

TECNICHE AVANZATE PER LA STIMA DI MAPPE DIGITALI DI ELEVAZIONE DA PASSAGGI SAR SATELLITARI MULTIPLI

Daniele PERISSIN, Claudio PRATI, Riccardo PIANTANIDA, Davide PICCAGLI

Politecnico di Milano, Via Ponzio 34/5, 20133 Milano, Italy
daniele.perissin@polimi.it

Riassunto

Utilizzando un elevato numero di immagini Radar ad Apertura Sintetica (SAR) da archivio acquisite da satelliti a risoluzione medio-bassa (circa 20m x 5m a terra nel caso di ERS ed Envisat dell'Agenzia Spaziale Europea ESA) è possibile ricavare la posizione 3D di bersagli che mantengono immutata nel tempo la propria firma elettromagnetica (Permanent Scatterers, PS) con precisione nell'ordine del metro. Nell'ottica della generazione di Mappe Digitali di Elevazione (DEM) su vaste aree (fino a 100km x 100km), lo svantaggio principale della tecnica PS è la limitata densità spaziale di punti di misura che si rivelano stabili nell'intero arco temporale delle immagini analizzate (centinaia di punti per km² in ambito urbano, fino a poche unità in aree vegetate). In questo lavoro viene presentata una nuova tecnica per l'analisi multi-temporale di immagini SAR che, rilassando le restrittive condizioni imposte dall'analisi PS, permette di estrarre informazioni anche da bersagli parzialmente coerenti in zone non urbane, estendendo così notevolmente la copertura della stima di quota. Risultati interessanti sono stati ottenuti nelle zone montane del Vesuvio e della Val Brembana (BG).

Abstract

By means of a high number of archived spaceborne SAR images with a slight low resolution (about 25m x 5m for ESA ERS and Envisat) it is possible to estimate the 3D location of targets that show an unchanged electromagnetic signature (Permanent Scatterers, PS) with a metric precision. In the attempt of generating Digital Elevation Models (DEM) of wide regions (up to 100km x 100km), the main drawback of the PS technique is the limited spatial density of targets that behave coherently during the whole observation span (hundreds of PS per squared km in urban site, up to few points in vegetated areas). In this work we present a new solution for multi-temporal analysis of SAR images that, relaxing restrictive conditions imposed by PS technique, allows to obtain information also by partially coherent targets in extra-urban areas, in order to increase notably the covering of height estimation. Interesting results have been obtained in mountainous areas of Vesuvio and Val Brembana (BG).

Introduzione

L'interferometria SAR (Curlander, McDonough, 1991) è una tecnica di telerilevamento capace di estrarre profili altimetrici (precisione ~10m) ed evidenziare possibili fenomeni di deformazione superficiale del terreno (precisione ~10mm). Tali informazioni vengono ricavate dagli interferogrammi, ossia dai battimenti tra due immagini della stessa zona acquisite in istanti di tempo e con angoli di vista differenti. Il principale limite dell'interferometria è la decorrelazione temporale e geometrica, causata dalla variazione di riflettività del terreno in funzione dell'istante e dell'angolo di incidenza dell'acquisizione. A questo si aggiungono i disturbi legati alla variazione del contenuto di vapore acqueo nell'atmosfera.

La tecnica dei diffusori permanenti (*Permanent Scatterers, PS*) (Ferretti et al., 2001) è uno dei più importanti strumenti interferometrici sviluppati negli ultimi anni. Essa permette di risolvere i problemi sopra descritti e studia quei bersagli radar che mantengono immutata la propria firma elettromagnetica per tutto l'arco temporale coperto dalle acquisizioni. Tale tecnica viene utilizzata con successo in molte applicazioni come il monitoraggio di deformazione del terreno (Dixon et al., 2006) e di stabilità di edifici (Ferretti et al., 2005), l'identificazione di bersagli radar urbani multi-orbita (Ferretti et al., 2005), la generazione di DEM da molteplici osservazioni satellitari (Ferretti et al., 2006). L'analisi PS permette di raggiungere una precisione metrica nella misura dell'elevazione dei bersagli. Il suo principale svantaggio è la bassa densità di bersagli che manifestano un comportamento coerente nelle immagini analizzate. In particolare la bassa densità di punti in aree non urbane è certamente il maggior impedimento alla generazione di mappe digitali di elevazione. Scopo di questo lavoro è quello di modificare i limiti imposti dall'analisi PS in modo da estrarre informazione anche da bersagli solo parzialmente coerenti. In particolare vengono modificati 3 aspetti nodali della tecnica PS:

