Analisi del sisma del 6 Aprile 2009 in Abruzzo con tecniche di Interferometria SAR differenziale.

Davide O. Nitti[1], Fabio Rana[2], Fabio Bovenga[3], Raffaele Nutricato [2],
Mario Tragni[4], Maria Teresa Chiaradia[1], Giovanna Ober[5], Laura Candela[6]

[1] Dipartimento Interateneo di Fisica, Politecnico di Bari, Via Amendola 173, 70126 Bari, Italy tel.+39 080 5443144
E-mail davide.nitti@fisica.uniba.it, chiaradia@ba.infn.it
[2] GAP srl, c/o Dipartimento Interateneo di Fisica, Politecnico di Bari, Via Amendola 173, 70126 Bari, Italy
tel.+39 080 5443144 E-mail raffaele.nutricato@gapsrl.eu, fabio.rana@alice.it
[3] CNR-ISSIA, Via Amendola 122/D, 70126 Bari, Italy, tel. 080 5929425, E-mail bovenga@ba.issia.cnr.it
[4] Planetek Italia srl, Via Massaua 12, I-70123 Bari, Italy, tel. 080 5644200, E-mail tragni@planetek.it
[5] Carlo Gavazzi Space SpA, Via Gallarate, 150 20151 Milano, Italy tel. +39 02 380481, E-mail gober@cgspace.it
[6] Agenzia Spaziale Italiana, Centro di Geodesia Spaziale 'Giuseppe Colombo', Località Terlecchia, 75100 Matera (MT), Italy, tel. +39 0835 3779, E-mail: laura.candela@asi.it

Riassunto

I Radar ad Apertura Sintetica (SAR) per le loro caratteristiche possono fornire un valido supporto all'analisi ed alla gestione dei rischi naturali. In particolare, l'interferometria SAR (InSAR) grazie alla capacità di misurare deformazioni su larga scala rappresenta uno strumento molto utile per l'analisi del danno dovuto ad eventi sismici e la modellizzazione dei parametri descrittivi della faglia. Oggetto del presente lavoro è l'impiego di tali metodologie per analisi dell'evento sismico di Mw 6.3 che ha colpito l'Abruzzo il 6 aprile del 2009. Nello specifico, sono stati utilizzati dati SAR in banda C (lunghezza d'onda 5.6 cm) dal satellite ENVISAT dell'ESA e dati in banda X (lunghezza d'onda 3.1 cm) acquisiti dal satellite TERRASAR-X dell'Agenzia Spaziale Tedesca e dalla costellazione COSMO-SkyMed dell'ASI. Per mezzo dell'algoritmo SPINUA sono stati generati gli interferogrammi differenziali co-sismici che registrano la deformazione indotta dal sisma. Il lavoro presenta il risultato del confronto dei campi di frange interferometriche ottenuti con lunghezze d'onda, risoluzioni spaziali ed angoli di incidenza differenti.

Abstract

Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors can provide useful support to the analysis and managing of the natural risks. In particular, SAR Interferometry (InSAR), thanks to its large-scale view area coverage of the deformation field, provides useful measurements for damage assessment of seismic events and fault modelling. The present study is aimed to the application of InSAR techniques for obtaining the co-seismic deformation pattern and inferring the fault model parameters for the Mw=6.3 earthquake which struck the Abruzzo region in Italy on April 6th, 2009. In particular, we used SAR data acquired in C band (wavelength of 5.6 cm) by the European Space Agency (ESA) ENVISAT satellite, and X band (wavelength of 3.1 cm) by the German Space Agency (DLR) TerraSAR-X as well as by the Italian Space Agency (ASI) constellation COSMO-SkyMed. Through the SPINUA processing chain, the co-seismic differential interferograms were generated which record the deformation induced by the seismic event. In the present work we present a comparative analysis of interferometric fringe patterns obtained with different values of wavelength, spatial resolution as well as incident angles.

