

OSSERVAZIONE DEI FENOMENI DEFORMATIVI DELLE STRUTTURE MONUMENTALI NEL CENTRO DI ROMA

DALL'APPLICAZIONE DI TECNICHE AVANZATE DInSAR, ALL'ANALISI QUALITATIVA DELLA NATURA DEL RUMORE DEI DATI COSMO SKY-MED

di Massimo Morigi

Il presente lavoro nasce per focalizzare l'attenzione su un particolare aspetto legato alla equivocazione (aliasing) delle misurazioni effettuate con tecniche Interferometriche Differenziali SAR (DInSAR) in banda X per la presenza di neve.

Attualmente c'è sempre maggiore interesse per il monitoraggio dei processi deformativi delle strutture monumentali, legati alle attività di gestione, monitoraggio del territorio, nonché per la prevenzione di effetti potenzialmente catastrofici che, inevitabilmente, sono legati a fenomeni naturali e/o antropici.

La tecnologia SAR ha difatti consentito, da circa un ventennio, anche attraverso l'impiego di tecniche A-DInSAR, di effettuare tale tipologia di monitoraggio - da aree estese fin a giungere al singolo edificio. L'efficienza di tali tecniche, anche nel mondo giudiziario, si è rivelata nel 2002 quando, nella Città di Rovigo, si sono manifestati diffusi dissesti strutturali a edifici monumentali nel periodo 1994-95. I risultati dell'applicazione di tecniche Interferometriche SAR sono stati riconosciuti di efficacia probante in ambito giudiziario (pronunce giurisdizionali), avendo fornito una dimostrazione e quantificazione spaziale e temporale del legame causa-effetto (Ferretti, 2003). Anche in altri casi, come nel monitoraggio dei fenomeni di subsidenza emersi nel concorso di scavi per la costruzione della metropolitana, pari strumenti hanno permesso di valutare il legame causa-effetto (Perissin, 2011a).

Il segnale SAR è un dato di tipo complesso, cioè caratterizzato da due proprietà fondamentali: l'ampiezza e la fase - ovvero, da una parte reale e una parte immaginaria.

Mentre l'ampiezza è strettamente legata all'energia del segnale riflesso, la fase è determinata dal tempo che impiega l'impulso radar, una volta emesso dall'antenna, a colpire il nostro bersaglio/scatteratore a terra, essere riflesso e catturato dall'antenna; stiamo quindi parlando di una distanza: sensore-bersaglio-sensore (andata e ritorno) lungo l'angolo di osservazione del satellite LOS (Line of Sight). I bersagli radar, grazie alla loro attitudine di riflettere l'onda elettromagnetica, hanno la capacità per essere definiti come Scatteratori Permanenti (PS).

I ritardi o le accelerazioni che si manifestano sulle onde elettromagnetiche lungo il cammino ottico, possono anche essere il risultato di alcuni fattori di disturbo quali: la decorrelazione geometrica, temporale e gli artefatti atmosferici (essenzialmente ritardo troposferico).

Le tecniche DInSAR, specialmente nella loro modalità A-DInSAR, permettono di sfruttare le immagini acquisite nel tempo

dai satelliti su una stessa area per estrarre informazioni sull'evoluzione dei processi deformativi con elevata accuratezza (Ferretti et al., 2001, 2011; Berardino et al., 2002 e Perissin et al., 2012).

Il problema di riferimento è stato quello di comprendere quali possano essere gli strumenti efficaci ed efficienti per evitare l'insorgere di equivocazioni nella lettura dei dati generati dall'applicazione di tecniche A-DInSAR in banda X per la presenza di neve. Tali equivocazioni, come brevemente accennato, emergono dopo una attenta interpretazione dei risultati ottenuti attraverso l'applicazione di tecniche standard PS e A-DInSAR.

In effetti sono state osservate una serie consistenti di anomalie, originate nella stessa data di rilevazione del dato Cosmo Sky-Med (CSK), il 20120204 (alle ore 04.55) e, nel seguito, sono state eseguite ulteriori analisi qualitative. In considerazione del fatto che, il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009 ha prodotto danni anche nella Città di Roma e tali danni hanno comportato, in alcuni casi, lo sgombero di alcuni edifici, la ricerca ha spaziato dal giorno della presa ai giorni precedenti il 20120204 (Bozzano et al., 2011). La ricerca ha evidenziato che sull'area di studio, nel periodo che intercorre tra il giorno indicato e quello della precedente presa (20120119), i movimenti dei PS, probabilmente, non possano essere stati indotti da fenomeni naturali, quali: intense piogge (sollevamenti) o di deficit idrico (abbassamenti), attività sismica, sinkhole, vento forte e significative variazioni della temperatura o tantomeno da fenomeni antropici, quali: apertura di cantieri per attività di scavi (metro C) o ristrutturazione.

