

Interferometria SAR Differenziale per il Rilevamento di Deformazioni

B. Crippa^a, M. Crosetto^b, E. Biescas^b, C. Paleari^a

^aDipartimento di Scienze della Terra - Sezione di Geofisica - Università degli Studi di Milano
Via Cicognara 7 - 20129 Milano (Italy) – bruno.crippa@unimi.it

^bInstitute of Geomatics, Avda. del Canal Olímpic, s/n, E-08860 Castelldefels (Barcelona) Spain
michele.crosetto@ideg.es, erlinda.biesca@ideg.es

Riassunto

Nel presente lavoro si focalizza l'attenzione sulle deformazioni del terreno identificate e rilevate mediante la tecnica SAR interferometrica differenziale (DInSAR). DInSAR rappresenta una tecnica relativamente nuova nel panorama delle metodologie per il rilevamento di deformazioni della superficie del terreno a partire da osservazioni satellitari. Essa ha dimostrato la sua capacità di misurare deformazioni della superficie terrestre dovute a processi naturali o antropici quali: dinamica dei ghiacciai, vulcani, frane, terremoti, estrazioni di fluidi dal sottosuolo (acqua, petrolio, gas), estrazioni minerarie. Il lavoro illustra i punti salienti di una procedura di trattamento di dati DInSAR messa a punto dagli autori per la stima di velocità di deformazione ad andamento non lineare. La procedura presentata è applicata ad un set di dati simulati che riproduce l'andamento di una subsidenza reale.

Abstract

The differential interferometric SAR technique represents a powerful remote sensing tool for the monitoring of terrain deformations. The paper concisely describes the properties of the differential interferometric phase, which represents the main observation for the estimation of the deformations. Then the paper discusses the main features of a new interferometric SAR procedure which applies an integrated approach for the treatment of DInSAR observations. In particular, the interferometric SAR processing and the least squares adjustment procedure to estimate the terrain deformations velocity are described. Finally an application of the proposed procedure is illustrated over simulated data.

1. Introduzione

DInSAR presenta alcuni vantaggi rispetto alle tecniche tradizionali di rilevamento delle deformazioni: disponibilità di serie storica decennale; ampia zona di monitoraggio di circa 10000 km²; alta densità di punti in cui è misurabile la deformazione; precisione della misura ottenuta sub-centimetrica in condizioni ottimali. DInSAR presenta anche dei punti di debolezza rispetto alle tecniche tradizionali: scarsa affidabilità della misura in presenza di bassa coerenza; misura della componente della deformazione lungo la "linea di vista del satellite"; notevole quantità di dati da trattare ed elaborazioni onerose; misura della deformazione influenzata da effetti atmosferici.

Il lavoro inizia con una discussione delle principali caratteristiche della tecnica DInSAR. In seguito presenta una particolare metodologia di elaborazione dei dati interferometrici che permette derivare una completa descrizione dell'evoluzione nel tempo del fenomeno di deformazione osservato. La metodologia è illustrata con dati interferometrici simulati.

Tecnica differenziale DInSAR

L'approccio classico DInSAR è basato su due immagini, ovvero sulla costruzione e l'elaborazione di un singolo interferogramma. Tuttavia, il fattore chiave per monitorare quantitativamente un

fenomeno di deformazione è la disponibilità di un alto numero di immagini SAR sulla zona di studio, per un periodo di tempo funzione della dinamica e entità della deformazione stessa.

La procedura qui presentata è basata sull'utilizzo di una serie di immagini SAR, che trattate con la tecnica interferometrica differenziale, costituiscono la base di partenza per la costruzione di interferogrammi coregistrati tra loro (*stack*). Si discutono tre caratteristiche importanti di tale tecnica: il calcolo del valore della fase interferometrica differenziale a partire dal valore principale di fase (*phase unwrapping*), l'utilizzo dello *stack*, e la procedura di compensazione impiegata per la stima della deformazione.