Introduzione

I recenti sviluppi nelle tecnologie di telerilevamento da satellite e la copertura frequente e regolare di vaste aree per mezzo di sistemi di Osservazione della Terra (OT) hanno portato ad un incremento nell'utilizzo delle immagini da satellite per la stima e il monitoraggio di rischi naturali. Grazie alle capacità dei sistemi radar satellitari di poter operare in qualsiasi condizione meteorologica, sia di giorno sia di notte, e di poter misurare con precisione piccole deformazioni al suolo (variazioni di quota di qualche millimetro) su vaste aree al suolo (fino a 100x100 Km^2) e con cadenza periodica (< 35 giorni), le tecniche di interferometria SAR (Synthetic Aperture Radar) si dimostrano attraenti per il rilevamento e il monitoraggio di fenomeni di deformazione al suolo su larga scala (subsidenze, sismi, movimenti tettonici, deformazioni vulcaniche). Inoltre la risoluzione spaziale dello strumento in oggetto varia dai 20 x 5 m^2 per i sensori di vecchia generazione in banda C (ERS-1/2, ENVISAT, RADASAT) ai pochi m^2 per i sensori in banda X già in orbita (COSMO SkyMed, TerraSAR-X) rendendo così possibile l'analisi di stabilità di singole strutture antropiche quali per esempio edifici, ponti, dighe. L'utilizzo di questa tecnologia satellitare rappresenta un'alternativa valida e sempre più utilizzata per lo studio delle deformazioni correlate a fenomeni geofisici o alla stabilità di singole strutture poiché l'utilizzo di sistemi *in situ* specifici per il fenomeno da analizzare richiede costi elevati per un monitoraggio continuo.

In particolare, l'interferometria SAR (InSAR) grazie alla capacità di misurare deformazioni su larga scala rappresenta uno strumento molto utile per l'analisi del danno dovuto ad eventi sismici e la modellizzazione dei parametri di faglia del sisma (Massonnet, Feigl, 1998). L'analisi della mappa interferometrica di deformazione fornisce molte più informazioni che non le misure convenzionali e puntuali realizzate *in situ*. L'uso di tecniche InSAR per la misura degli spostamenti co-sismici e post-sismici è stato validato in molti casi di studio. Per terremoti non profondi (Massonnet et al., 1993) i valori di spostamento sono in buon accordo con le misure di campo ed con i modelli di dislocazione mentre per terremoti profondi le misure interferometriche sono uno strumento ideale per le misure di spostamenti superficiali. Quello che occorre è la disponibilità di acquisizioni SAR a valle ed a monte dell'evento con il minimo tempo possibile di rivisitazione dell'area per attenuare il più possibile la decorrelazione temporale. I sensori di ultima generazione ed in particolare COSMO-

Sat.	Band (λ cm)	Resolution Az. x Range (m)	POL	Mode/ Beam	Look Angle	Incid. Angle	Look / Pass Direction	Acquis.Date yyyy/mm/dd	Interf label	Bt (days)	$B^{\perp}$ (m)	Bp (m)	Ha (m)
ENV	C (5.62)	≈ 6 x 24	VV	Strip IS2	20.1°	22.7°	Right/ Descending	**2009/02/01** 2009/04/12	#1	70	156.5	268.6	-58.8
							Right/ Ascending	**2009/03/11** 2009/04/15	#2	35	-225.7	1	40.8
TSX	X (3.11)	≈ 3.3 x 2.8	HH	Strip 011	35.7°	39.1°	Right/ Ascending	**2008/02/06** 2008/04/13	#3	66	98.9	39	-63.9
				Strip 012	37.3°	40.9°	Right/ Ascending	**2009/02/28** 2009/04/24	#4	55	235	150.8	-28.6
CSK	X (3.12)	≈ 2.5 x 2.5	HH	H4-09	35.9°	40.1°	Right/ Ascending	**2009/04/04** 2009/04/12	#5	8	-435.2	-228.1	+18.3
				H4-10	37.0°	41.4°	Right/ Descending	**2009/03/24** 2009/04/09	#6	16	-972.5	-649.1	8.6
			VV	H4-05	30.6°	34°		**2009/04/19** 2009/03/19	#7	-31	786.8	323	-8.1
				H4-19	47.3°	53.9°		**2009/04/18** 2009/03/18	#8	-31	751.6	622.2	-16.5
				H4-24	51.5	59.3		**2009/04/15** 2009/03/23	#9	-23	619.3	618.2	-23.8

Tabella 1- Nella tabella sono elencati i dati SAR utilizzati per l'esperimento insieme ad alcuni parametri radiometrici e geometrici di interesse. Gli interferogrammi generati sono in totale 9 e le date delle immagini usate come riferimento sono riportate in grassetto e sottolineate. Gli interferogrammi (9 in totale) sono identificati con un numero e per ognuno di essi sono riportati: la data dell'immagine di riferimento in grassetto e i valori di baseline temporale (B_t),normale ($B_\perp$) e parallela (B_p).

