

Interferometria Ground-based SAR: un nuovo strumento per il monitoraggio di strutture e frane

A. Di Pasquale, Marco Nicoletti
DIAN srl,
Z.I. La Martella, Via G.B. Pirelli sn, 70100 Matera, Italy
Tel: +39 (0)835 307760; fax +39 (0)835 264705
e-mail: a.dipasquale@dianalysis.eu, web: <http://www.dianalysis.eu>

Marco Corsetti
Università la Sapienza,
D.I.C.E.A.,
Via Eudossiana 18, 00184 Rome, Italy

Pietro Guccione, Mariantonietta Zonno
Politecnico di Bari,
DEE,
Via E. Orabona 4, 70125 Bari, Italy

Andrea Lugli
Università di Bologna,
DICAM,
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy

Giovanni Nico
Consiglio Nazionale delle Ricerche,
Istituto per le Applicazioni del Calcolo,
Via Amendola 122/I, 70022 Bari, Italy

Sommario

La teoria della tecnica della interferometria Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GBSAR) e le sue applicazioni nel monitoraggio di dighe, ponti e frane sono presentate e commentate. La tecnologia GBSAR è una tecnica a microonde coerente capace di fornire immagini 2D di riflettività di una data scena con una elevata risoluzione spaziale, indipendente dalla condizioni meteorologiche e dalla presenza di illuminazione solare. L'applicazione più importante della tecnologia GBSAR è la tecnica della interferometria GBSAR differenziale. Questa tecnica consiste nell'elaborazione di una serie temporale di immagini GBSAR coerenti e fornisce uno strumento di elevata precisione per la produzione di mappe di spostamento di strutture (dighe, edifici, ponti) o del terreno e per la misura delle frequenze di vibrazione di strutture.

I. Introduction

La interferometria Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GBSAR) è una tecnica non distruttiva per la misura di spostamenti di strutture and scene naturali con una precisione sub-millimetrica. Il sistema GBSAR viene installato a una distanza dall'oggetto osservato variabile da alcune decine di metri sino a quattro chilometri. La elaborazione interferometrica di due immagini GBSAR coerenti fornisce una mappa di fase che è poi convertita nella mappa degli spostamenti avvenuti nella scena osservata nell'intervallo di tempo tra le due acquisizioni radar. Le misure GBSAR interferometriche

forniscono la proiezione del vettore spostamento 3D lungo la direzione di vista del radar. Il vantaggio della interferometria GBSAR rispetto a molte delle tecniche di misura tradizionali (GPS, stazioni totali, inclinometri, accelerometri) è la sua capacità di fornire informazione 2D sull'intero campo di spostamento e non solo misure in alcuni punti isolati. Alcuni dei risultati presentati in questo articolo sono stati ottenuti nell'ambito del progetto MISSAR finanziato dal Consorzio Roma Ricerche (CRR) che ha finanziato la sperimentazione della tecnologia GBSAR al fine di definire nuovi servizi e prodotti di mercato. L'obiettivo di questa sperimentazione è stato duplice. Da una parte evidenziare i vantaggi e gli svantaggi di un protocollo di misura basato sull'interferometria GBSAR, con particolare riferimento al monitoraggio delle dighe in calcestruzzo, dall'altra fornire una dimostrazione sul campo della precisione e accuratezza delle misure di spostamento GBSAR.

La struttura dell'articolo è la seguente. Il paragrafo II è dedicato alla descrizione della tecnica interferometria GBSAR. La dimostrazione della precisione e accuratezza delle misure di spostamento GBSAR è riportata al paragrafo III. Due esempi di applicazione della interferometria GBSAR per il monitoraggio statico e dinamico di un ponte e per la misura degli spostamenti della superficie di una diga in calcestruzzo sono descritti in dettaglio nei paragrafi IV e V. Infine, alcune conclusioni sono presentate al paragrafo VI.

II. L'interferometria Ground-Based SAR (GBSAR)

Il sistema GBSAR (Ground-Based Synthetic Aperture Radar) è un radar ad apertura sintetica con sensore posizionato a terra. Esso è costituito da due antenne radar, una trasmittente ed una ricevente, fissate su una slitta che si muove su di un binario rettilineo, realizzando così l'apertura sintetica. L'apertura sintetica varia in base alla risoluzione spaziale richiesta e alle esigenze logistiche di trasporto del binario. In questo articolo si farà riferimento a un binario di lunghezza pari a 2 m. La componente a microonde del sistema, che può utilizzare frequenze sino a 18 GHz, è costituita da uno scatterometro ad onda continua a scansione di frequenza. Lo schema in Figura 1 mostra la configurazione di misura. La posizione di ciascun punto P dell'oggetto osservato è data nell'immagine SAR in termine delle coordinate di azimuth e range. La direzione di azimuth x è individuata dal binario mentre quella di range y dalla direzione ortogonale ad x contenuta nel piano $z=0$ (si veda la Figura 1). Alternativamente, le immagini GBSAR possono essere rappresentate anche in termini delle coordinate polari (r, ψ).