Il solo fenomeno documentato, probabilmente (probabile = deve essere dimostrato), legato al periodo investigato e che si ritiene responsabile della comparsa di tali anomalie è la presenza di neve. Concretamente nella tarda notte del 3 febbraio 2012 a Roma è caduta la neve; evento che è riportato nelle cronache e nelle immagini del periodo (link 1).

In generale la neve asciutta è trasparente alle onde elettromagnetiche, quindi le onde emesse dal radar sono in grado di penetrare il manto nevoso fino al suolo sottostante. Comunque, sebbene trasparente, la neve ha un indice di rifrazione diverso dall'aria, semplificando - le onde elettromagnetiche che attraversano il manto nevoso secondo un percorso come raffigurato

in Fig. 1 subiscono un ritardo o accelerazione che può essere misurato come una variazione nella fase del segnale riflesso - dando luogo a fenomeni di interferenza costruttiva.

Vari studi sperimentali e teorici hanno dimostrato che, la neve bagnata può essere differenziata dalla neve libera a terra e la capacità discriminativa è crescente con la frequenza impiegata (Baghdadi et al., 1999).

Per esempio, in aree coperte di erica, una copertura di neve bagnata riduce in genere il backscatter di 2-3 dB (la metà del segnale emesso), mentre sopra l'erba ruvida aumenta di circa 1 dB (Hallikainen et al., 1993; Koskinen et al., 1994).

AREA DI STUDIO

La Città di Roma è geologicamente giovane, come il resto della penisola, ed è soggetta a intensi processi morfogenetici che ne modificano in modo sostanziale il paesaggio e sorge in un contesto geologico risultante dall'azione combinata di diversi processi geologici. Tali processi sono legati ai diversi tipi di rischio naturali e antropici.

La Città di Roma è stata anche oggetto, da circa un ventennio, di misurazioni effettuate anche attraverso l'impiego di tecniche DInSAR, A-DInSAR e GBInSAR (Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar).

APPLICAZIONI DI RIFERIMENTO

L'autorevole studio diacronico di riferimento in Italia è del 1999, fu effettuato dopo il crollo della palazzina di Via Vigna Jacobini a Roma nel dicembre 1998 con 27 morti; la "Tecnica PS" venne applicata alla serie storica di immagini satellitari radar negli anni precedenti al crollo dell'edificio (1992-1998). Condotto dal Dipartimento della Protezione Civile Nazionale (DPC) e il Politecnico di Milano, evidenziò come i dati radar potessero descrivere "la storia altimetrica" della palazzina. Le misure mostrarono come l'edificio avesse subito i primi cedimenti (spostamenti verticali di circa un centimetro) almeno due mesi prima del crollo (Fossati, 2003).

Specificatamente per la sola Città di Roma, troviamo innumerevoli altri studi, nell'ordine:

- ▶ 2006 - il Sindaco di Roma affidò alla Società GEOCART di Potenza l'incarico di effettuare un'analisi DInSAR dell'area del centro storico (link 2);
- ▶ 2008 - a seguito di fortissime piogge e a seguito dell'Ordinanza DPC n. 3890 del 2009, vennero eseguiti specifici studi, attraverso un sistema radar a terra (GBInSAR), per verificare la stabilità dei manufatti di pregio storico nell'area del centro storico (link 3);
- ▶ 2010 - Progetto TESEO, accordo tra Comune di Roma e Agenzia Spaziale Italiana - anche per valutare la stabilità degli edifici (link 4).

Altri autorevoli autori hanno condotto, in seno a Progetti Nazionali ed Europei, studi che afferiscono a tematiche quali subsidenza, deformazioni e instabilità delle strutture sulla Città di Roma, a livello nazionale troviamo - Stramondo S. (2008), Marsella M.A. et al., (2008, 2011, 2012 e 2013) e Casagli N. et al., (2012). Corre l'obbligo segnalare alcuni siti in cui è possibile vedere il risultato dell'impiego delle tecniche PS sulla città di Roma - link 5, 6 e 7.

