

# Il monitoraggio degli spostamenti con Interferometria SAR Terrestre

di Paolo Mazzanti

Circa un anno fa l'autore del presente articolo è stato invitato a scrivere una nota sull'Interferometria SAR Terrestre per una rivista internazionale specializzata sul monitoraggio geotecnico. A un anno di distanza ha ritenuto di interesse tradurre e aggiornare quel lavoro al fine di renderlo più facilmente fruibile alla comunità geomatica italiana.

La comunità geologica e geotecnica sta mostrando negli ultimi anni un crescente interesse nei confronti delle tecnologie di monitoraggio di ultima generazione e, in particolare, di quelle appartenenti all'ambito della geomatica. Le tecniche di telerilevamento sono sicuramente tra le innovazioni principali nel campo del monitoraggio geotecnico in quanto stanno introducendo la filosofia del monitoraggio "non a contatto". In altre parole, attraverso le tecniche di telerilevamento, è possibile monitorare alcuni parametri geotecnici (es. spostamento) con strumentazioni posizionate a distanza rispetto all'area da rilevare. Alcune strumentazioni terrestri per il telerilevamento, come le stazioni totali manuali o robotizzate e i GPS (Global Positioning Systems), sono ormai accettate e comunemente utilizzate, ma non possono essere considerate delle vere e proprie tecniche "remote" poiché necessitano di riflettori o sensori sul terreno o sulle strutture monitorate. Tra le tecniche remote terrestri "non a contatto" per la misura degli spostamenti può essere invece inclusa l'Interferometria SAR Terrestre.

I primi prototipi di strumentazioni TInSAR (o GBInSAR secondo diversa nomenclatura) furono sviluppati sul finire degli anni '90 e le prime strumentazioni commerciali risalgono agli anni 2005-2006 (Figura 1). Otto anni di esperienza sull'Interferometria SAR Terrestre hanno consentito all'autore del presente articolo di seguire gli sviluppi della tecnica dalle sue prime sperimentazioni fino alle applicazioni

di lungo termine su problematiche geotecniche complesse.

Si riportano di seguito i principi di base della tecnica TInSAR, insieme a una dettagliata descrizione delle sue caratteristiche tecniche e operative, dei principali vantaggi e limiti oltre ad alcune lezioni apprese da applicazioni pratiche.

## Basi teoriche e caratteristiche tecniche

L'Interferometria SAR Terrestre (Luzi 2010; Mazzanti, 2011) è una tecnica per il monitoraggio degli spostamenti che si basa sugli stessi principi operativi della più nota Interferometria SAR Satellitare (Massonet & Fiegl 1998). Il principio SAR consiste nella

combinazione di molteplici immagini radar acquisite mentre le antenne di trasmissione e di ricezione del segnale si muovono lungo una traiettoria predefinita (un'orbita nel caso di satelliti, una rotta nel caso di aerei o un binario nel caso di strumentazioni terrestri) (Figura 2). In questo modo, attraverso un processo di focalizzazione delle immagini radar acquisite durante il movimento delle antenne, è possibile ottenere immagini SAR bidimensionali.

Le immagini, così acquisite, sono caratterizzate da una risoluzione in *range* (direzione congiungente strumento-scenario) e in *cross-range* (direzione ortogonale a quella di *range* sul piano orizzontale) (Figura 2).



Figura 1 - Esempio di interferometro SAR terrestre modello IBIS-L installato su piattaforma QUIB™.

L'immagine SAR che ne deriva è costituita quindi da numerosi pixel, le cui dimensioni e quantità sono strettamente legate alla distanza radar-scenario e alle caratteristiche strumentali.