SKyMed che è in orbita con una costellazione che arriverà a contare 4 satelliti, consente di programmare le acquisizione in modo da coprire spazialmente e temporalmente l'evento di interesse in modo efficiente. I principali problemi in questo tipo di applicazioni derivano dalle condizioni di coerenza del segnale e dell'influenza dovuta alla presenza della troposfera durante la propagazione delle onde elettromagnetiche (Hanssen, 2001).
Analizzando coppie interferometriche indipendenti e sfruttando la proprietà di decorrelazione temporale del segnale legato all'atmosfera, è possibile ottenere un campo di fase interferometrica correlato unicamente alla deformazione del suolo indotta dal sisma ed utilizzare tale dato per stimare i parametri di faglia per mezzo di procedure di inversione (Nitti et al., 2006).
Nel presente lavoro si è sperimentata la potenzialità di utilizzo di dati SAR interferometrici acquisiti da diverse piattaforme satellitari e con caratteristiche radiometriche e geometriche differenti, per investigare la deformazione al suolo indotta dall'evento sismico di Mw 6.3 che ha colpito l'Abruzzo il 6 aprile del 2009. Nello specifico, sono stati utilizzati dati SAR in banda C dal satellite ENVISAT dell'Agenzia Spaziale Europea e dati in banda X acquisiti dal satellite TERRASAR-X dell'Agenzia Spaziale Tedesca e dalla costellazione COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana. I dati a nostra disposizione acquisiti a cavallo dell'evento sismico sono stati elaborati come descritto di seguito per ottenere i campi di deformazione rispetto alle differenti direzioni di osservazione dei satelliti. L'analisi di questi valori di deformazione lungo le *Line of Sight* (LOS) consente interessanti osservazioni circa le componenti del campo vettoriale di deformazione al suolo definito dalle componenti lungo le direzioni verticale, Est-Ovest e Nord-Sud.

Elaborazione dei dati SAR

I dati SAR a disposizione sono elencati nella tabella in Tabella 1. Come si evince sono state elaborate immagini in banda C acquisite dal satellite ENVISAT (ENV) ed in banda X dai satelliti TerraSAR-X (TSX) e COSMO-SkyMed (CSK). I dati in banda X di ultima generazione sono caratterizzati da valori di risoluzione spaziale pochi m^2 grazie alla larghezza di banda elevata. Anche la frequenza di acquisizione è superiore (8 gg per CSK e 11 gg per TSX) il che consente di intervenire in modo più efficace in caso di eventi catastrofici come i sismi e programmare acquisizioni a cavallo dell'evento a breve distanza temporale. In teoria la disponibilità di piccole baseline temporali e alti valori di larghezza di banda consentono di limitare la decorrelazione temporale e geometrica cui è soggetto l'interferogramma malgrado la lunghezza d'onda sia inferiore. Il dataset tuttavia presenta valori relativamente elevati di baseline geometrica in particolare per i dati CSK (si veda la tabella in Figura1) e questo incide sui valori di decorrelazione geometrica. Per l'elaborazione dei dati in banda X, è stato necessario adottare soluzioni algoritmiche ad hoc. La coregistrazione delle immagini è di fatto lo step più critico in quanto è richiesta una accuratezza di almeno 1/8 di pixel per non degradare la coerenza di fase interferometrica. Per via della spiccata orografia del sito, metodi di coregistrazione delle immagini convenzionali, basati sul modellamento delle cosiddette *warp functions* mediante polinomiali bidimensionali di ordine in genere non superiore al terzo, possono essere all'origine di disallineamenti locali, tanto più evidenti in banda X, per via dell'elevata risoluzione. La coregistrazione delle immagini COSMO/SkyMED è in generale più sensibile a questo problema rispetto al caso TerraSAR-X, per via del più elevato diametro del tubo orbitale entro cui è confinata l'orbita dei satelliti rispetto a quella nominale. Un approccio innovativo che tiene conto dell'informazione di quota, è stato pertanto impiegato per la coregistrazione delle immagini SLC (Single Look Complex) (Nitti et al., 2008). Inoltre, le immagini COSMO/SkyMED sono state prefiltrate in azimuth al fine di rimuovere eventuali ghost, ambiguità in azimuth necessariamente presenti in dati di tipo SCS_U. Per via di una elevata variazione di centroide doppler, specie tra acquisizioni provenienti da diversi sensori della costellazione COSMO/SkyMED, è risultato spesso necessario un filtraggio di banda comune per ogni coppia master/slave. Nel caso del sensore TerraSAR-X (Beam 12) è stata effettuata, a monte della coregistrazione, una interpolazione in azimuth al fine di uniformare la frequenza di campionamento in azimuth (PRF) tra le immagini

