

Ю.И. Кантемиров (Компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. После окончания университета работал младшим научным сотрудником лаборатории космической информации для целей газовой промышленности в ООО «Газпром ВНИИГАЗ». С 2010 г. работает в компании «Совзонд» ведущим специалистом отдела программного обеспечения.

Краткие теоретические основы радарной интерферометрии и ее многопроходных вариаций Ps и SBas

ВВЕДЕНИЕ

Радарная съемка выполняется в ультракоротковолновой (сверхвысокочастотной) области радиоволн, подразделяемой на X-, C-, L- и P-диапазоны (табл. 1). Съемка в каждом из вышеперечисленных диапазонов имеет свои плюсы и минусы. Для задач мониторинга смещений земной поверхности, зданий и сооружений по каждой конкретной территории подбираются данные в одном или нескольких из этих диапазонов исходя из типа рельефа, типа растительного покрытия, ожидаемых величин смещений и т.д.

Входными данными для обработки в специализированных программных комплексах являются интерферометрическая пара (либо цепочка) радарных снимков. Ограничением для возможности интерферометрической обработки пары (или цепочки) радарных снимков являются пространственная и временная базы [1].

Пространственная база (или базовая линия) представляет собой расстояние между орбитальными положениями радиолокатора при съемке изображений, составляющих интерферометрическую пару (рис. 1). Качество результатов интерферометрической обработки напрямую зависит от величины перпендикулярной составляющей базовой линии. С одной стороны, качество получаемой интерферометрической методом карты смещений земной поверхности возрастает с уменьшением длины перпендикулярной базовой линии. В случае базовой линии, равной нулю, интерферограмма, рассчитанная по такой

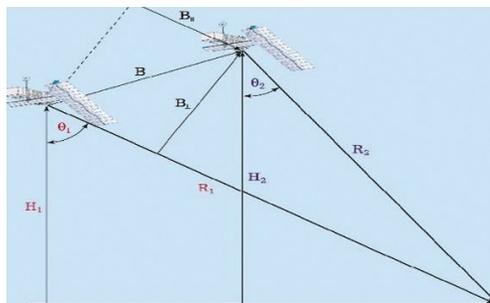


Рис. 1. Схема космической съемки интерферометрической пары радарных изображений

паре снимков, вообще содержит только фазу смещений. С другой стороны, при превышении некоторого критического значения базовой линии интерферометрическая обработка становится в принципе невозможной вследствие пространственной декорреляции.

Критическое значение перпендикулярной пространственной базы для каждой пары снимков может быть вычислено по следующей формуле:

$$B_{n,cr} = \frac{\lambda R \tan(\theta)}{2R_r},$$

где: $B_{n,cr}$ — критическая базовая линия; λ — длина зондирующей волны радиолокатора; R_r — пространственное разрешение в направлении наклонной дальности.

Остальные аргументы соответствуют обозначениям к рис. 1: H_1 и H_2 — высота орбиты радиолокатора;

Таблица 1

Диапазоны радиоволновой области электромагнитного спектра

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см	Спутниковые системы
X	5,20 – 10,90	2,75 – 5,77 (2,4 – 3,8)	USGS SLAR, TerraSAR-X/TanDEM-X, COSMO-SkyMed 1–4
C	3,9 – 6,2	3,8 – 7,6	ERS-1,2; ENVISAT-ASAR; RADARSAT-1,2
L	0,39 – 1,55	19,3 – 76,9 (15 – 30)	SIR-A,B, JERS, ALOS/PALSAR
P	0,225 – 0,391	40,0 – 76,9 (30 – 100)	AIRSAR

R_1 и R_2 – дальность (путь зондирующей волны); θ_1 и θ_2 – углы между дальностью и высотой; B_{\perp} и B_{\parallel} — перпендикулярная и параллельная составляющие базовой линии; B — результирующая базовая линия.

По этой формуле, критическая перпендикулярная базовая линия для используемых данных ENVISAT/ASAR Image Mode составляет порядка 900 — 1500 м, а для данных ALOS/PALSAR — 6500 м в режиме FBS и 13 000 м в режиме FBD (6500 м при перекрестной обработке режимов FBS и FBD). Оптимальная для расчета смещений перпендикулярная база в случае обоих вышеуказанных спутников колеблется в диапазоне от 0 до 30 % от критической базы.