Ultimo lavoro citato è quello del Progetto Europeo Pangeo

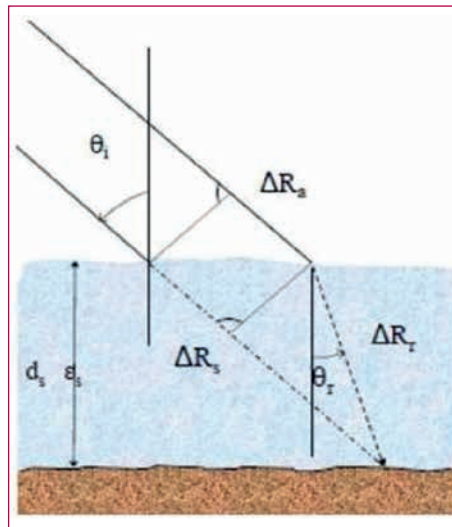


Fig. 1 - Propagazione d'onda radar nella neve asciutta e rapporto tra contenuto equivalente d'acqua (SWE) e la differenza di fase indotta dalla presenza della neve (ϕ_{snow}), con θ_1 come l'angolo di incidenza del radar, θ_2 come l'angolo di incidenza radar diffratta, e rispettivamente d_s e e_s come la profondità e la permittività del manto nevoso (Rott et al., 1993).

(Enabling Access to Geological Information in Support of GMES) è un progetto della Comunità Europea, finanziato nell'ambito del VII Programma Quadro. Ottenuto dall'integrazione di: dati satellitari PSInSAR (in grado di evidenziare eventuali velocità di movimento subverticale del terreno), dati geologici e di pericolosità geologica relativi alle città di Roma e di Palermo (link 8).

DATI E METODI

La metodologia adottata nella prima parte del lavoro ha riguardato l'analisi dei fenomeni deformativi delle strutture monumentali nel centro di Roma. Il dato interferometrico è stato ricavato sulla base delle immagini SAR della missione dei satelliti Cosmo-SkyMed; sono state acquisite 23 immagini SAR lungo l'orbita ascendente con polarizzazione HH nel periodo luglio 2011 - ottobre 2012. I dati CSK sono

stati concessi in seno al Progetto ASI-WHERE - contratto ASI n° I/002/12/0 e finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana.

Le immagini sono state elaborate mediante il software SARPROZ, disegnato anche per applicazioni Avanzate nel panorama PSInSAR (Perissin, 2011).

Per questa area di studio sono stati utilizzati due approcci: a) analisi standard PS - permette il riconoscimento dei PS e ne stima la media delle velocità supponendo un trend lineare di spostamento; b) analisi di piccola area (*tool Small area*) tecnica A-DInSAR - permette di ottenere una maggiore precisione nella stima dei spostamenti e, in modo particolare, analizzare trend non lineari di spostamento. L'elaborazione complessiva del dataset di immagine CSK è divisa in tre fasi, attraverso la seguente catena di processamento: fase 1 - DataSet selection, Fase 2 - Site processing, fase 3 - Small area processing.

La metodologia adottata nella seconda parte del lavoro ha riguardato, osservate una serie consistenti di anomalie, l'individuazione degli idonei strumenti di analisi per effettuare una corretta valutazione della natura del rumore; accertando che non siamo in presenza di fenomeni legati a processi deformativi. Gli strumenti offerti dal software SARPROZ sono molteplici (Perissin, 2011). Essi permettono di impiegare le informazioni prodotte sia dai valori dell'ampiezza e sia della fase. Per la presente analisi gli strumenti individuati sono: tecniche di *Change Detection* (*tool Auxillary analysis*) e l'analisi del comportamento dei valori delle serie temporale di ampiezza e delle serie temporale delle fasi.

RISULTATI E ANALISI

La tecnica di Change Detection, applicata ai dati Cosmo-SkyMed, ha permesso di localizzare geograficamente le aree che hanno subito delle trasformazioni radiometriche nel periodo considerato; i PS hanno un outlier nella stessa data e dunque, l'anomalia presente nelle fasi c'è anche nelle ampiezze. La Fig. 2a - in cui è considerata la coppia di immagini acquisite in data 20120119-20120204, ci restituisce la stima qualitativa dell'avvenuta trasformazione. Nella Fig. 2b, in cui nelle date considerate non c'è la presenza di neve, non registriamo nessun significativo fenomeno di trasformazione nell'area considerata. Per l'analisi delle serie temporale delle ampiezze e delle serie temporale delle fasi è stata impiegata la tecnica A-DInSAR; nello specifico il tool "Small area". Il DEM impiegato per l'analisi è SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) con cella elementare di misurazione (*pixel*) corrispondente a 1 secondo d'arco