Attraverso il confronto delle informazioni di fase (principio interferometrico) di ogni pixel omologo tra due o più immagini SAR acquisite in tempi diversi (purché dalla medesima stazione di misura), è possibile stimare lo spostamento lungo la linea di vista dello strumento, mediante la seguente equazione:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi$$

dove  $d$  è lo spostamento,  $\lambda$  è la lunghezza d'onda del segnale radar e  $\Delta\phi$  è la differenza di fase tra due acquisizioni. Il risultato finale del monitoraggio TInSAR è un insieme di immagini 2D in falsi colori nelle quali lo spostamento verificatosi nell'intervallo di tempo fra due acquisizioni può essere identificato e misurato nella componente parallela alla linea di vista. (Figura 3). Inoltre, qualora vengano acquisite numerose immagini SAR nel tempo, è possibile ottenere per ogni pixel dell'immagine la relativa serie temporale di spostamento (Figura 3). La risoluzione dei pixel di un'immagine SAR è compresa tra pochi decimetri e alcuni metri (in funzione delle caratteristiche strumentali e della distanza di monitoraggio) e l'accuratezza nella misura degli spostamenti varia tra alcuni decimi di millimetro e alcuni millimetri (principalmente in funzione della distanza di monitoraggio e delle condizioni atmosferiche). Per fare un esempio, a una distanza di circa 1 km le più comuni strumentazioni commerciali hanno una risoluzione in range di circa 0,5 m e una risoluzione in cross-range di 4 m. La portata massima in range è solitamente di alcuni km con una frequenza massima di campionamento del dato di pochi minuti. Gli attuali sviluppi della tecnica mirano tuttavia a una maggiore velocità di acquisizione e alla riduzione delle dimensioni strumentali.

### Vantaggi e limiti

Come già accennato, il TInSAR è una delle poche tecniche di telerilevamento delle deformazioni realmente "non a contatto", poiché non necessita dell'installazione di sensori o riflettori nell'area da monitorare. Questo è probabilmente uno dei maggiori vantaggi della tecnica soprattutto se si considera che l'accesso

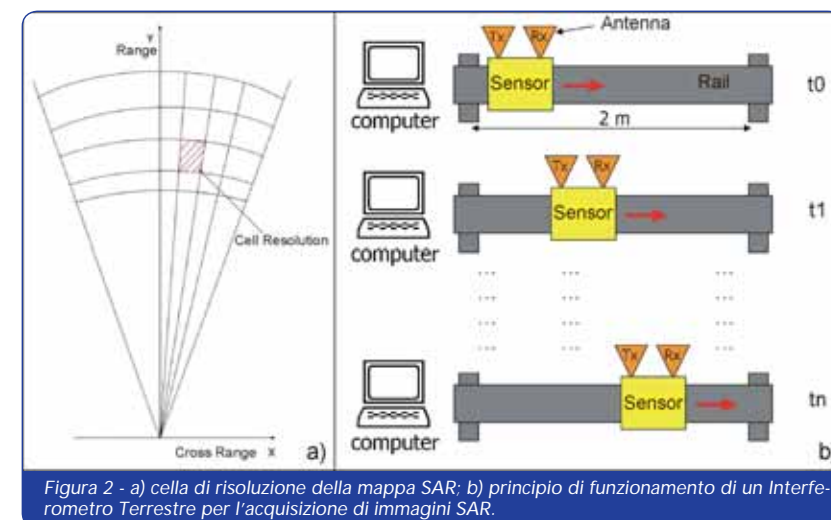


Figura 2 - a) cella di risoluzione della mappa SAR; b) principio di funzionamento di un Interferometro Terrestre per l'acquisizione di immagini SAR.

all'area da rilevare è spesso pericoloso (ad esempio nel caso di frane attive), difficoltoso (ad esempio nel caso di scarpate verticali) o proibito dalle autorità competenti (come avviene spesso nel caso dei monumenti di particolare pregio storico e architettonico). In certi casi, inoltre, i movimenti di un versante possono essere talmente rapidi che i sensori installati subiscono danneggiamenti e diventano così inattendibili o addirittura inutilizzabili. Un ulteriore vantaggio della tecnica TInSAR risiede nella capacità di monitorare un'intera area invece di singoli punti, riducendo così gli errori di interpretazione che possono verificarsi con le tecniche di monitoraggio puntuali. Le immagini TInSAR possono essere viste, quindi, come una fitta rete di sensori (pixel) che acquisisce dati simultaneamente su tutta l'area di monitoraggio. Questo comporta numerosi vantaggi tra i quali:

- aumentare l'affidabilità statistica degli spostamenti monitorati, in quanto essi vengono registrati su molti pixel adiacenti;
- monitorare aree estese, consentendo così di evitare il rischio di sottostimare l'estensione dell'area in movimento;
- identificare la distribuzione spaziale degli spostamenti e il loro gradiente.