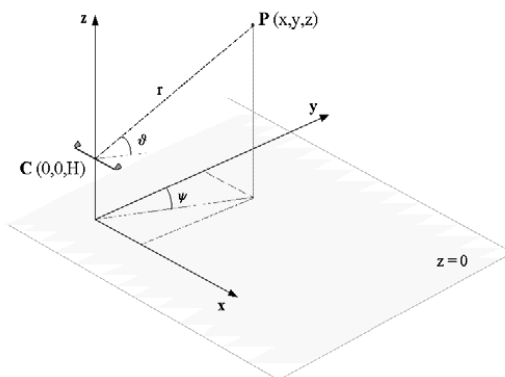


Figura 1: Configurazione di misura del sistema GBSAR. Le antenne TX/RX vengono spostate lungo il binario la cui lunghezza fornisce l'apertura sintetica del radar. La direzione di azimuth (x) coincide con quella del binario mentre quella di range (y) è nella direzione perpendicolare.

La qualità dell'informazione contenuta nelle immagini SAR dipende dalla risoluzione spaziale, ossia dalle dimensioni spaziali della più piccola porzione di area distinguibile nell'immagine. Minori sono queste dimensioni, maggiore è la risoluzione del sistema GBSAR. La risoluzione spaziale delle immagini nelle direzioni di "range", Δy e "cross-range" (anche nota come azimut) Δx dipende dalla distanza dell'area in esame:

$$\Delta x = \frac{c}{2B_f} \quad (1)$$

$$\Delta y = \frac{\lambda r}{2L} \quad (2)$$

dove c è la velocità della luce, B_f la larghezza di banda utilizzata dal sistema, L l'apertura sintetica, λ la lunghezza d'onda del radar e r la distanza del punto osservato P dal centro del binario. Tipicamente sono ottenibili risoluzioni di circa 4 metri ad un chilometro di distanza, risoluzioni che migliorano notevolmente arrivando nell'ordine dei centimetri nel monitoraggio a breve distanza (nell'ordine delle decine di metri). Quest'ultima caratteristica è particolarmente gradita nel campo del monitoraggio degli spostamenti o cedimenti di grandi strutture quali dighe, ponti o monumenti artistici. Se la porzione di area monitorata subisce uno spostamento, è possibile valutarne l'entità con precisioni inferiori al millimetro, sfruttando l'informazione connessa alla fase del segnale radar. Questa estrema sensibilità è dovuta al fatto che gli spostamenti sono direttamente correlati con la fase ricevuta ed è possibile valutarne quantitativamente, mediante le tecniche interferometriche, anche minime variazioni. La configurazione interferometrica GBSAR prevede la ripresa di immagini radar a tempi differenti, ma esattamente dalla stessa posizione. Ciò consente di misurare con una accuratezza inferiore al millimetro lo spostamento d del terreno nell'intervallo di tempo intercorso fra le due acquisizioni

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi \quad (3)$$

a partire dalla conoscenza della lunghezza d'onda λ e della differenza di fase φ misurata dal radar. Ogni frangia dell'immagine di fase φ corrisponde ad uno spostamento d del terreno misurato lungo la direzione di osservazione del radar e pari a mezza lunghezza d'onda λ del radar. Questo consente una facile e rapida interpretazione delle mappe di deformazione fornite dal sistema. Il sistema GBSAR è concepito per il controllo a distanza e in continuo. L'intervallo minimo tra l'acquisizione di due misure successive, variabile dai due ai quattro minuti a seconda della modalità di acquisizione, permette a questo sistema di fornire utili indicazioni in merito a importanti parametri quali velocità e accelerazione dei movimenti franosi o delle deformazioni strutturali. La possibilità di intervenire direttamente sulla frequenza dei cicli di misura, inoltre, consente di adeguare costantemente il sistema all'evoluzione del fenomeno monitorato. Il sistema GBSAR può essere usato anche senza binario, fornendo in tal modo profili 1D di deformazioni aggiornati ogni 50 ms e fornendo in tal modo un utile strumento per la misura di vibrazioni strutturali. La tecnologia GBSAR è stata usata in numerose campagne di misure per il monitoraggio di frane e per il rilievo topografico del terreno [1]-[3]. Le caratteristiche tecniche principali del sistema radar sono riportate nella seguente Tabella 1.

Frequenza centrale di emissione	16.75 GHz
Polarizzazione	VV
Guadagno antenna	20 dB
Lunghezza binario	2 m
Numero di singole scansioni che costituiscono l'immagine SAR	401
Larghezza di banda	300 MHz
Distanza max	200 m
Inter scan delay (tempo di attesa tra la fine di una scansione e l'inizio della successiva)	6 sec
Ripetitività temporale	~ 5 minuti
Range resolution	0.50 m
Cross range resolution	4.5 mrad (1 metro a 200 m di distanza)

Tabella 1 - Caratteristiche tecniche del sistema radar

III. Dimostrazione della precisione sub-millimetrica

In questo paragrafo si descrivono i risultati di un esperimento avente come obiettivo la dimostrazione sul campo della capacità dell'interferometro GBSAR di misurare, con precisione sub-millimetrica, lo spostamento indotto di un corner reflector. Per indurre lo spostamento, il corner è stato vincolato all'estremità di un pistone la cui posizione può essere modificata per mezzo di una vite micrometrica come mostrato in Figura 2. La posizione della vite micrometrica è stata modificata leggermente nel breve intervallo di tempo tra due acquisizioni radar successive. Ciò ha quindi consentito di acquisire immagini radar in corrispondenza di posizioni leggermente differenti del corner reflector.