Временной базой называют промежуток времени, прошедший между съемкой изображений, составляющих интерферометрическую пару. Понятие временной базы напрямую связано с такой важной проблемой, как временная декорреляция, возникающая за счет изменений рельефа, растительности, влажности, шероховатости и других свойств отражающей радарный луч поверхности, произошедших за период между съемками. Проблема временной декорреляции может быть решена увеличением длины зондирующей волны (что повышает «просвечивающую» способность радиоволн) либо сокращением временной базы (т. е. промежутка между съемками).

В ходе мониторинга смещений на месторождении Тенгиз был применен вышеуказанный подход интерферометрической обработки пар снимков, отобранных из всех возможных пар по принципу наименьших

базовых линий. При этом результат обработки в итоге был представлен в виде карт смещений за периоды между первой съемкой и поочередно каждой из последующих съемок. То есть результат показывает развитие смещений во времени, а также итоговую карту смещений за весь период наблюдений.

Помимо пространственной и временной баз, важным параметром, определяющим возможность или невозможность интерферометрической обработки, является разность положений Доплеровского центра вращения Земли для снимков пары. Все обработанные пары характеризуются низкими либо нормальными значениями этого параметра, что положительно сказалось на обработке.

Если значения пространственной и временной баз, а также разницы положений Доплеровского центра позволяют выполнить интерферометрическую обработку, то становится возможным рассчитать интерферограмму.

Каждый радарный снимок интерферометрической пары содержит в себе амплитудный и фазовый слой. Амплитудный слой более пригоден для визуального анализа. Результирующая фаза Φ , полученная в ходе интерферометрической обработки фазовых слоев снимков интерферометрической пары, в общем случае состоит из следующих компонентов:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_{\text{n}}$$

где: Φ_{topo} – фазовый набег за счет обзора топографии под двумя разными углами;

Φ_{def} – фазовый набег за счет смещения отражающей

поверхности в период между съемками;

Φ_{atm} – фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала;

Φ_n – вариации фазы в результате электромагнитного шума.

Непосредственно интерферометрическая обработка пары снимков в общем случае состоит из нескольких базовых шагов:

1. Совмещение основного и вспомогательного радарных изображений интерферометрической пары (в автоматическом режиме либо с ручным вводом контрольных точек).
2. Генерация интерферограммы, являющейся результатом комплексного поэлементного перемножения основного изображения и вспомогательного изображения, геометрически совмещенного с основным.
3. Разделение компонентов фазы Φ_{def} и $\Phi_{топо}$ за счет синтеза фазы рельефа с помощью имеющейся цифровой модели рельефа (ЦМР) или цифровой модели местности (ЦММ), либо модели эллипсоида, либо путем задания средней по площади снимка высотной отметки (для равнинных областей) с получением на выходе дифференциальной интерферограммы, на которой один полный спектр цветов (интерференционный цикл) соответствует смещению земной поверхности, равным половине длины волны радиолокатора.
4. Фильтрация интерферограммы, позволяющая в определенной степени уменьшить фазовый шум (помехи) за счет закругления выходной карты смещений земной поверхности.
5. Получение файла когерентности для области перекрытия двух снимков, составляющих интерферометрическую пару, в значениях от 0 до 1 для каждой пары соответствующих друг другу пикселей.
6. Развертка фазы (процедура перехода от относительных значений фазы к абсолютным) и устранение разрывов фазы.
7. Коррекция значения базовой линии по наземным контрольным точкам.
8. Преобразование абсолютных значений фазы в смещения земной поверхности в миллиметрах.

Полная цепочка интерферометрической обработки, а также многие другие дополнительные функции

реализованы в использованном авторами программном комплексе SARscape (разработчик SARMAP, Швейцария), являющемся дополнительным модулем программы ENVI (Exelis VIS, США).

Для анализа не пар, а многопроходных цепочек интерферометрических радарных снимков в SARscape реализованы модификации радарной интерферометрии: технологии интерферометрии постоянных рассеивателей (Persistent Scatterers) и интерферометрии малых базовых линий (SBAs).