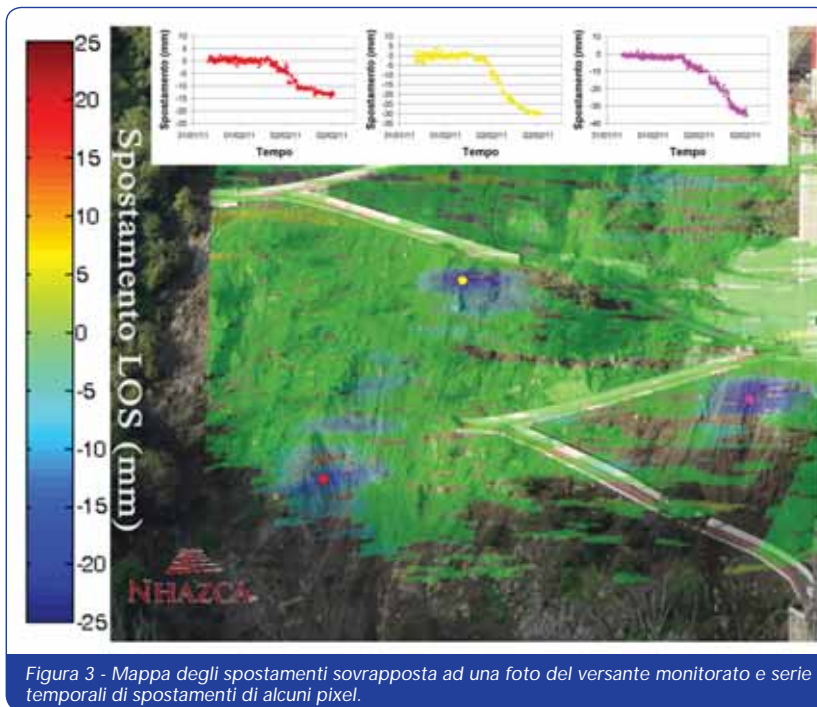
Un altro vantaggio della tecnica TInSAR è la completa operatività in ogni condizione meteo (pioggia, nuvole, nebbia ecc.) e di illuminazione (giorno e notte) grazie all'utilizzo di un segnale nel dominio delle microonde (Banda Ku). Altre caratteristiche come l'elevata frequenza di campionamento del dato (pochi minuti), l'elevata portata strumentale (fino ad alcuni chilometri) e l'elevata accuratezza nel-

la misura degli spostamenti, rendono la tecnica TInSAR una valida soluzione per molteplici problemi nell'ambito del monitoraggio geotecnico e strutturale.

Tuttavia, non possono essere sottovalutati alcuni limiti della tecnica, su tutti le difficoltà nel gestire, processare ed interpretare i dati. In caso di uso scorretto o di analisi dei dati di scarsa qualità è possibile, infatti, ottenere dei risultati errati o fuorvianti. Numerose sono comunque anche le limitazioni intrinseche della tecnica tra le quali:

- la strumentazione è costituita da elementi ingombranti, tra cui un binario di lunghezza spesso superiore a 2 m;
- il cono di vista dell'area monitorabile da un solo sensore è limitato ad alcune decine di gradi nella direzione orizzontale e verticale (variabile in funzione delle antenne impiegate);
- lo spostamento può essere misurato solo lungo la linea di vista strumentale, per cui viene misurata solo una componente dello spostamento reale;
- lo spostamento tra due immagini SAR consecutive può essere misurato senza ambiguità solo se la differenza di fase è minore di un quarto della lunghezza d'onda (circa 4,5 mm per la tipica frequenza dal segnale utilizzato dalle principali strumentazioni commerciali).