Figura 2 - Foto del corner reflector usato per la sperimentazione

La Figura 3 riporta un interferogramma, cioè una immagine di fase ottenuta elaborando due immagini radar coerenti. In particolare, l'interferogramma di Figura 3 è stato ottenuto elaborando l'immagine radar acquisita dopo l'installazione del corner reflector, in posizione di riposo, e l'immagine acquisita con il corner posizionato a una distanza di 5 mm rispetto alla posizione di riposo. La parte dell'immagine avente un elevato rapporto segnale rumore (SNR) è quella rappresentata in rosso, cioè la regione avente un'elevata stabilità del valore di fase, in questo caso

pari a zero. Le aree con elevato SNR hanno la caratteristica di fornire misure molto precise di fase e quindi di spostamento. Al centro della regione di fase stabile, rappresentata in rosso nella Figura 3, è presente l'insieme di pochi pixel aventi un valore di fase pari a circa -2 radianti. Il segno meno indica che la variazione di fase è dovuta a un oggetto che durante l'acquisizione della seconda immagine radar era leggermente più vicino al radar di quanto lo fosse durante l'acquisizione della prima immagine radar. La Figura 4 mostra il particolare di questa regione dell'interferogramma. Si può notare che la distanza range di tale insieme di pixel corrisponde al punto dove si è installato il corner reflector, a ulteriore conferma che si sta osservando il segnale di fase dovuto allo spostamento del corner reflector. La Figura 5 e la Figura 6 mostrano la fase dello stesso insieme di pixel in corrispondenza degli spostamenti di 3 mm e 1 mm del corner reflector rispetto alla sua posizione di riposo. In tutte le immagini di fase sin qui citate, l'interferogramma è ottenuto elaborando l'immagine radar acquisita con il corner reflector nella posizione di riposo, con quelle acquisite in corrispondenza di posizioni del corner spostate di 5 mm, 3 mm e 1 mm.

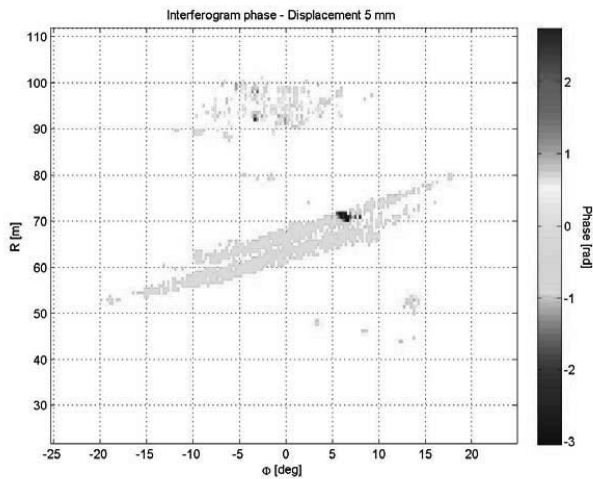


Figura 3 - Interferogramma tra due immagini radar acquisite prima e dopo la installazione del corner reflector posizionato a una distanza di 5 mm rispetto alla posizione di riposo

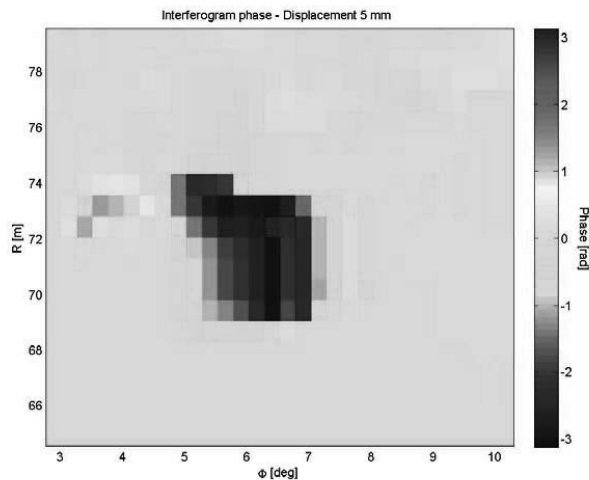


Figura 4 - Particolare dell'interferogramma tra due immagini radar acquisite prima e dopo la installazione del corner reflector posizionato a una distanza di 5 mm rispetto alla posizione di riposo