Il primo punto fondamentale della procedura è lo srotolamento della fase interferometrica (*phase unwrapping*). Questo è un passo che presenta notevoli difficoltà in entrambe le procedure InSAR e DInSAR: l'interferogramma differenziale contiene infatti il valore principale della fase, ovvero essa è nota a meno di multipli interi di 2π . Per ricavare il valore completo della fase è quindi necessario trovare il multipli interi di 2π da aggiungere al valore principale della fase interferometrica:

$$\varphi_u = \varphi_w \pm 2N\pi \quad [1]$$

Al questo scopo si sono sviluppate diverse strategie globali e locali, quella qui utilizzata è basata sull'algoritmo del *Minimum Cost Flow* (MCF). L'algoritmo MCF lavora su punti sparsi connessi da una rete a maglia triangolare. La proprietà più rilevante di questo algoritmo di *unwrapping* è che i punti della rete sono scelti in base al valore di coerenza della fase: questo permette di escludere punti con valori di fase contenente un livello di rumore elevato. Con questa procedura è possibile disporre di misure di deformazione solo su zone che mantengono alta coerenza per lunghi periodi di tempo. Tipicamente questo avviene in zone urbane, sub-urbane ed aree industriali nelle quali le proprietà fisiche e geometriche delle superfici colpite dall'impulso del radar rimangono costanti o poco variabili nel tempo.

Lo *stack* è costruito co-registrando accuratamente tutte le immagini rispetto ad una singola immagine (*master*), scelta arbitrariamente come geometria di riferimento. Si noti che la successiva costruzione di interferogrammi non obbliga ad utilizzare la stessa *master*. Infatti è possibile costruire un interferogramma prendendo due immagini qualsiasi dallo *stack*. Questa flessibilità nel poter scegliere qualsiasi coppia di immagini offre una ampia scelta di combinazioni nei valori di base temporale e spaziale, che sono due dei parametri fondamentali per la costruzione di interferogrammi. Inoltre la co-registrazione deve essere molto accurata in modo che ai singoli pixel componenti lo *stack* corrisponda sempre la stessa "impronta a terra".

Il programma adottato permette di selezionare, tra gli interferogrammi che costituiscono lo *stack*, i pixel a cui sono associate alte coerenze, escludendo quei pixel che presentano valori di coerenza inferiori ad un limite scelto dall'utente. Per limitare il carico computazionale delle elaborazioni l'utente può definire l'area di interesse da analizzare; la procedura esclude tutti i pixel non appartenenti alla zona di interesse. La procedura può essere utilizzata per due tipi di analisi: uno studio preliminare ed uno più approfondito. Negli studi preliminari si tende ad utilizzare un ristretto numero di immagini ed estendere la zona di interesse a tutta l'immagine. L'obiettivo di questa fase è individuare zone con fenomeni deformativi rilevanti e facilmente evidenziabili. Successivamente, per un'analisi più approfondita si incrementa il numero di immagini e si focalizza l'attenzione sulle zone di interesse identificate nella fase precedente o note acquisendo informazioni esterne. In questo secondo caso si adottano tipicamente maschere limitanti l'area di studio. Una seconda maschera che definisce un'area ritenuta stabile, deve invece venire necessariamente introdotta allo scopo di fissare il "datum" per il calcolo delle deformazioni. La procedura calcola, per ogni interferogramma, la media del valore della fase sull'area stabile; questo valore costituisce la costante di integrazione del *phase unwrapping*, e quindi si sottrae ai valori di fase dell'area di interesse.

Processo di compensazione integrata

Il metodo DInSAR si basa sul calcolo della fase interferometrica differenziale a partire da due acquisizioni SAR sulla stessa area. La fase interferometrica differenziale è legata a diversi fattori, quali il residuo topografico, gli effetti atmosferici, il rumore (*noise*), e le eventuali deformazioni avvenute nell'intervallo temporale tra due acquisizioni. Possiamo quindi scrivere:

$$\Delta\Phi_{\text{int}} = \Phi_{\text{mov}} + \Phi_{\text{etopo}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_{\text{noi}} \quad [2]$$

La modellizzazione delle deformazioni è un'operazione complessa poiché ci sono molteplici comportamenti temporali e spaziali (effetti globali, locali, stagionali, ecc.) che interagiscono. In generale la descrizione completa di una deformazione deve essere spazio-temporale, cioè legata a dinamiche nello spazio (descrizione areale del fenomeno fissato il tempo), e del tempo (evoluzione temporale di un punto).