Tuttavia, tali limiti possono essere attenuati tramite un'attenta e dettagliata pianificazione del monitoraggio, ovvero tramite la scelta dell'opportuno sito di installazione degli strumenti ed un'attenta progettazione da parte di personale esperto. Per esempio, attraverso una geometria



di installazione il più possibile parallela alla direzione di spostamento si può attenuare il problema della misura unidirezionale dello spostamento. Attraverso un'elevata frequenza di campionamento del dato, invece, può essere fortemente ridotto il limite causato dall'ambiguità di fase.

#### Confronto con le tecniche tradizionali

Il primo confronto della tecnica TInSAR è necessariamente con l'Interferometria SAR Satellitare (SInSAR), visto che le due tecniche condividono i medesimi principi operativi. Tuttavia, essendo basate su piattaforme del tutto differenti (rispettivamente terrestre e satellitare), le differenze tra le due tecniche sono considerevoli, soprattutto per quanto riguarda i risultati attesi. La tecnica SInSAR è particolarmente adatta per il monitoraggio di porzioni estese di territorio caratterizzate da movimenti lenti (subsidenza, deformazioni vulcaniche, regioni tettonicamente attive ecc.), mentre la tecnica TInSAR è più adatta per il monitoraggio in continuo e di dettaglio di aree di limitata estensione areale (fino ad alcuni km<sup>2</sup>), caratterizzate sia da movimenti lenti che da movimenti rapidi (versanti e singole scarpate instabili, fianchi vulcanici, singole strutture o edifici ecc.). Inoltre, la tecnica SInSAR, a causa della bassa frequenza di acquisizione delle immagini (da alcuni giorni fino ad alcuni mesi, a seconda dei satelliti utilizzati), è difficilmente applicabile al monitoraggio in condizioni di emer-

genza ove sia necessaria un'osservazione continua, mentre è più adatta come mezzo di indagine conoscitiva grazie anche alla disponibilità di un archivio di immagini storiche a partire dal 1992. Diversamente, le immagini SAR terrestri possono essere acquisite solo a seguito dell'installazione delle strumentazioni dedicate.

Di seguito viene presentato, invece, un confronto della tecnica TInSAR con le Stazioni Totali Robotizzate (RTS) visto che le due tecniche sono spesso utilizzate per applicazioni simili. Prima di tutto, la tecnica RTS è basata su tecnologia laser (ed emette, pertanto, segnali nel campo del visibile e dell'infrarosso vicino), mentre la tecnica TInSAR su tecnologia radar (emette segnali nel campo delle microonde). Dal punto di vista operativo, la principale differenza sta nel fatto che la tecnica TInSAR, a differenza delle RTS, è in grado di operare anche con la presenza di nebbia e di precipitazioni. Inoltre, la tecnica TInSAR non richiede l'installazione di sensori o target nell'area oggetto di monitoraggio che sono invece necessari per la tecnica RTS (fatte eccezione per alcune applicazioni denominate "reflectorless"). Questa caratteristica risulta fondamentale per il monitoraggio di monumenti o di aree dove la sicurezza per le persone non è garantita.

Di contro, la tecnica TInSAR è in grado di misurare i soli spostamenti lungo la propria linea di vista, mentre la tecnica RTS è in grado di misurare gli spostamenti lungo le tre direzioni spaziali.

L'accuratezza nella misura dello spostamento è difficilmente paragonabile poiché dipende dalle tecniche di processing adottate e dalle condizioni sito-specifiche; tuttavia, esperimenti condotti in condizioni ideali hanno dimostrato come sia possibile ottenere accuratèzze paragonabili, nell'ordine del mm o di alcuni decimi di mm.