master e slave e facilitare così la coregistrazione delle medesime. Tale difformità dei valori di PRF, superiore ai 200 Hz, non è stata riscontrata invece nel caso delle due immagini TerraSAR-X acquisite nel Beam 11. Per le immagini in banda C, infine, non si dispone attualmente di orbite precise. Il ricorso pertanto a quelle annotate non ha consentito in principio una perfetta rimozione della fase di suolo piatto negli interferogrammi ENVISAT per i quali la sottrazione della fase di riferimento è stata realizzata mediante la tecnica del periodogramma, stimando il residuo orbitale su punti ad alta coerenza selezionati su una vasta area che comprende quella di interesse nell'intorno delle zone colpite dal sisma. Tale stima è stata effettuata direttamente sull'interferogramma complesso, non necessitando tale metodologia di alcun unwrapping interferometrico.

Risultati e commenti

Per tutti gli ingerferogrammi elencati nella tabella in Tabella 1 sono stati generati gli interferogrammi differenziali cosismici. Solo per i primi cinque dell'elenco la coerenza interferometrica è risultata tale da consentire uno srotolamento di fase affidabile e quindi una misura di spostamento assoluto. In figura 2 sono indicate in bianco, sovrapposte all'immagine ottica, le coperture al suolo degli interferogrammi indicati come #1,#2,#3,#4 e #5 nella tabella in Figura1. Il quadrilatero con contorno nero racchiude invece l'area interessata dal sisma cui fanno riferimento le frange interferometriche di spostamento in Figura 3. Si osservi che per coprire l'area di interesse è stato necessario mosaicare due interferogrammi TSX acquisiti su beam adiacenti. Per effettuare misure di spostamento è indispensabile calcolare i valori di fase assoluta per mezzo dell'operazione di srotolamento della fase differenziale. Per questa elaborazione è stata selezionata un'area che fosse coerente in tutti gli inteferogrammi (#1,#2,#3 e #5). I dati sono stati geolocati e quindi ed è stato applicato lo srotolamento di fase mediante l'ausilio del software SNAPHU (Chen, Zebker, 2002). Dalle fasi si è infine risaliti ai movimenti lungo le rispettive direzioni di puntamento dei satelliti (LOS) in virtù della relazione:

$$\phi = 4\pi \frac{d_{LOS}}{\lambda}. \qquad [1]$$

La Figura 5 mostra le mappe di deformazione misurate lungo la LOS per gli interferogrammi #1, #2, #3 e #5. Gli angoli di incidenza, da cui dipende la LOS e quindi la proiezione del vettore di spostamento al suolo, variano da circa 23° a circa 40°. Si può osservare come i valori della proiezione lungo le LOS della deformazione aumentino con il diminuire dell'angolo di incidenza il che indica come la direzione dello spostamento indotto dal sisma sia prevalentemente verticale. Per quanto i dati a disposizione mostrino caratteristiche geometriche molto variabili, essi non risultano tuttavia sufficienti ad invertire in modo robusto il seguente sistema di equazioni che consentirebbe in teoria di stimare le componenti d_x, d_y, d_z (rispettivamente Est-Ovest, Nord-Sud e Up-Down) della deformazione al suolo $\bar{\mathbf{d}}$:

