
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

The applicability of differential SAR interferometry to ERS-1/2, ENVISAT, and PALSAR data for analysis of surface movements in the city of Ulyanovsk is discussed. Parameters of observation that influence on the result are examined. Some territories with surface dynamics are revealed. Both C- and L-band data are shown to be suitable for surface dynamics investigation for urban areas. L-band data demonstrated the preference for surface motion analysis.

Keywords: SAR, differential interferometry, surface subsidence.