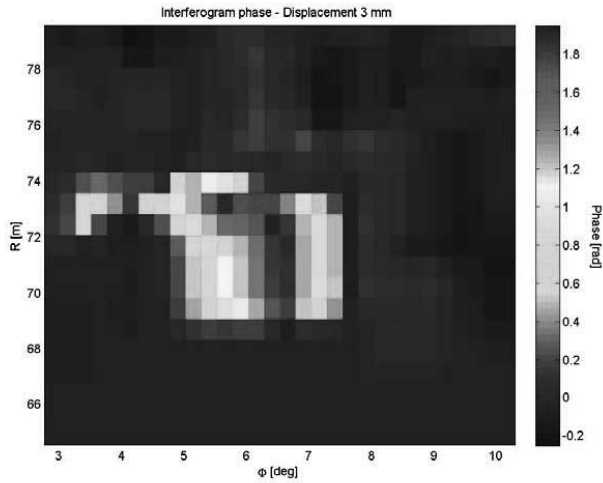


Figura 5 - Particolare dell'interferogramma tra due immagini radar acquisite prima e dopo la installazione del corner reflector posizionato a una distanza di 3mm rispetto alla posizione di riposo

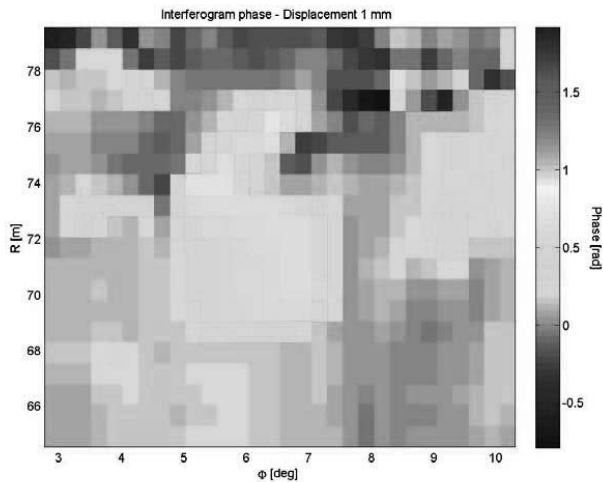


Figura 6 - Particolare dell'interferogramma tra due immagini radar acquisite prima e dopo la installazione del corner reflector posizionato a una distanza di 1 mm rispetto alla posizione di riposo

La fase interferometrica, pari alla variazione di fase nei pixel corrispondenti delle immagini radar, è legata allo spostamento D del corner reflector, immaginato lungo la direzione di vista. La relazione (3) è utilizzabile anche per ottenere una stima teorica della precisione della misura di spostamento. Infatti, un sistema radar è capace di misurare variazioni di fase con una precisione inferiore ai 20° pari a circa $\pi/9$. Ciò corrisponde, alla lunghezza d'onda radar, ad una precisione nella misura di spostamento inferiore al millimetro.

La Tabella 2 riassume la data e ora di acquisizione delle immagini utilizzate in questo esperimento e la posizione della vite micrometrica rispetto alla posizione di riposo. Si nota come le prime due immagini radar sono state acquisite con il corner reflector, ancorato alla vite micrometrica, nella posizione di riposo corrispondente alla posizione di 10 mm della vite micrometrica. Le acquisizioni radar dalla terza alle sesta immagine sono avvenute con il corner spostato di 5 mm rispetto alla

posizione di riposo. Dalla settimana alla decima acquisizione radar il corner era stato spostato di ulteriori 3 mm. Infine, le ultime quattro immagini sono state acquisite con il corner spostato ulteriormente di 1 mm.

N.	Data e ora dell'acquisizione	Posizione vite micrometrica [mm]
1	2012.07.27 - 18.47.42	10
2	2012.07.27 - 18.52.40	10
3	2012.07.27 - 18.57.38	5
4	2012.07.27 - 19.02.36	5
5	2012.07.27 - 19.07.35	5
6	2012.07.27 - 19.12.33	5
7	2012.07.27 - 19.17.30	2
8	2012.07.27 - 19.22.28	2
9	2012.07.27 - 19.27.26	2
10	2012.07.27 - 19.32.23	2
11	2012.07.27 - 19.37.21	1
12	2012.07.27 - 19.42.19	1
13	2012.07.27 - 19.47.16	1
14	2012.07.27 - 19.52.15	1

Tabella 2 - Posizioni della vite micrometrica per le differenti acquisizioni radar

La Figura 7 riporta lo schema della geometria di acquisizione delle immagini radar usate in questo esperimento. L'angolo di elevazione del radar è pari a $\alpha = 35^\circ$. Lo spostamento D del corner reflector è ottenuto come differenza della posizione della vite micrometrica rispetto alla sua posizione di riposo. Si suppone che due immagini radar siano state acquisite in con il corner reflector nelle due differenti posizioni.