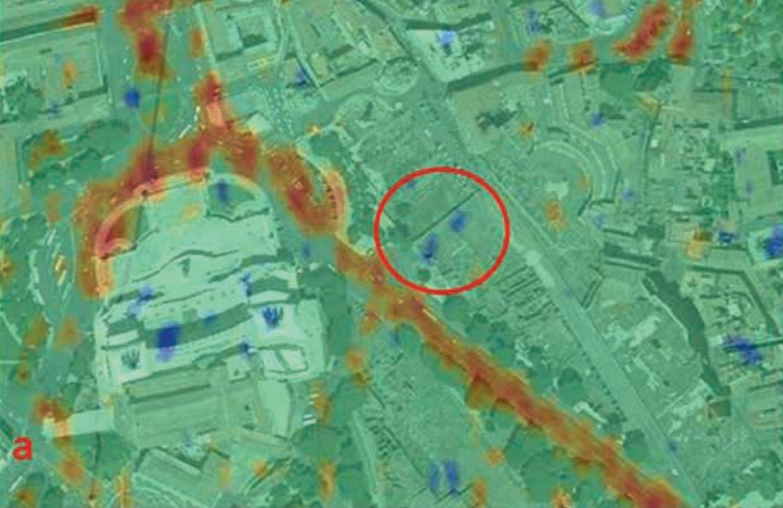


Fig. 2 - Overlay tra la mappa degli incrementi di cambiamento (immagini 20120119-20120204) (a), la mappa degli incrementi di cambiamento (immagini 20120119-20120220) (b) e l'immagine di Google Earth.

quadrato, ossia a circa 30m x 30m misurati sul terreno. I PS selezionati ed evidenziati nella Fig. 3 hanno un valore di coerenza ≥ 0.9 .

Nella Figura 4 sono mostrati i risultati che vengono restituiti dal sw SARPROZ e rappresentano, nella classica modalità - ascissa e ordinata, il comportamento del valore dell'ampiezza in funzione del tempo (a) e il comportamento della fase in funzione del tempo (b).

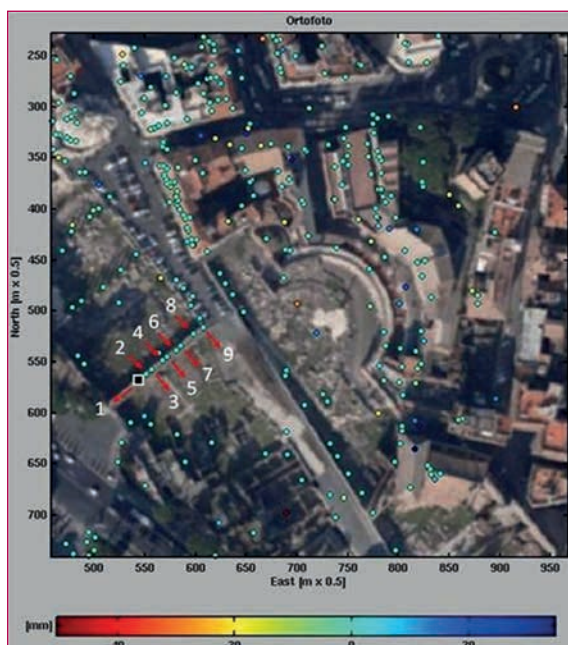
Nella Figura 5 sono mostrati tutti gli estratti degli altri grafici relativi ai PS selezionati.

I risultati che emergono dall'analisi del comportamento dei valori delle serie temporale di ampiezza e delle serie temporale delle fasi nella Fig.ra 5 (ID 144, 146, 149, 152, 157, 159, 166 e 171), confermano quanto esposto, non ci troviamo nelle condizioni di misurare dei fenomeni di deformazione bensì, per la sola data specifica di acquisizione - apprezziamo le anomalie/ rumore prodotte per la presenza di neve.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha focalizzato l'attenzione su un tema sottostimato nel panorama dell'applicazione di tecniche DInSAR e A-DInSAR, come quello della equivocazione delle misurazioni effettuate con tali tecniche per la presenza di neve. Argomento invece ricorrente, studiato e considerato in aree geografiche dove la presenza di ghiaccio e neve è pressoché perenne. L'applicazione della tecnica Avanzata DInSAR, proposta attraverso l'impiego del software SARPROZ, ha evidenziato una ottima capacità analitica nell'identificazione e monitoraggio delle deformazioni dei corpi continui, soggetti a movimenti lineari e non lineari e per l'analisi dei processi anomali legati al rumore, anche a scala di dettaglio.