La separazione della componente della fase relativa al movimento dalle restanti componenti della fase (residuo topografico, effetto atmosferico e rumore) in questo lavoro è condotta per mezzo di una compensazione integrata. Per la componente della fase di movimento viene adottato un modello che utilizza una funzione lineare su intervalli nei quali si assume la velocità costante. Con un approccio stocastico si cerca di ricostruire la componente atmosferica e la parte non lineare del movimento presente nella fase differenziale. Queste componenti sono stimate usando la tecnica della collocazione a minimi quadrati. Il modello adottato è il seguente:

$$\Phi(t_i, l, k) = \Sigma v(l, k) \cdot \Delta t_j + s_{t_i}(l, k) + n_{t_i}(l, k) \quad [3]$$

dove:

t_i è il tempo di acquisizione dell'immagine i -esima,
 l, k sono le coordinate del pixel.

Il primo termine rappresenta il modello deterministico (la funzione lineare su intervalli), che tiene conto delle velocità incognite, $v_j(l, k)$, una per ciascun intervallo j .

Il secondo termine, $s_{t_i}(l, k)$, rappresenta la parte residua correlata spazialmente del modello deterministico; è costituita dalla componente atmosferica e dalla deformazione non lineare. Queste due componenti saranno successivamente separate per mezzo di un filtro temporale, $n_{t_i}(l, k)$ è il rumore decorrelato temporalmente e spazialmente.

La procedura completa prevede i seguenti passaggi:

- 1) stima a minimi quadrati utilizzando solo il modello deterministico.
- 2) analisi stocastica dei residui del modello deterministico, $r_{t_i}(l, k) = s_{t_i}(l, k) + n_{t_i}(l, k)$.

L'obiettivo è quello di evidenziare un segnale stocastico nella componente residua dovuta all'atmosfera e al movimento non lineare. L'operazione viene svolta calcolando la funzione di autocovarianza empirica (EAF) dei residui provenienti dal modello deterministico; successivamente si cerca la funzione di autocovarianza modello (MAF), e infine si costruisce la matrice di varianza e covarianza.

Tale matrice entra nella compensazione integrata che stima per ogni pixel le velocità $v_j(l, k)$, il segnale $s_{t_i}(l, k)$ dovuto al movimento non lineare ed all'atmosfera, e il rumore $n_{t_i}(l, k)$. Il modello adottato per l'approccio integrato è:

$$\Phi = Ax + s + n \quad [4]$$

$$D(\Phi) = C_{ss} + C_{nn} + C_{\Phi\Phi} = C_{ee} \quad [5]$$

dove:

- Φ è il vettore delle osservabili,
- A è la matrice disegno,
- x è il vettore delle velocità di deformazione incognite,
- s è la componente della fase legata all'atmosfera e/o alla deformazione non lineare,
- n è il rumore,
- D è la matrice di varianza e covarianza.

La soluzione a minimi quadrati si ottiene imponendo una norma ibrida sul sistema costituito dalle due equazioni:

$$\Phi = Ax + e \quad [6]$$

$$e = s + n \quad [7]$$

La soluzione a minimi quadrati con norma ibrida:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= (A^T C_{ee}^{-1} A)^{-1} A^T C_{ee}^{-1} \Phi \\ \hat{e} &= \Phi - A(A^T C_{ee}^{-1} A)^{-1} A^T C_{ee}^{-1} \Phi = [I - A(A^T C_{ee}^{-1} A)^{-1} A^T C_{ee}^{-1}] \Phi \equiv H\Phi \\ \hat{s} &= C_{ss} C_{ee}^{-1} \hat{e} = C_{ss} C_{ee}^{-1} (\Phi - A\hat{x}) \\ \hat{n} &= C_{nn} C_{ee}^{-1} (\Phi - A\hat{x}) \end{aligned} \quad [8]$$

Applicando infine la legge di propagazione della covarianza è possibile ricavare la matrice di varianza e covarianza delle quantità stimate. Per la verifica della bontà delle stime effettuate è necessario controllare che il *noise* abbia una funzione di covarianza tipica di un processo a “rumore bianco” (massimo centrale e valori di autocovarianza nulli).