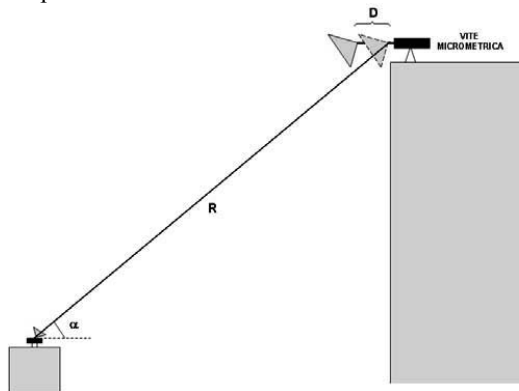


Figura 7 - Schema dell'esperimento della misura dello spostamento di un corner reflector

La variazione di fase misurata dal radar in corrispondenza dello spostamento D del corner reflector è pari a:

$$\Delta\varphi = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} D_{LOS} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} D \cdot \cos(\alpha) \quad (1)$$

dove $D_{LOS} = D \cdot \cos(\alpha)$ rappresenta la proiezione del vettore spostamento D lungo la direzione di vista (LOS) del radar individuata dal vettore posizione R . La Tabella 3 riassume i valori della fase interferometrica, in corrispondenza delle differenti variazioni della posizione del corner reflector, e le relative stime dello spostamento D del corner. I valori di fase sono stati stimati come media dei valori di fase dell'insieme dei pixel della "macchia di fase" corrispondente alla posizione del corner reflector al fine di ridurre l'incidenza della variabilità statistica delle misure di fase. Per quanto riguarda la stima della fase nella mappa di Figura 5 è bene osservare che, a causa della ciclicità dei valori di fase, la piccola striscia bianca all'interno della regione blu-nero corrispondente in realtà a un valore di fase -3.16 radianti e non $+3.14$ radianti. Il grafico delle stime degli spostamenti del corner reflector sono rappresentate in Figura 8. Le stime sono rappresentate come asterischi in verde, mentre la linea continua è ottenuta per interpolazione lineare al fine di facilitare la lettura del grafico. I valori sono stati ottenuti elaborando interferometricamente la prima immagine radar acquisita con il corner reflector nella posizione di riposo e le successive tredici immagini radar acquisite con il corner reflector nelle sue diverse posizioni come riassunto in Tabella 2. Per questa ragione, il primo punto del grafico in Figura 8 corrisponde a uno spostamento nullo, in quanto la seconda immagine radar, così come la prima, sono state acquisite con il corner reflector nella sua posizione di riposo. Il grafico mostra la stabilità dei diversi "gradini", cioè la stabilità delle stime degli spostamenti del corner al variare del tempo. E' possibile quindi concludere affermando che l'esperimento descritto in questo paragrafo è una dimostrazione "in campo" della precisione sub millimetrica delle misure radar di spostamento.

$\Delta\phi$ [rad]	D stimata [mm]	D vera [mm]
-0.6326	1.0132	1
-1.9458	3.1164	3
-3.1236	5.0027	5

Tabella 3 - Fase interferometrica (a sinistra), stima dello spostamento (al centro) e vero spostamento del corner

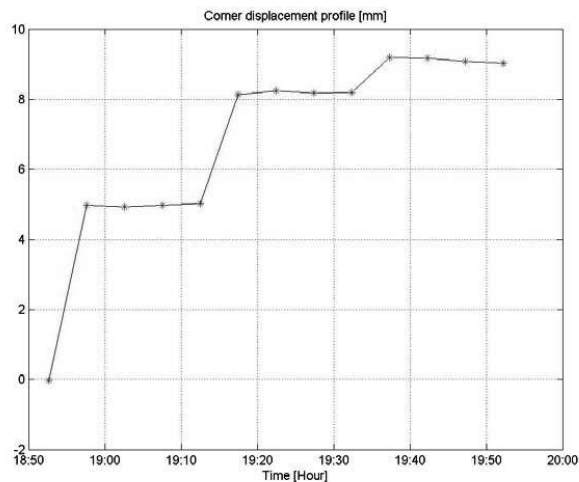


Figura 8 - Misura dello spostamento del corner reflector misurata dal radar

IV. Monitoraggio di un ponte

In questo paragrafo è descritta una applicazione della tecnologia GBSAR per il monitoraggio di un ponte. Il radar da terra è stato sistemato sotto il ponte in corrispondenza di un pilone e puntato sul lato opposto del ponte come mostrato in Figura 9. Per avere la possibilità di ben discernere la localizzazione dei punti osservati nel segnale ricevuto sono stati installati quattro corner reflector lungo l'impalcato del ponte.



Figura 9 - Vista del ponte dal radar.

I quattro corner reflectors sono stati installati in corrispondenza di alcuni dei capisaldi utilizzati nel livellamento topografico per confrontare con più facilità le misure radar con quelle topografiche. La associazione tra le posizioni segnate (capisaldi topografici) sul ponte e i corner reflector installati è riportata in Tabella 4; inoltre si riportano nella stessa tabella anche le distanze tra posizioni segnate sul ponte ed il centro del secondo pilone, ai piedi del quale è stato installato il radar.

Corner	Posizione sul ponte	Distanza dal secondo pilone [m]
1°	07	34.50
2°	06	51.75
3°	05	69.00
4°	03	93.02

Tabella 4 – Posizioni dei corner sul ponte.