$$\bar{\mathbf{r}}^{\mathbf{k}}_{\mathbf{LOS}} \cdot \bar{\mathbf{d}} = d^{k}_{LOS}, \qquad [2]$$

dove indichiamo con $\bar{\mathbf{r}}^{\mathbf{k}}_{\mathbf{LOS}}$ il versore che individua la direzione LOS del *k*-mo sensore, i cui coseni direttori sono elencati in Tabella 4. L'unica componente che può essere stimata in modo affidabile combinando linearmente i singoli contributi nelle direzioni LOS è quella Up-Down, mostrata in Figura 6. Dall'analisi dei coseni direttori che individuano le direzioni LOS del satellite ENVISAT su orbite ascendenti e discendenti, è possibile dimostrare la validità della seguente approssimazione:

$$d_z \approx \left(d^{ENV_A}_{LOS} + d^{ENV_D}_{LOS}\right) \Big/ \left(r^{ENV_A}_{LOS,z} + r^{ENV_D}_{LOS,z}\right). \qquad [3]$$

È interessante osservare infine come le mappe di spostamento generate a partire da dati SAR in banda X (Figura 5 in basso), grazie all'alta risoluzione spaziale, mostrino una continuità ed un dettaglio migliore di quelle relative ai dati ENV. Per esse anche l'operazione di srotolamento di fase è risultata più agevole avendo potuto ottenere dei valori di rapporto segnale rumore (SNR) più elevati grazie alla possibilità di realizzare medie spaziali su finestre di stima più estese.

Ringraziamenti
Gli autori ringraziano l'Agenzia Spaziale Europea per aver messo a disposizione il *dataset SAR Italy earthquake April 2009*. Le immagini COSMO-SkyMED sono state elaborate nell'ambito del progetto MORFEO (contratto ASI n. I/045/07/0)

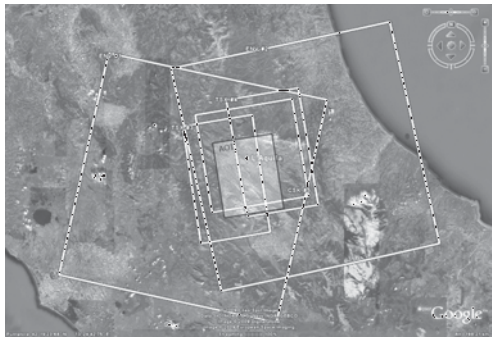

Figura 2- Nella figura sono indicate le coperture al suolo degli interferogrammi identificati con #1,#2,#3,#4,#5 (cf. Tabella 1). Il quadrilatero con contorno nero racchiude invece l'area interessata dal sisma sulla quale sono stati confrontati i campi di spostamento (si veda la Fig.3).

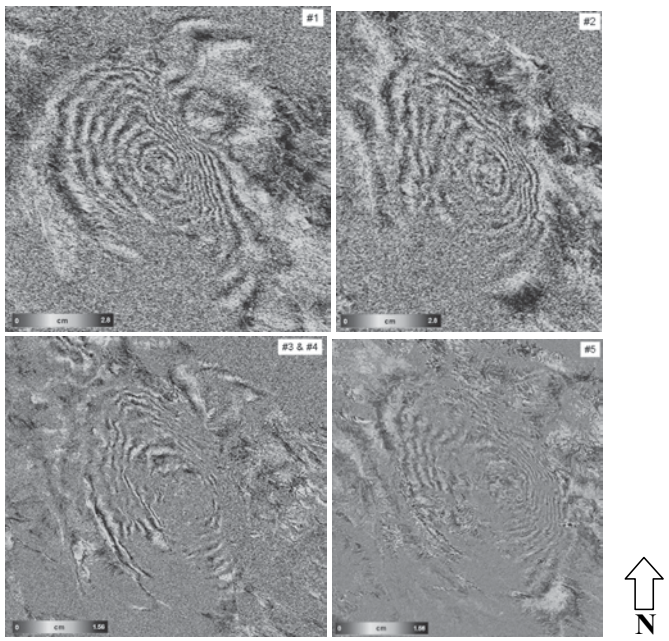

Figura 3- Frange inteferometriche rappresentative della deformazione al suolo indotta dal sisma. Le frange fanno riferimento all'area racchiusa da contorni neri in Figura 2. Le frange indicate con l'etichetta #3 & #4 sono state ottenute componendo gli interferogrammi TSX relativi ad acquisizioni su track adiacenti.