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПОСТОЯННЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ РАДАРНОГО СИГНАЛА (PS)

Этот вариант радарной интерферометрии характеризуется максимально возможной точностью оценки смещений (2–4 мм по высоте). Входными данными для обработки должны являться не менее 30 снимков одной и той же территории за разные даты, сделанных в одной и той же геометрии съемки спутникового радиолокатора [2–4].

Программой автоматически выбирается основное изображение, на которое автоматически с точностью до 1/100 пикселя корегистрируются остальные снимки интерферометрической цепочки. Далее программа строит так называемые интерферограммы (комплексно поэлементно перемноженные фазовые слои радарных снимков) по каждой паре снимков. Затем для каждой пары оцениваются величины когерентности (меры корреляции фаз радарных снимков). Также для каждой пары строятся карты величин стандартных отклонений амплитуд снимков.

Затем программой определяются точки — постоянные (или устойчивые) рассеиватели радарного сигнала. Для выбора точек используется несколько порогов (порог корреляции амплитуд, порог когерентности, порог пространственного и временного отклонений величин смещений первой итерации и т. д.). После того как постоянные рассеиватели определены, для них выполняется процедура оценки фазовых разностей и мультивременной развертки фазы для точечных целей. Именно в разности фаз каждого снимка «зашията» величина смещений за период между съемками этих снимков.

Таким образом, для каждой из выбранных точек восстанавливается хронология изменения фазы во

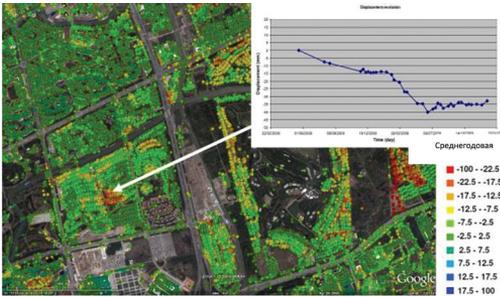


Рис. 2. Пример отображения результатов мониторинга смещений сооружений в условиях застроенной территории по методу постоянных рассеивателей

времени, которая затем математически пересчитывается в смещения в миллиметрах. Дополнительно в процессе обработки применяется специальный фильтр, удаляющий возможное влияние атмосферы на интерферометрическую фазу.

Результатом обработки является векторный файл точек, в атрибутах которых записаны:

- смещения на каждую дату съемки;
- среднегодовая скорость смещений;
- суммарная величина смещений;
- когерентность;
- высота над эллипсоидом WGS-84.

Пример результата обработки по технологии PS приведен на рис. 2. Основным недостатком данной технологии является ее применимость только для застроенных территорий, а также для отдельных зданий и сооружений при съемке в высоком разрешении.

По результатам 30-проходной съемки выявлены постоянные рассеиватели радарного сигнала, для каждого из которых известны смещения на каждую дату съемки и среднегодовая скорость смещений. Точки покрашены по атрибуту «среднегодовая скорость смещений» (зеленые – стабильные, желтые – оседания, красные — интенсивные оседания). График смещений за период 30 съемок для одной из точек — в правом верхнем углу рис. 2.

ПЕРЕКРЕСТНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ МАЛЫХ БАЗОВЫХ ЛИНИЙ (SBAS)

Интерферометрия малых базовых линий, в отличие от интерферометрии постоянных рассеивателей, является менее автоматизированным методом тре-

бующим большей квалификации исполнителя. В этом случае усиливается вклад статистики в финальный результат за счет перекрестной обработки очень большого количества интерферометрических пар при том же самом количестве снимков [5]. Для обработки по этому методу не обязательно наличие 30 снимков, обработка возможна и при меньшем их количестве.

Например, в случае 15-проходной цепочки общее возможное количество пар снимков достигает 105.

Из них по величине наименьшей пространственной базы выбираются, к примеру, 30–40 пар. Пары могут быть перекрестными (первый проход со вторым, второй с третьим, первый с третьим, второй с четвертым и т. п.). Обработка каждой пары ведется в полуавтоматическом режиме с выполнением нижеуказанных четырех шагов:

1. Автоматическая корегистрация, расчет интерферограммы, синтез фазы рельефа, вычитание фазы рельефа из интерферограммы, фильтрация дифференциальной интерферограммы, расчет когерентности, развертка фазы.
2. Набор точек с известными координатами и высотами для коррекции орбитальных параметров.
3. Расчет скорректированных дифференциальных интерферограмм и развернутых фаз.
4. Инверсия полученных перекрестных во времени развернутых фаз по методике SBAS с восстановлением последовательной во времени истории смещений.