Le misure del radar sono effettuate in coincidenza con le prove di carico/scarico del ponte. La Figura 10 riporta lo schema geometrico di tale installazione. Il sistema d'assi cartesiani $\{x, y, z\}$ è centrato sulla superficie del pilone con l'asse z diretto lungo il pilone e gli $\{x, y\}$ ad individuare il piano sul quale giace il centro di fase delle antenne radar. L'altezza di questo piano rispetto al piano di installazione del radar è pari a $H_R = 0.90\text{ m}$, dovuta alle dimensioni del cavalletto su cui poggia la testata radar. L'altezza dell'impalcato dal piano di installazione, come rilevata dal disegno di progetto del ponte, è pari a $H_P = 14.70\text{ m}$ e di conseguenza l'altezza dello stesso impalcato misurato rispetto al sistema di riferimento $\{x, y, z\}$ è data da $H_{PR} = H_P - H_R = 13.80\text{ m}$. La distanza dei corner dall'asse individuato dai piloni è costante e pari a $Y_{CR} = 4.30\text{ m}$ mentre la posizione lungo l'impalcato, misurato rispetto all'origine del sistema di riferimento $\{x, y, z\}$ varia a seconda del corner è data da:

$$X_{CR} = \sqrt{R_{CR}^2 - H_{PR}^2 - (Y_R - Y_{CR})^2}$$

La distanza range R_{CR} è individuata dalla posizione del picco corrispondente al corner nel profilo radar misurato.

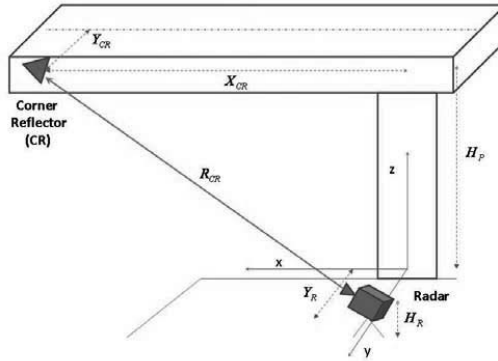


Figura 10 - Schema della geometria dell'acquisizione.

I quattro corner reflector sono stati installati nella metà dell'impalcato. Tutti i profili di spostamento dell'impalcato misurati dal radar mostrano la componente del vettore spostamento lungo la direzione di osservazione del radar che dipende dalla distanza del punto dell'impalcato rispetto al radar, sia dalla quota dell'impalcato relativa al centro di fase delle antenne del radar. La Figura 11 mostra la relazione tra il vettore spostamento dell'impalcato del ponte, supposto verticale e riportato in blu, e la componente di tale spostamento lungo la direzione di vista del radar, indicata con il termine line-of-sight (LOS), rappresentata con una freccia verde.

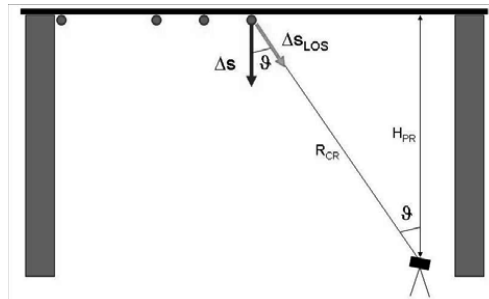


Figura 11 - Relazione tra la misura radar e lo spostamento verticale dell'impalcato.

Indicata con R_{CR} la distanza range del picco di intensità corrispondente a uno specifico corner reflector e con H_{PR} la quota dell'impalcato misurata rispetto al centro di fase delle antenne radar, il fattore geometrico per il quale moltiplicare la misura dello spostamento ottenuto dai profili radar è dato da:

$$C = \frac{1}{\cos \vartheta} = \frac{R_{CR}}{H_{PR}} \quad (4)$$

dove ϑ è l'angolo di incidenza delle onde radar sull'impalcato nel punto di installazione del corner reflector. La stessa operazione può essere ripetuta per qualunque punto dell'impalcato del ponte osservato dal radar e non solo per i corner. I dati rilevati dal radar sono stati elaborati ottenendo gli spostamenti in linea di vista dei quattro corner reflector installati sul fianco del ponte. Questi valori di deformazione in direzione LOS sono stati successivamente proiettati sulla direzione verticale per ricavare i corrispondenti spostamenti verticali. Gli spostamenti LOS, cioè in linea di vista, utilizzano la seguente convenzione di segno: 1) spostamento negativo – il riflettore si avvicina al

radar considerando la direzione della linea di vista; 2) spostamento positivo – il riflettore si allontana da radar considerando la direzione della linea di vista. In Figura 12 si riportano i massimi spostamenti verticali rispetto alla distanza dei riflettori lungo l'impalcato, calcolata a partire dal pilone centrale del ponte.

