

INTERFEROMETRIA RADAR DALLO SPAZIO PER LO STUDIO DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI: 25 ANNI DI SVILUPPI ED OSSERVAZIONI

R. Lanari

Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Napoli, Italy

L'Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica (DInSAR) da satellite è una tecnica di telerilevamento che negli ultimi 25 anni ha conosciuto una continua evoluzione diventando uno "strumento" molto efficace per l'individuazione e l'analisi delle deformazioni del suolo e di edifici ed infrastrutture antropiche. In particolare, la tecnica DInSAR consente di investigare gli spostamenti relativi ad ampie aree della superficie terrestre attraverso la generazione di mappe di spostamento, dense spazialmente, con accuratezza centimetrica ed in alcuni casi anche sub-centimetrica [1, 2, 3, 4]. A questo scopo, viene sfruttata la differenza di fase (*interferogramma*) tra una coppia di immagini SAR acquisite in istanti diversi ma con una geometria di illuminazione molto simile e lungo due orbite sufficientemente vicine (la cui separazione viene tipicamente denominata *baseline*); inoltre, la componente di fase correlata con la topografia viene compensata (ottenendo il cosiddetto *interfeogramma differenziale*) tramite l'utilizzo di un Modello Digitale di Elevazione (DEM) esterno e delle informazioni relative alle orbite di acquisizione.

Al fine di superare possibili limitazioni legate all'utilizzo di singoli interferogrammi differenziali (disturbi atmosferici, inaccuratezze del DEM, ecc.) e di generare, oltre a singole mappe, anche serie temporali di deformazione, negli ultimi 25 anni sono state sviluppate molteplici tecniche DInSAR avanzate. Esse si basano sull'utilizzo di lunghe sequenze temporali di immagini SAR relative ad un'area di interesse che vengono opportunamente combinate al fine di generare sequenze di interferogrammi differenziali, a partire dai quali è possibile ricostruire l'evoluzione temporale degli spostamenti rilevati [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Lo scenario DInSAR è attualmente caratterizzato da una grande disponibilità di dati SAR acquisiti a partire dagli inizi degli anni '90. Essi includono gli estesissimi archivi di dati acquisiti in banda C (con lunghezza d'onda di circa 5.6 cm) dai sensori ERS-1/2, ENVISAT e RADARSAT-1/2, i dati in banda L (con lunghezza d'onda di circa 23.6 cm) forniti dai sistemi ALOS-1/2 ed, infine, quelli acquisiti dalle costellazioni COSMO-SkyMed e TerraSAR-X basate su sensori di nuova generazione operanti in banda X (con lunghezza d'onda di circa 3.1 cm), particolarmente adatti per analizzare le caratteristiche spazio-temporali dei fenomeni di deformazione rilevati alla scala di singoli edifici e infrastrutture. Inoltre, le recenti messe in orbita dei sistemi operanti in banda C, della costellazione Sentinel-1 (il sistema Sentinel-1A è stato lanciato nell'aprile 2014 e, nell'aprile 2016, è stato affiancato dal sistema gemello Sentinel-1B) del programma COPERNICUS (ex GMES) dell'Unione Europea, stanno fornendo un ulteriore massiccio flusso di dati. In particolare, i satelliti Sentinel-1 sono stati progettati per acquisire dati su ampie porzioni delle terre emerse, con una modalità SAR specificamente dedicata alle applicazioni di interferometria avanzata che è denominata TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans) [15]; inoltre, essi sono caratterizzati da un tempo di rivisita di 6 giorni e da una estensione della zona illuminata di circa 250 km, nella direzione ortogonale a quella della linea di volo. Infine, la costellazione Sentinel-1 opera con una politica di accesso ai dati completamente "free&open", consentendo in tal modo la costituzione ed il relativo facile accesso di un vastissimo archivio di dati SAR acquisito su una ampia porzione della superficie terrestre [16].

Tutti questi sistemi SAR hanno permesso di collezionare, negli ultimi 25 anni, enormi archivi di dati (caratterizzati da risoluzioni spaziali e tempi di rivisita diversi) che hanno consentito e consentono tuttora l'analisi degli spostamenti della superficie terrestre in un lungo arco temporale.