1. non si richiede più che tutte le immagini interferiscano coerentemente con una di riferimento, comunemente denominata *Master*;
2. viene modificato per ogni bersaglio il sotto-insieme di immagini con contenuto informativo;
3. viene tenuta in conto la possibile natura estesa (non più solo puntiforme) dei bersagli osservati.

Algoritmo

Indicando con s_i la generica immagine SAR (con $i = 1, \dots, N$) si può esprimere l'interferogramma ottenuto dal battimento tra le immagini i e j come $I_{i,j} = s_i \cdot s_j^*$. La fase interferometrica può dunque essere indicata come $\Delta\phi^{i,j} = \angle I_{i,j}$. È noto dalla letteratura che essa è composta da diversi contributi, legati alla quota e al movimento del bersaglio, all'atmosfera e al rumore. In particolare il termine dipendente dalla quota è espresso dalla seguente relazione:

$$\Delta\phi_{H,p,p_0}^{i,j} = -\frac{4\pi \cdot \Delta q_{p,p_0} \cdot Bn_{i,j}}{\lambda \cdot \sin \theta \cdot R} \quad [1]$$

dove sia la fase che la quota Δq del generico punto p sono relativi ad un riferimento p_0 (di seguito omissso per snellire la notazione). In [1] $Bn_{i,j}$ è il *baseline* normale dell'interferogramma, λ la lunghezza d'onda del segnale radar, θ l'angolo di vista e R la distanza sensore-bersaglio. Nell'analisi PS il termine di quota viene stimato come (Ferretti et al., 2001):

$$\Delta\hat{q}_p = \arg\left\{\max\left[\left|\xi_p\right|\right]\right\} \quad [2]$$

con:

$$\xi_p = \frac{\sum_{i=1}^N e^{j\left(\Delta\phi_p^{i,j} - \Delta\bar{\phi}_{H,p}^{-i,j}\right)}}{N} \quad [3]$$

dove:

- $\Delta\phi_p^{i,j}$ è la fase acquisita (supponendo di aver compensato i termini che non dipendono dalla quota);

- $\Delta\bar{\phi}_{H,p}^{i,j}$ è dato dalla [1], termine variabile dipendente dalla quota Δq da stimare.

Nell'analisi PS le fasi interferometriche utilizzate nella stima di quota in [3] vengono generate dal battimento di tutte le immagini con la *Master*. Rappresentando ogni immagine come un punto nello spazio bidimensionale dei *baselines* normali e temporali ed un interferogramma come una connessione tra due di esse, tale configurazione può essere visualizzata come un grafo a stella. In questo modo, grazie al fatto che il grafo risulta connesso, viene garantita la continuità temporale delle serie di deformazione dei bersagli e quindi la possibilità svolgere i termini di fase. Lo svantaggio di tale configurazione risiede nel richiedere che un dato bersaglio risulti coerente in tutte le immagini analizzate. Per estendere l'analisi anche a punti che mostrano coerenza solo in particolari sotto-insiemi di interferogrammi sono state proposte diverse tecniche. Tra queste SBAS (Berardino et al., 2002), che imponendo l'uso dei soli interferogrammi con basso *baseline* normale, riduce la decorrelazione geometrica perdendo però la connessione del grafo. Nell'intento di cercare la migliore combinazione di interferogrammi, senza imporre alcuna condizione e garantendo la continuità temporale, calcoliamo dunque tra tutte le possibili connessioni il grafo minimo connesso che massimizzi una data pesatura. A questo scopo, sfruttando conoscenze a priori, viene selezionato un opportuno insieme di punti per ciascuno dei quali viene stimata la coerenza spaziale $\gamma_p^{i,j}$ su tutti gli $N(N-1)/2$ possibili interferogrammi. La coerenza viene calcolata in un predefinito intorno di un dato bersaglio come:

$$\gamma_p^{i,j} = \frac{\sum_{Win(p)} S_i S_j^*}{\sqrt{\sum_{Win(p)} |S_i|^2 \sum_{Win(p)} |S_j|^2}} \quad [4]$$

dove con $Win(p)$ si è indicato l'intorno del punto p utilizzato per la stima. Infine per ogni interferogramma si calcola la media dei moduli della coerenza dei punti.

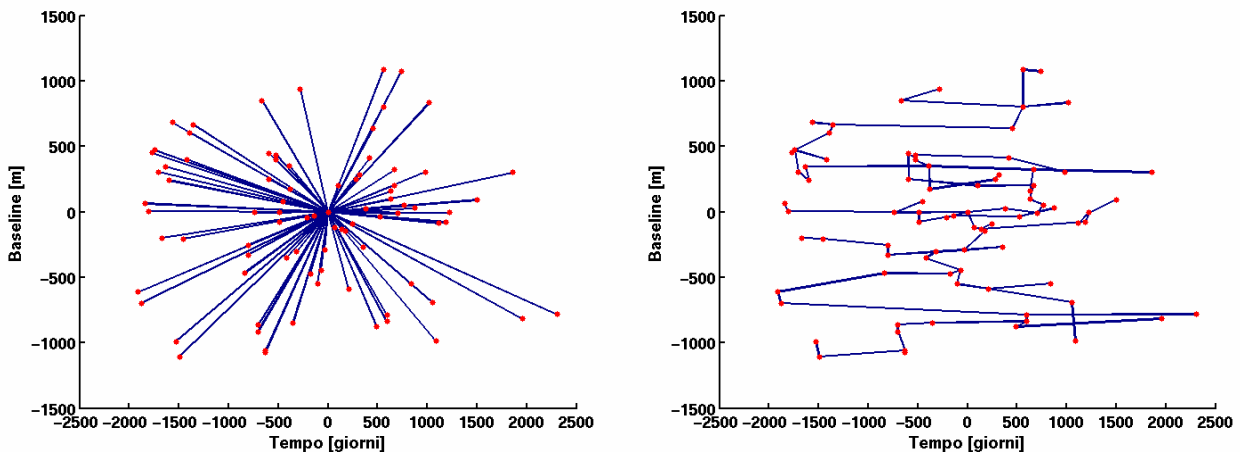


Figura 1 – Confronto tra il grafo di connessione tra le immagini ottenuto con l'analisi PS (a sinistra) e quello ottenuto con la tecnica presentata (a destra).

Come detto, un bersaglio parzialmente coerente è portatore di informazione solo in alcuni interferogrammi ed è dunque necessario selezionare per ogni punto tale sotto-insieme. Il modulo della coerenza spaziale $|\gamma_p^{i,j}|$ può essere usato per questo scopo. Ciò si ottiene inserendolo come peso nella stima, facendo quindi diventare la [3]:

$$\xi_p = \frac{\sum_{(i,j)} |\gamma_p^{i,j}| e^{j(\Delta\phi_p^{i,j} - \Delta\bar{\phi}_{H,p}^{i,j})}}{\sum_{(i,j)} |\gamma_p^{i,j}|} \quad [5]$$

In questo modo una coerenza alta (ovvero prossima ad 1) comporta un elevato peso del corrispondente contributo di fase, mentre una coerenza bassa (prossima a 0) implica scarsa rilevanza nella stima. Come si nota dalla [5], il denominatore è mutato per garantire la normalizzazione della media pesata.