Filtro Temporale

L'obiettivo di questo passaggio è la separazione della parte non lineare del movimento dalla componente atmosferica, all'interno del segnale stimato nell'approccio integrato descritto in precedenza. Per raggiungere questo obiettivo si osserva che la componente atmosferica è correlata soltanto spazialmente, mentre la deformazione non-lineare mostra un comportamento spazio-temporale correlato.

Il processo viene sviluppato applicando un filtro, che opera sulla parte temporale del segnale $s_i(l, k)$, La procedura prevede la stima di EAF, MAF, sul segnale utilizzando come parametro il tempo e calcolando la matrice di varianza e covarianza da utilizzare nella fase successiva della collocazione a minimi quadrati (sempre nel tempo). Questa operazione cerca di separare all'interno del segnale $s_i(l, k)$ quella parte “liscia” del movimento legata al tempo e mettendo nella parte residua le componenti non correlate temporalmente (atmosfera).

Risultati

La procedura descritta è stata applicata a un set di dati simulati che riproducono una deformazione. In figura 1 è riportato l'evoluzione temporale di un punto; si noti il comportamento temporale non lineare della deformazione stessa. Su questo insieme di dati si è applicato un modello di velocità di tipo lineare (vedere la figura 2), ottenendo così la mappa delle velocità e dei residui (figura 3). Come evidenziato in precedenza i residui ottenuti contengono la parte non lineare della deformazione, il contributo dovuto agli effetti atmosferici e il *noise*.

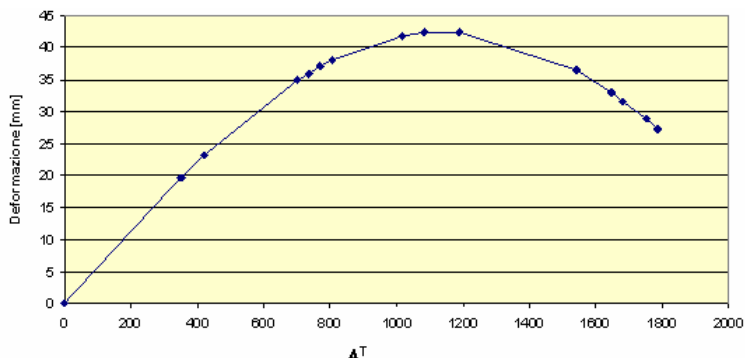


Figura 1 – Profilo con evoluzione temporale della deformazione simulata.

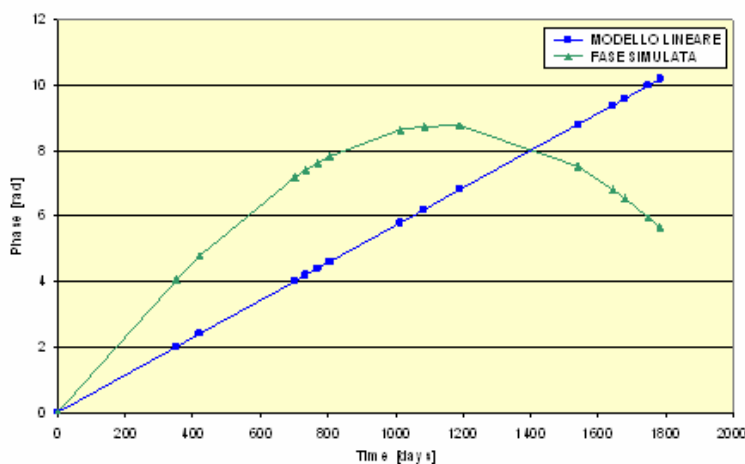


Figura 2 – Profilo temporale di un pixel, in cui sono a confronto i valori di fase simulati con i valori relativi al modello lineare.