При этом в итоге также восстанавливается хронология смещений от первого снимка цепочки до последнего (пример — на рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеприведенные данные можно обобщить следующим образом:

- по результатам интерферометрической обработки пар радарных снимков возможно получать карты смещений земной поверхности, однако в карте смещений, рассчитанной только лишь по одной паре снимков, могут присутствовать атмосферные артефакты, неточности орбитальных параметров, фазовый шум и т.д.;
- обработка многопроходных интерферометрических цепочек, в отличие от обработки отдельных пар снимков, позволяет исключить влияние атмо-

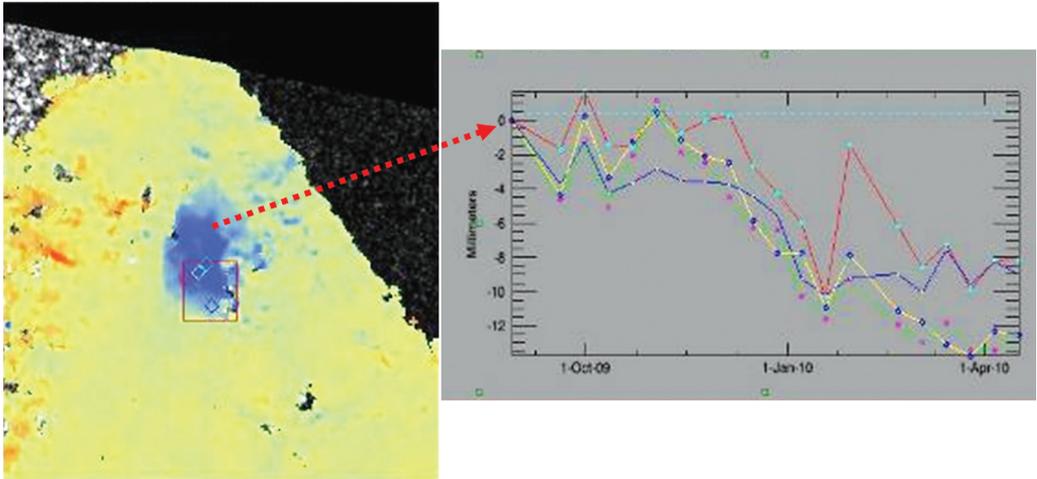


Рис. 3. Модель смещений (в цветовом кодировании) слева и история смещений для нескольких точек в центре локального участка оседаний синего цвета (справа), рассчитанные по методу SBas

сферы, значительно уменьшить орбитальную погрешность и вообще получить гораздо более статистически выверенный результат;

- среди методов интерферометрической обработки многопроходных цепочек наиболее известными являются методы PS и SBas (оба реализованы в программном комплексе SARscape);
- полностью автоматизированный метод PS позволяет добиться максимальных точностей замера смещений и деформаций зданий и сооружений (2–4 мм по высоте), а также позволяет изучать смещения и деформации в динамике, однако он применим в большей степени к застроенным территориям и требует в качестве исходных данных не менее 30 снимков;
- полуавтоматизированный метод SBas позволяет также изучать смещения и деформации, характеризуется чуть меньшей точностью, чем PS, и большими требованиями к пользователю, но зато он может работать не только по застроенным территориям, а также он не требует обязательных 30 снимков (метод будет работать и по 12–15 снимкам, однако для получения гарантированного результата все же надо стремиться к 30 проходам).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Richards: "A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing". *IEEE Aerospace and Electronic*, Vol. 22, No. 9, September 2007.
2. Ferretti, C. Prati and F. Rocca: "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry". *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 38, no. 5, Part 1, Sept. 2000, pp. 2202 – 2212.
3. Ferretti, C. Prati and F. Rocca: "Permanent scatterers in SAR interferometry". *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 1, Jan. 2001, pp. 8 – 20.
4. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes: "A new method for measuring deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent scatterers". *Geophysical Research Letters*, vol. 31, December 2004.
5. P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti: "A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry". *IEEE Aerospace and Electronic*, Vol. 40, No. 11, November 2002.