Infine, un bersaglio parzialmente coerente, oggetto esteso che decorrela con la geometria, è caratterizzato da un'informazione non più puntuale, ma diffusa. La stima ottima della sua fase viene raggiunta operando una media spaziale. Si introduce quindi nella [5] invece che la fase del singolo pixel quella della coerenza spaziale, ovvero $\angle\gamma_p^{i,j}$, ottenendo:

$$\xi_p = \frac{\sum_{(i,j)} |\gamma_p^{i,j}| e^{j(\angle\gamma_p^{i,j} - \Delta\bar{\phi}_{H,p}^{i,j})}}{\sum_{(i,j)} |\gamma_p^{i,j}|} \quad [6]$$

Risultati

La tecnica appena descritta si inserisce nell'algoritmo PS standard, che prevede la costruzione di un grafo spaziale tra i punti analizzati e la stima del contributo atmosferico oltre a quelli di elevazione e deformazione del terreno (Ferretti et al., 2001).

Essa è stata applicata a due casi reali: quello della Val Brembana (BG) e quello del Monte Vesuvio, presso Napoli.

Il primo è un tipico caso di zona montuosa, poco coerente data la scarsità di edifici. Il *data set* disponibile è composto da 84 immagini acquisite su un'orbita discendente tra il 1992 e il 2003 dai satelliti ERS1 e ERS2 in corrispondenza della *frame* 2673 della *track* 208. In figura 2 vengono mostrati i PS (a sinistra) e i bersagli identificati con la tecnica appena descritta (a destra) presenti nella zona. Il colore rappresenta la stima della quota residua rispetto al DEM SRTM (modello topografico a libero accesso, espresso in coordinate geografiche, acquisito con 10m di accuratezza verticale, 30m di campionamento orizzontale negli USA, 90m nel resto del mondo) (Brown et al., 2005).

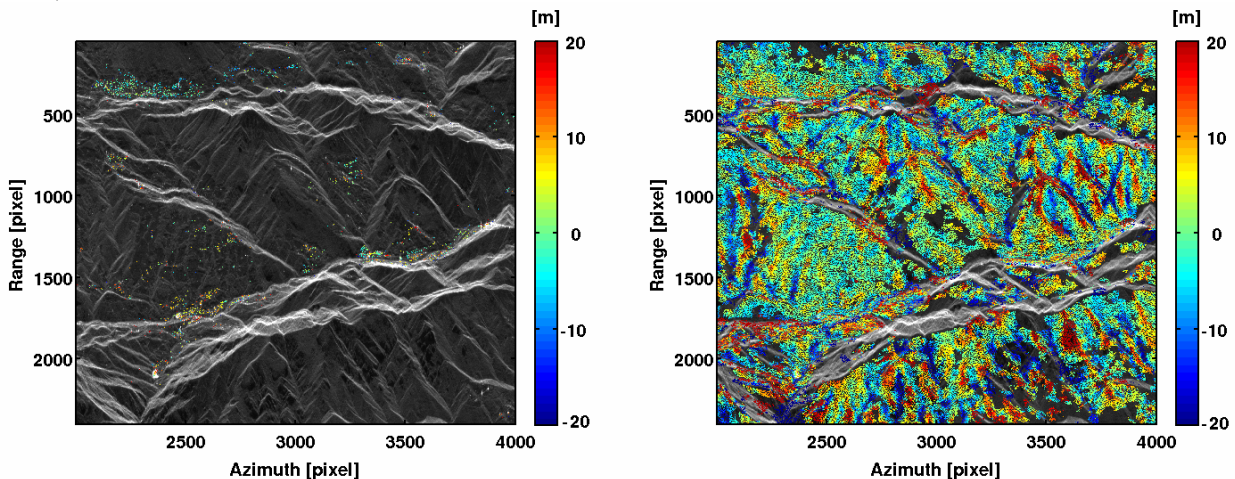


Figura 2 – Quote residue dei PS (a sinistra) e dei bersagli parzialmente coerenti (a destra) rispetto al modello topografico ottenuto da SRTM stimate nella zona della Val Brembana (BG).