#### Applicazioni di successo

Numerose applicazioni di successo svolte negli ultimi anni hanno dimostrato l'utilità e la versatilità della tecnica TInSAR per il monitoraggio di diverse problematiche in ambito geotecnico ed ingegneristico-strutturale e in particolare per il monitoraggio in continuo e in situazioni di emergenza. La recente applicazione per il monitoraggio di un versante che insiste su un'invaso artificiale in una regione montana (ad oltre 3.000 m s.l.m.), dove le condizioni atmosferiche cambiano repentinamente, ha permesso di dimostrare sul campo l'efficacia della tecnica TInSAR in qualsiasi condizione meteo.

L'applicazione più complessa nella quale l'autore è direttamente coinvolto consiste nel monitoraggio di un versante instabile dove è in via di realizzazione una galleria stradale.

Il versante, caratterizzato da una frana di grandi dimensioni, risultava difficilmente monitorabile con tecniche tradizionali in sito (inclinometri, Stazioni Totali, GPS) a causa della topografia accidentata e delle attività lavorative in corso che determinavano un continuo cambiamento della configurazione del versante. L'Interferometria SAR Terrestre è risultata essere la tecnica con i minori limiti operativi e una delle poche in grado di garantire il monitoraggio in continuo 24 ore al giorno con una elevata frequenza di campionamento del dato. Il sistema interferometrico è stato installato in posizione frontale e alla distanza di circa 1 km così da avere una visione completa dell'intero versante e misurare nel tempo gli spostamenti di tutti i suoi settori costituiti in parte da elementi naturali (copertura detritica, rocce affioranti) e in parte da strutture antropiche (gabbionate, paratie, pareti chiodate e tirantate ecc.). Oltre 4 anni di monitoraggio in continuo (tutt'ora in atto) con la tecnica TInSAR hanno consentito ai progettisti di prendere delle decisioni efficaci, come quella di interrompere gli scavi a seguito del repentino aumento delle velocità di spostamento, dimostrando così l'affidabilità della tecnica e la sua efficacia anche in condizione particolarmente complesse.



Oltre al caso sopra descritto, negli ultimi anni la tecnica TInSAR è stata utilizzata per numerose problematiche di instabilità gravitativa, sia per scopi di controllo che con finalità di indagine quali analisi di suscettibilità di scarpate in roccia e delimitazione con precisione di settori di scarpate, versanti o strutture antropiche affette da deformazioni.

La nuova sfida della tecnica è tuttavia rappresentata dal monitoraggio di strutture antropiche (edifici, infrastrutture, monumenti ecc.) in aree urbane: se da una parte, infatti, essa offre il grande vantaggio di avere immagini di spostamento molto accurate completamente in remoto, dall'altro presenta il grande limite della misura degli spostamenti lungo la linea di vista che in molti casi rende difficile il controllo della componente verticale del movimento (tutt'altro che trascurabile in questi contesti). Per tali applicazioni quindi, l'integrazione con le tradizionali tecniche di monitoraggio risulta a tutt'oggi un requisito fondamentale.

**Conclusioni e prospettive future**

L'Interferometria SAR Terrestre è una tecnica emergente nel campo del monitoraggio delle deformazioni. Sebbene nella pratica comune non sia ancora impiegata diffusamente, la sua affidabilità e utilità è stata provata in numerose applicazioni di carattere geotecnico e strutturale quali frane e dighe, ed è molto promettente anche per il controllo di scarpate e opere antropiche. Il costo elevato della strumentazione e la complessità nell'elaborazione e nell'interpretazione dei dati possono essere considerate le principali limitazioni alla diffusione della tecnica. Tuttavia, il monitoraggio TInSAR può essere più efficace di altre strumentazioni e, in taluni casi, anche meno costoso se inquadrato all'interno di un dettagliato piano di indagine.

**Abstract**

**Displacement monitoring by Terrestrial SAR Interferometry**

Remote sensing techniques are one of the main innovation in the field of geotechnical and structural monitoring, since they are changing the philosophy from "contact" to "non-contact" monitoring. Over the last years Terrestrial SAR Interferometry (TInSAR) has proven to be one of the most effective solutions for the fully remote and accurate monitoring of mm displacement.