Fig. 3 - Risultati dell'applicazione della tecnica A-DInSAR - identificazione, numerazione dei PS selezionati e dati di presa (anno/mese/giorno, Baseline normale e Baseline temporale).



La presenza della neve induce ad aumenti o ritardi del segnale radar nel suo cammino ottico - quindi, di fatto, alterando i valori delle serie temporali di ampiezza e di fase.

Tale fenomeno, considerate le precipitazioni medie annue, la durata media in giorni di permanenza del manto nevoso, la conformazione orografica e l'estensione delle aree soggette al fenomeno "presenza di neve", si parla di una percentuale di territorio che varia dal 15% al 18% per Italia.

I risultati sperimentali forniscono interessanti spunti di approfondimento ed evidenziano, per esempio, come sia essenziale, per il comportamento dei valori delle serie temporali di ampiezza rappresentati nelle Fig. 5 ID 146 e 171, prevedere ulteriori studi di approfondimento.

Questa tematica sicuramente non riguarda con sistematicità il territorio della Città di Roma ma, avendo riscontrato le stesse anomalie analizzando dati in banda C sul territorio aquilano, mi auspico possano divenire oggetto di più attenzione nei settori specifici di competenza.

Le attività legate anche in questa area di ricerca, oltre all'applicazione della tecnica A-DInSAR, impiego di standard e nuovi Radar Target passivi (Banda C e X), strumentazioni GPS, meteorologiche e per il monitoraggio in continuo del quadro fessurativo, nonché l'acquisizione e generazione della conoscenza degli elementi descrittivi per la definizione dell'interazione terreno-struttura in campo sismico, sono già oggetto di sub-progetti specifici in campo nazionale e internazionale, e sono parte integrante del Progetto *Early Warning System* della Fondazione Permanente G. Giuliani.

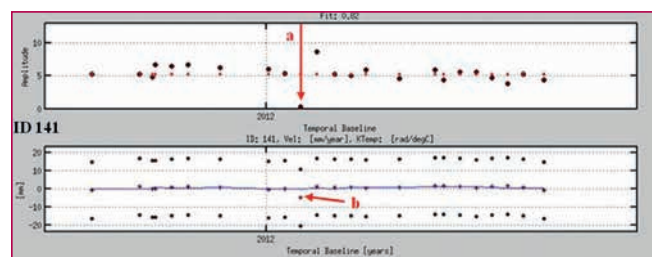


Fig. 4 - ID 141 Variazione di comportamento del valore di ampiezza (a) e del valore di fase (b) in data 201200204.

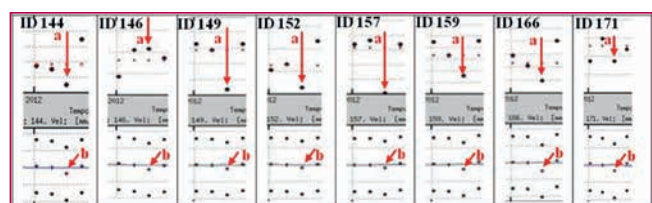


Fig. 5 - Variazione di comportamento del valore di ampiezza (a) e del valore di fase (b) in data 201200204 dei grafici relativi ai PS selezionati.

BIBLIOGRAFIA

Baghdadi, N., et al., (1999). Accuracy of wet snow mapping using simulated Radarsat backscattering coefficients from observed snow cover characteristics. *International Journal of Remote Sensing*, 20; pp. 2049-2068.

Berardino P., et al., (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 40; 2375-2383.

Bozzano, F., et al., (2011). Scenario di danneggiamento indotto nella città di Roma dalla sequenza sismica aquilana del 2009. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, vol. 2.

Casagli, N., et al., (2012). Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9 (4), S10.

Ferretti, A., et al., (2001). Permanent scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 39 (1); pp. 8-20.

Ferretti, A., et al., (2001) - Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions of Geoscience of Remote Sensing*, 39; pp. 8-20.

Ferretti, A., et al., (2003). Valutazione degli effetti di scavi in falda sui cedimenti strutturali di edifici mediante utilizzo di tecniche satellitari SAR. *Atti del Convegno - Crolli e affidabilità delle strutture*, Napoli.

Ferretti, A., et al., (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *Geoscience and Remote Sensing*,

IEEE Transactions on, 49(9); 3460-3470.