Appare subito evidente un notevole incremento dei punti di misura, vengono infatti identificati 134551 bersagli con coerenza superiore a 0.4 a fronte di 1460 PS con coerenza superiore a 0.7. La differente soglia è dovuta al fatto che per i PS si richiede affidabilità anche per la stima delle deformazioni del terreno. I valori di quota residua più elevati in modulo sono concentrati in corrispondenza dei cambi di pendenza; questo fatto può essere spiegato da errori nella conversione in coordinate SAR del DEM SRTM utilizzato e nella coregistrazione tra questo e la griglia delle immagini.

Anche la seconda area analizzata contiene una zona montuosa, circondata però da aree urbanizzate. Il *data set* disponibile è composto da 79 immagini acquisite su un'orbita discendente tra il 1992 e il 2001 dai satelliti ERS1 e ERS2 in corrispondenza della *frame* 2781 della *track* 36. I risultati ottenuti vengono mostrati in figura 3. In questo caso, come nel precedente, si nota un'enorme densificazione dei bersagli utili, infatti, mantenendo le stesse soglie di coerenza citate prima, il numero di punti di misura è circa 200 volte superiore a quello dei PS.

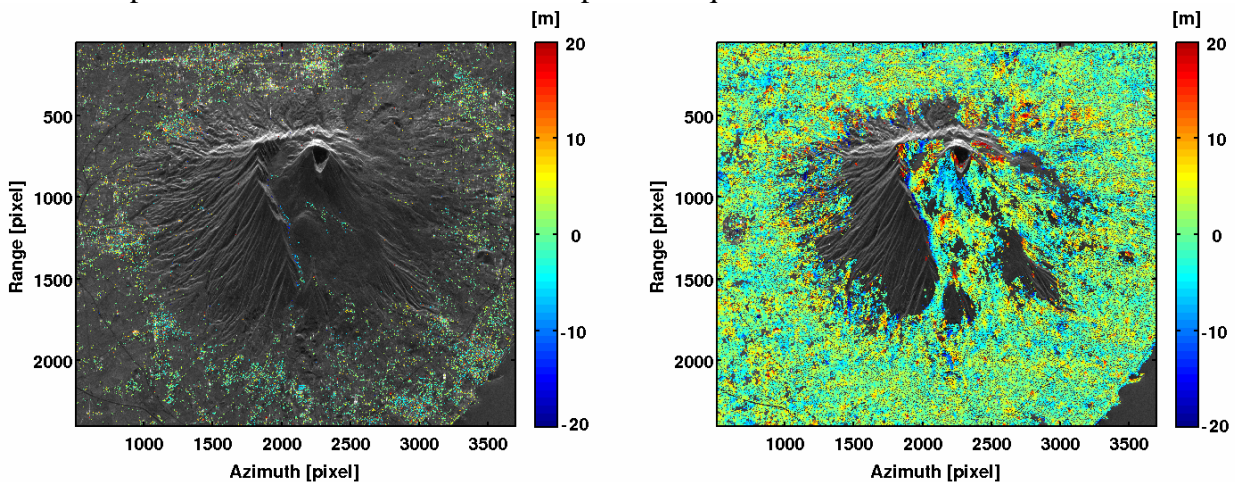


Figura 3 - Quote residue dei PS (a sinistra) e dei bersagli parzialmente coerenti (a destra) rispetto al modello topografico ottenuto da SRTM stimate nella zona del Vesuvio.

Infine dal confronto tra le 2 immagini mostrate in figura 4 si può notare come in questa zona scarsamente urbanizzata grazie ai bersagli parzialmente coerenti si ottenga una copertura decisamente maggiore rispetto ai PS. Inoltre la stima di quota su tali punti permette un effettivo incremento del dettaglio topografico rispetto al DEM SRTM.