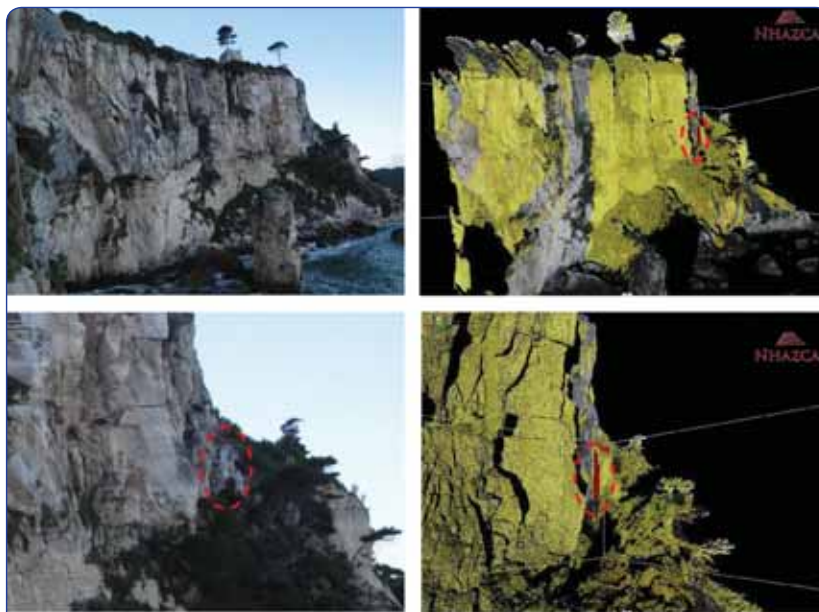


Figura 4 - Foto di una falesia nella Penisola del Gargano (a sinistra); mappe di spostamento 3D ottenute dalla combinazione delle immagini TInSAR e dei dati TLS (a destra): il colore giallo identifica zone stabili, mentre il colore rosso identifica settori soggetti a spostamenti.

Inoltre, l'integrazione dei dati TInSAR con quelli di altre tecniche, come il Laser Scanner Terrestre e le Stazioni Totali, può contribuire a rafforzarne l'efficacia e a semplificarne l'interpretazione dei risultati (Figura 4). E' importante sottolineare che in ambito nazionale esistono alcune aziende altamente specializzate nella fornitura di servizi di monitoraggio con tecnica TInSAR che possono rendere tale soluzione facilmente accessibile anche ai meno esperti.

**Bibliografia**

- Luzi G. (2010) Ground based SAR interferometry: a novel tool for Geoscience. Geoscience and Remote Sensing New Achievements, 1-26
- Massonet D. & Fiegl K.L. (1998) Radar Interferometry and its application to changes in the earth's surface. Reviews of Geophysics, 36(4), 441-500
- Mazzanti P. (2011) Displacement Monitoring by Terrestrial SAR Interferometry for Geotechnical Purposes. Geotechnical instrumentation news (Giugno 2011), 25-28.

**Parole chiave**

MONITORAGGIO REMOTO, MAPPE DI SPOSTAMENTO, RADAR, SERIE TEMPORALI DI SPOSTAMENTO.

**Acronimi**

GPS: GLOBAL POSITIONING SYSTEM  
 RTS: ROBOTIC TOTAL STATION  
 SAR: SYNTHETIC APERTURE RADAR  
 SInSAR: SATELLITE SAR INTERFEROMETRY  
 TInSAR: TERRESTRIAL SAR INTERFEROMETRY  
 GBInSAR: GROUND BASED SAR INTERFEROMETRY  
 TLS: TERRESTRIAL LASER SCANNER  
 DTM: DIGITAL TERRAIN MODE

**Autori**

PAOLO MAZZANTI, PHD  
 AMMINISTRATORE DELEGATO  
 NHAZCA S.R.L., SPIN-OFF "SAPIENZA"  
 UNIVERSITÀ DI ROMA  
 PAOLO.MAZZANTI@NHAZCA.COM