Sui residui si è applicata la procedura stocastica per evidenziare la presenza di un eventuale segnale contenente il movimento non lineare e la componente atmosferica (filtro con collocazione bidimensionale). Sulla componente del segnale stimato si applicato un filtro temporale per la separazione del movimento con gli effetti atmosferici considerando questi ultimi decorrelati temporalmente (figura 4). In questo caso la procedura dà risultati soddisfacenti, riuscendo a separare le componenti movimento non lineare e atmosfera. Ulteriori sperimentazioni dovranno essere condotte su insiemi di dati reali al fine di verificare la validità della procedura proposta.

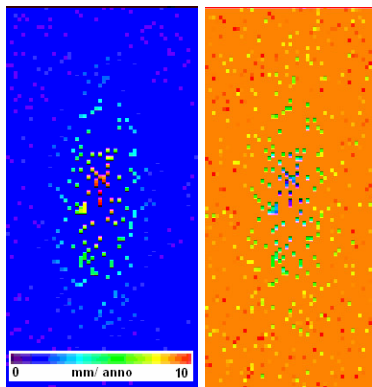


Figura 3 – (a) Velocità di deformazione stimate. (b) Residuo del modello deterministico.

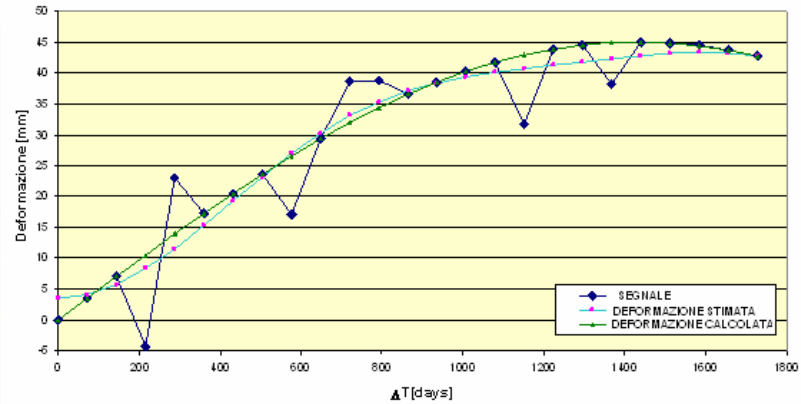


Figura 4 Esempio di filtro temporale, considerando tre diversi data set: il segnale input, la parte temporalmente correlata del segnale, che rappresenta la componente non lineare del movimento (deformazione stimata), la deformazione non lineare simulata, che può essere utilizzata per controllare la qualità della deformazione stimata.

Bibliografia

- [1]. Hanssen, R., 2001. Radar interferometry. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland, p. 308.
- [2]. Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., Adragna, F., 1994. Radar interferometry mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature*, 369:227-230.
- [3]. Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, 375:567-570.
- [4]. Amelung, F., Jonson, S., Zebker, H.A., Segall, P., 2000. Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galápagos volcanoes observed with radar interferometry. *Nature*, 407:993-996.
- [5]. Carnec, C., Massonnet, D., King, C., 1996. Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent. *Geophysical Research Letters*, 23(24):3579-3582.
- [6]. Kimura, H., Yamaguchi, Y., 2000. Detection of landslide areas using satellite radar interferometry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(3):337-344.
- [7]. Amelung, F., Galloway, D.L., Bell, J.W., Zebker, H.A., Lacznia, R.J., 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27(6):483-486.
- [8]. Tesauro, M., Berardino, P., Lanari, R., Sansosti, E., Fornaro, G., Franceschetti, G., 2000. Urban subsidence inside the city of Napoli (Italy) observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27(13):1961-1964.
- [9]. Strozzi, T., Wegmuller, U., Tosi, L., Bitelli, G., Spreckels, V., 2001. Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. *Photogrammetric Eng. & Remote Sensing*, 67(11):1261-1270.
- [10]. Agudo, M., Biescas, E., Monserrat, O., Martínez, J., Crosetto, M., Herrera, G., 2005. ¿Cómo medir las deformaciones del terreno con teledetección radar? 6ª Sem. Geomàtica, Barcelona, 8-11 Febrero 2005.
- [11]. Baarda, W., 1968. A testing procedure for use in geodetic networks. Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, 2 (5), Delft (Holland).
- [12]. Dermanis A. Kriging and collocation: A comparison. *Manuscripta Geodaetica*, 9(3), 159– 167, 1984.