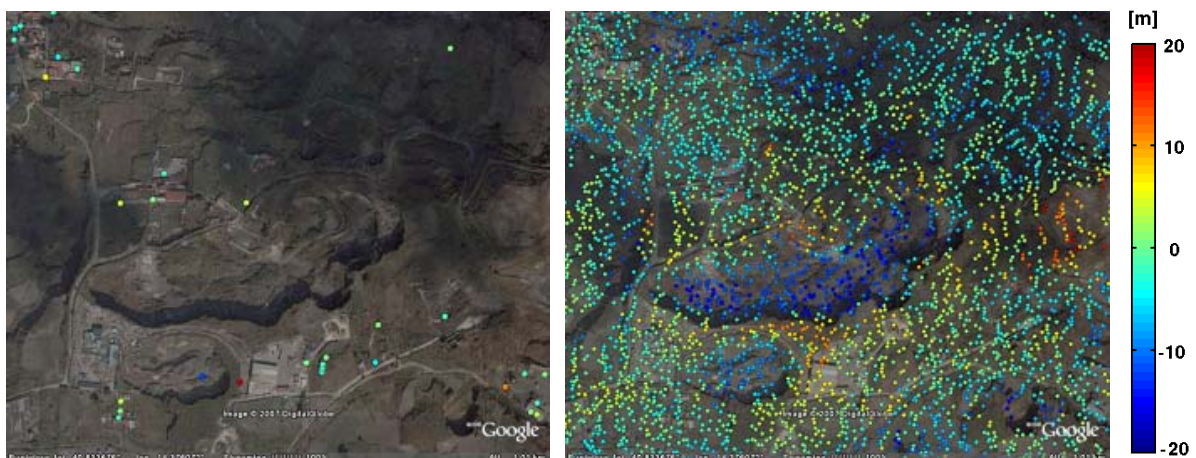


Figura 4 – Quote residue dei PS (a sinistra) e dei bersagli parzialmente coerenti (a destra) rispetto al modello topografico ottenuto da SRTM stimate su una zona alle pendici del Vesuvio, sovrapposte ad un'immagine ottica di Google (l'area analizzata è di 1km*1,2km)

Conclusioni

In questo lavoro si è presentata una tecnica interferometrica per la stima di topografia da immagini SAR ripetute, in grado di ottenere risultati affidabili anche in zone non urbane. Tale tecnica permette di ricavare informazioni su un numero molto elevato di pixel dell'immagine radar (nei casi analizzati circa 2 ordini di grandezza superiore rispetto a quello ottenuto nell'analisi PS). In particolare vengono mostrati risultati particolarmente interessanti sulle zone montane della Val Brembana e del Monte Vesuvio. Successivi sforzi saranno dedicati all'estensione dell'algoritmo alla stima di deformazioni del terreno.

Riferimenti bibliografici

- Curlander J. C., McDonough R. N. (1991), "Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing", New York, John Wiley & Sons.
- Dixon T.H., Amelung F., Ferretti A., Novali F., Rocca F., Dokkas R., Sella G., Kim S.W., Wdowinski S., Whitman D. (2006), "Subsidence and flooding in New Orleans", *Nature*, Vol 441, pagine 587-588.
- Ferretti A., Parizzi A., Perissin D., Prati C., Rocca F. (2006), "Accurate DEM reconstruction from Permanent Scatterers and multi-baseline interferometry", *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS, Denver (Colorado)*.
- Ferretti A., Perissin D., Prati C., Rocca F. (2005), "Caratterizzazione dei punti di misura radar in ambito urbano per lo studio delle deformazioni", *Conferenza nazionale ASITA, Catania*.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001), "Permanent Scatterers in SAR Interferometry", *IEEE TGARS, Vol. 39, no. 1*.
- P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti, "A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11, pp. 2375-2383, November 2002*.
- Brown, Jr. C. G., Sarabandi K. and Pierce L. E. (2005), "Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, VOL. 43, NO. 8*.