Interf. Label	Sat	Look/Pass Direction	Incidence Angle	Heading	$r_{LOS,x}$	$r_{LOS,y}$	$r_{LOS,z}$
#1	ENV	R/D	22.7°	196.4°	0.3702	-0.1091	-0.9225
#2	ENV	R/A	22.7°	343.6°	-0.3702	-0.1091	-0.9225
#3	TSX	R/A	39.1°	350.6°	-0.6222	-0.1029	-0.7760
#5	CSK	R/A	40.1°	350.2°	-0.6348	-0.1094	-0.7649

Tabella 4 - Coseni direttori delle direzioni LOS dei sensori cui si riferiscono gli interf. in Figura 3.

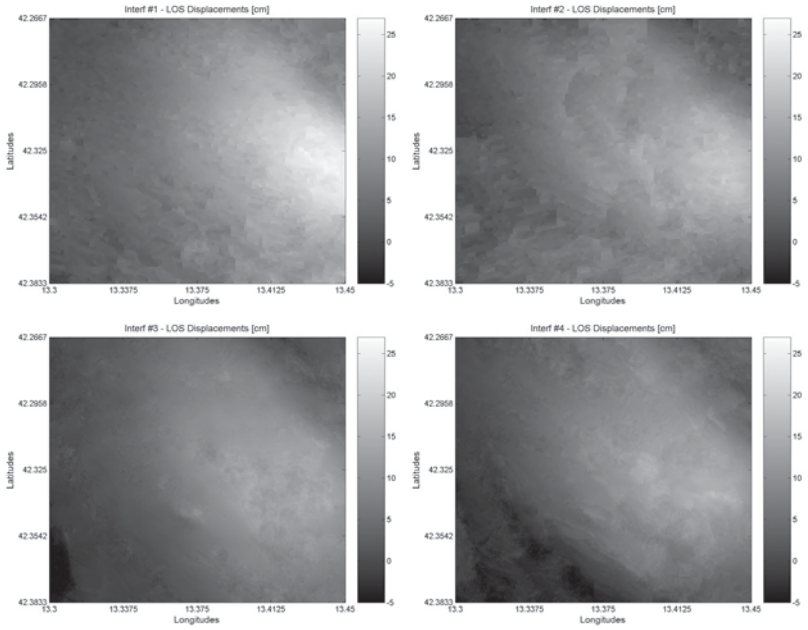

Figura 5- Deformazione misurata lungo le "Line Of Sight" degli interferogrammi #1, #2, #3 e #5

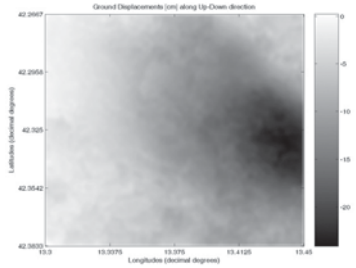

Figura 6 – Mappa dei movimenti al suolo stimati lungo la direzione verticale

Riferimenti bibliografici

Massonet D., Feigl K.L. (1998), "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface", *Rev. Geophys*, 36: 441-500

Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K. and Rabaute T. (1993), "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry", *Nature*,364,138-142

Hanssen, R. F. (2001), *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, 2001.

Nitti, D. O., Bovenga F., Nutricato R., Refice A., Chiaradia M. T. (2006), "InSAR derived deformation patterns related to the Aigion earthquake (Greece)", *Proc. of IGARSS 2006*, IEEE IGARSS 2006, July 31- August 04, Denver, Colorado, USA.

Nitti, D., Hanssen, R., Refice, A., Bovenga, F., Milillo, G., and Nutricato, R. (2008), "Evaluation on dem-assisted sar coregistration", *Proceedings of SPIE Remote Sensing 2008*, Cardiff, Wales, United Kingdom (2008).

Chen C. W. & Zebker H. A. (2002), "Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentations and generalized network models", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **40**(8), 1709-1719.