Fossati, D., (2003). Tecnologie innovative di telerilevamento satellitare per la gestione del territorio. The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy), *Engineering Geology*, 88(3-4); pp. 240-259.

Hallikainen, et al., (1993). Application of ERS-1 SAR data to snow mapping. *Proceedings of the First ERS-1 Symposium: Space at the Service of our Environment*, Cannes, France. ESA SP-359, vol.2; pp. 589-594.

Koskinen, J., et al., (1994). Capability of radar and microwave radiometer to classify snow types in forested areas. *IGRASS'94*, vol. 3; pp. 1283-1286.

Marsella, M.A., et al., (2008). Two-scale surface deformation analysis via the SBAS-DInSAR technique: a case study of the city of Rome, Italy. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29:6; pp. 1665-1684.

Marsella, M.A., et al., (2011). Long-term deformation analysis of historical buildings through the advanced SBAS-DInSAR technique: the case study of the city of Rome, Italy. *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 8; pp. 1-12.

Marsella M.A., (2012) Analysis of ground deformation using SBAS-DInSAR technique applied to Cosmo-SkyMed images, the test case of Rome urban area Proc. SPIE Remote Sensing 2012 Symposium.

Marsella, M.A., (2013) An application of the SBAS DInSAR technique for the assessment of structural damage in the city of Rome (Italy) *Submt to Structure and Infrastructure Engineering Maintenance, Management, Life-Cycle Designand Performance Taylor&Francis (inpress)*.

Perissin, D., et al, (2011). SARPROZ manual - link 9.

Perissin, D., et al, (2011a). Subway Tunnels Identification through Cosmo-SkyMed PSInSAR Analysis in Shanghai. In *Processing of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vancouver, BC, Canada, 24-29 July 2011; pp. 1267-1270.

Perissin, D., (2012). Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1); pp. 271-280.

Rott, H., et al., (1993). Snow and glacier investigation by ERS-1 SAR-first result. *Proceedings of the First ERS-1 Symposium: Space at the Service of our Environment*, Cannes, France. ESA SP-359, vol.2, pp. 577-582.

Stramondo, S., (2008). Subsidence induced by urbanization in the city of Roma detected by advance InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment* 112 (6); pp. 3160-3172.

LINK

- 1 <http://goo.gl/YwXPL2>
- 2 <http://goo.gl/rdF6Qe>
- 3 <http://goo.gl/y308i14>
- 4 <http://goo.gl/vthdrv>
- 5 <http://www.pcn.minambiente.it/GN/>
- 6 <https://tremaps.treuropa.com>
- 7 <http://webgis.irea.cnr.it/>
- 8 <http://www.pangeoproject.eu/>
- 9 <https://goo.gl/WkdHsE>

ABSTRACT

This work was created to focus the attention on a particular aspect of the equivocation (aliasing) of the measurements made with Differential SAR interferometry (DInSAR) X-band for the presence of snow. Such equivocation emerge after a careful interpretation of the results obtained through the application of techniques Advanced DInSAR (A-DInSAR) for the observation of the deformation phenomena of the monumental structures in the center of Rome. The qualitative analysis have enabled the identification of the appropriate tools of analysis.

The work was developed through the employment of various tools of software SARPROZ and is part of a PhD in Geoinformation for the University of Tor Vergata.

PAROLE CHIAVE

A-DInSAR; NEVE; COSMO-SKYMED; EQUIVOCAZIONE

AUTORE

MASSIMO MORIGI
MORIGI@INNOVAZIONIPERLATERRA.ORG

PH.D. IN GEOINFORMAZIONE
UNIVERSITÀ TOR VERGATA, ROMA



Sai cosa c'è sotto?

GSSI presenta il nuovo georadar SIR-4000 ad alte prestazioni, per una veloce visualizzazione del sottosuolo già in campo.



Il nuovo georadar per rilievi 3D in tempo reale

La nuova centralina SIR-4000 permette una nuova elaborazione dei dati già in campo. Quindi immediata interpretazione, visualizzazione 3D in tempo reale, maggiore velocità di rilievo, interfaccia robusta, facilitata dal touchscreen...

Ideale per le applicazioni in campo, sfrutta sia le nuove antenne digitali che le analogiche già sul mercato:

- > Archeologia
- > Indagini prescavo
- > Ricerca cavità e oggetti interrati
- > Analisi di muri e strutture

Codevintec Italiana
via Labus 13 - Milano
tel. +39 02 4830.2175
info@codevintec.it
www.codevintec.it



CODEVINTEC
Tecnologie per le Scienze della Terra