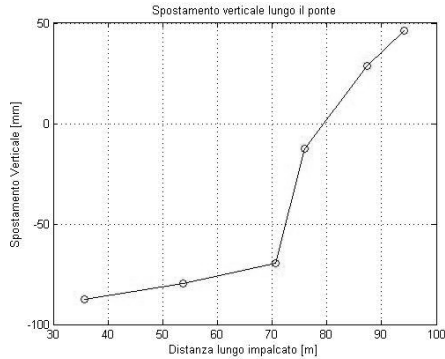


Figura 12 – Spostamento verticale lungo l'impalcato con massimo carico.

Dai grafici riportati nelle Figura 13, Figura 14 e Figura 15 si riportano rispettivamente gli spostamenti LOS dei corner 07, 06 e 03; si evince chiaramente come alla deformazione introdotta dal carico si oppone la deformazione contraria indotta dallo scarico che riporta il ponte nella situazione iniziale.

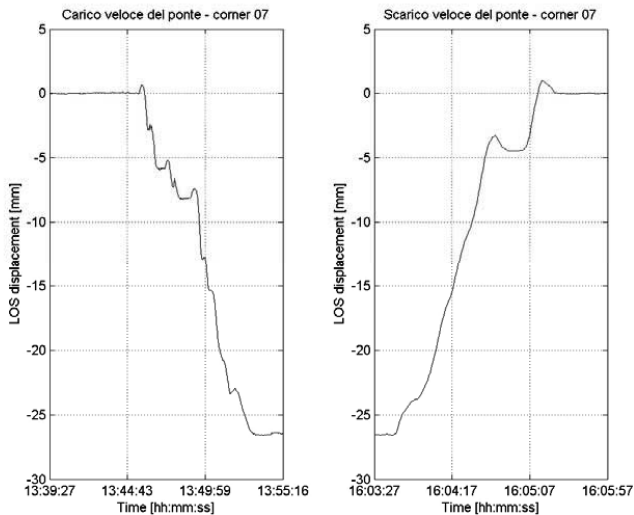


Figura 13 – Spostamenti in linea di vista del corner 07 dovuto al carico e scarico del ponte.

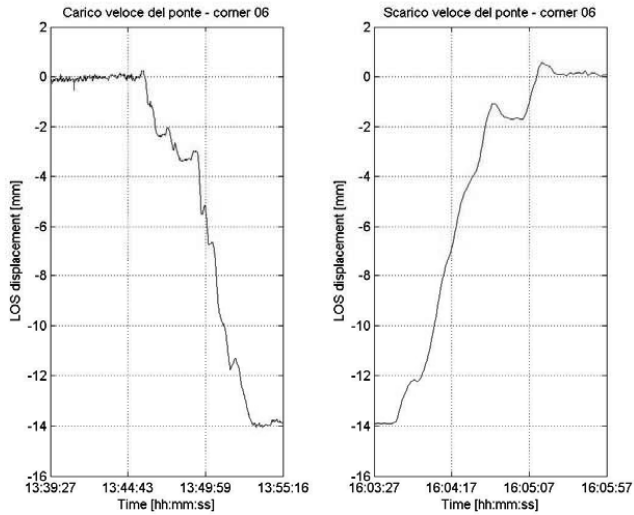


Figura 14 – Spostamenti in linea di vista del corner 06 dovuti al carico e scarico del ponte.

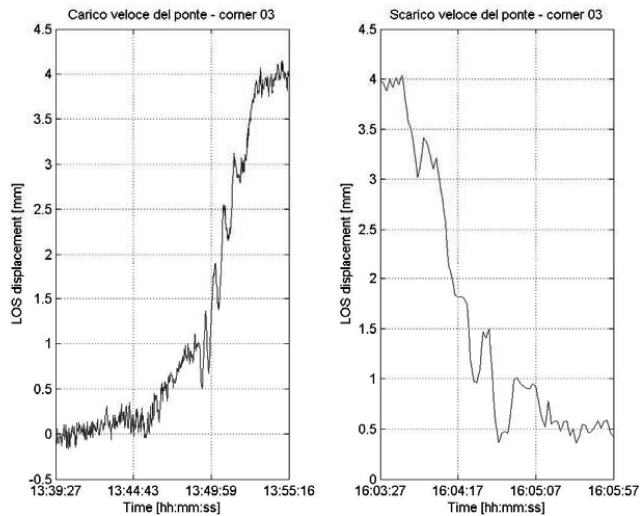


Figura 15 – Spostamenti in linea di vista del corner 03 dovuti al carico e scarico del ponte.

L'analisi in frequenza del corner reflector posto in corrispondenza del punto di mezzo della campata centrale del ponte è mostrata in Figura 16. Dallo spettro del segnale si rilevano chiaramente due picchi a cavallo delle frequenze 1.4Hz e 2.5Hz.