In questo contesto, è chiaro che nei prossimi anni il volume di dati prodotti aumenterà sempre più e sarà quindi necessario mettere a punto soluzioni opportune per trasferire, archiviare ed

elaborare le decine di petabytes di dati relativi alle immagini SAR ed ai corrispondenti prodotti interferometrici, i quali dimostrano come lo scenario DInSAR si inquadri oramai molto bene nel più ampio contesto dei Big Data.

In questo contributo saranno prima introdotti brevemente i concetti base della tecnica DInSAR e, successivamente, verranno presentati quelli relativi alle principali tecniche DInSAR avanzate per la generazione di mappe e serie temporali di deformazione. Saranno poi mostrati vari esempi ottenuti grazie ai dati SAR acquisiti dai diversi sensori che popolano l'attuale scenario DInSAR. In particolare, verranno prima mostrati alcuni esempi ottenuti grazie ai sensori SAR di prima generazione, come i sistemi ERS-1/2 ed ENVISAT dell'ESA; saranno poi discusse le opportunità derivanti dall'utilizzo dei dati SAR acquisiti dalla costellazione italiana COSMO-SkyMed, per poi concludere la presentazione con alcuni risultati relativi ai dati acquisiti dai recenti sistemi europei Sentinel-1A/B. Saranno evidenziate, in particolare, le opportunità di mappare le deformazioni del suolo alla scala nazionale e perfino continentale, derivanti dall'utilizzo dei dati Sentinel-1. In tale contesto, saranno anche presentati esempi di elaborazione di grandi moli di dati SAR Sentinel-1 effettuate mediante l'utilizzo di tecniche di programmazione multi-core e multi-nodo, e di infrastrutture di calcolo distribuite (Grid, Cloud) [17].

Bibliografia

1. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, Mapping small elevation changes over large areas: Differential interferometry, *J. Geophys. Res.*, 94, B7, 1989, pp.9183–9191.
2. Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Ardagna, G. Peltzer, K. Feigl, and T. Rabaute, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, 1993, pp. 38–142, doi:10.1038/364138a0.
3. D. Massonnet, and K. L. Feigl, Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Rev. Geophys.*, 36, 1998, pp. 441-500.
4. Bürgmann, R., P. A. Rosen, and E. J. Fielding, Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28, 2000, pp. 169–209, doi:10.1146/annurev.earth.28.1.169.
5. Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38, 2000, pp. 2202-2212.
6. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E., A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 2002, pp. 2375-2383.
7. Mora, O., Mallorquí, J.J., and Broquetas, A., Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41, 2003, pp. 2243-2253.
8. Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B., A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophys. Res. Lett.*, 31 (23), 2004.
9. Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., and Sansosti, E., A small baseline approach for investigating deformations on full resolution differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 42, 2004, pp. 1377-1386.
10. Kampes, B. M., *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2006.
11. Pepe, A., Sansosti, E., Berardino, P., and Lanari, R., On the generation of ERS/ENVISAT DInSAR time-series via the SBAS technique, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2, 3, 2005, pp. 265–269.
12. Hooper, A., A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, *Geophys. Res. Lett.* 35, L16302, 2008.
13. Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., and Rucci, A., A New Algorithm for Processing Interferometric Data- Stacks: SqueeSAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 49, 2011, pp. 3460 – 3470.
14. Bonano, M., Manunta, M., Marsella, M., Lanari, R., Long Term ERS/ENVISAT Deformation Time-Series Generation at Full Spatial Resolution via the Extended SBAS Technique, *Int. J. Remote Sens.*, 33, 15, 2012, pp. 4756-4783.
15. R. Torres, P. Snoeij, D. Geudtner, D. Bibby, M. Davidson, E. Attema, P. Potin, B. Rommen, N. Floury, M. Brown, I. Navas Traver, P. Deghaye, B. Duesmann, B. Rosich, N. Miranda, C. Bruno, M. L'Abbate, R. Croci, A. Pietropaolo, M. Huchler, F. Rostan, GMES Sentinel-1 mission, *Remote Sens. Environ.*, 120, 2012, pp. 9-24.
16. <https://scihub.copernicus.eu/>
17. F. Casu, S. Elefante, P. Imperatore, I. Zinno, M. Manunta, C. De Luca, and R. Lanari, SBAS-DInSAR Parallel Processing for Deformation Time-Series Computation, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 7, 8, 2014, pp. 3285–3296.