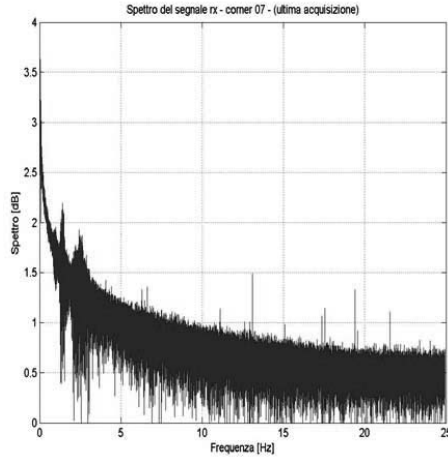


Figura 16 - Spettro del segnale ricevuto dal corner 07.

V. Monitoraggio di una diga

In questo paragrafo è descritto un esempio di applicazione della interferometria GBSAR nella misura degli spostamenti di una diga in calcestruzzo dovuti alla variazione del livello di invaso a quelle di temperatura [4]. Sono effettuate tre campagne di misura: dal 19 al 24 novembre 2011, dal 5 al 9 marzo 2012 e dal 27 al 31 luglio 2012. Il radar è stato installato in due postazioni ad una distanza in *range* che nella prima postazione varia tra i 40 e i 75 m, mentre nella seconda tra i 35 e i 65 m, in modo da monitorare l'intera superficie della diga. Le misure radar sono state effettuate con frequenza temporale di circa 5 minuti. I risultati mostrati in questo paragrafo sono stati ottenuti usando diverse strategie:

- 1) confronto puntuale delle misure di spostamento delle mire ottiche con quelle fornite dal radar nei punti corrispondenti alla localizzazione delle mire. Il confronto è avvenuto analizzando i profili temporali delle due serie di spostamento, campionate ogni cinque minuti nel caso delle acquisizioni radar e ogni ora nel caso delle mire ottiche;
- 2) confronto delle mappe di spostamento radar georeferenziate sulla superficie della diga e relative a intervalli temporali dell'ordine delle ore con le differenze degli spostamenti forniti dalle mire ottiche relative allo stesso intervallo temporale;
- 3) confronto delle mappe di spostamento radar georeferenziate sulla superficie della diga e relative a intervalli temporali dell'ordine delle ore con la simulazione degli spostamenti della diga causati dalle variazioni di livello di invaso e temperatura della struttura relativi allo stesso intervallo temporale effettuate.

La Figura 17 riporta i profili di spostamento monte-valle, corretti quindi per il fattore LOS, stimati dalle misure radar in corrispondenza di otto punti della superficie. I dati sono stati acquisiti dalla postazione 2.

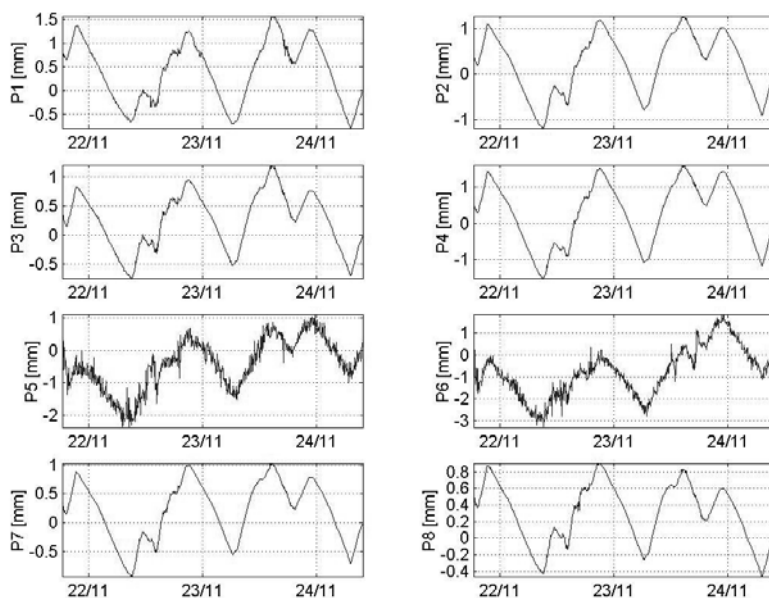


Figura 17 - Misura radar dello spostamento nei punti P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 dalla postazione 2 durante la prima campagna

Le misure di spostamento nei punti P5 e P6 sono più rumorose in quanto tali punti ricadono in porzioni della superficie della diga aventi una minore coerenza del segnale retrodiffuso dovuta alla particolare geometria della diga. I profili di spostamento dei punti P5 e P6 avrebbero potuto essere facilmente filtrati con un filtro passo-basso. Tuttavia si è preferito mostrare il dato così come acquisito dal radar senza ulteriore elaborazione per mostrare come anche nel caso di condizioni di *scattering* meno favorevoli e caratterizzate da bassi valori di coerenza interferometrica, il radar è in grado di fornire misure di spostamento ancora con un elevato contenuto informativo. Le Figura 18 e Figura 19 mostrano due esempi di confronto tra un profilo acquisito dalla mira ottica e il corrispondente profilo GBSAR localizzato in prossimità della mira anche se non coincidente. Ai fini del confronto il profilo degli spostamenti misurati dalla mira è stato limitato all'intervallo temporale del profilo GBSAR ed è stato spostato verticalmente normalizzandolo al valore di spostamento corrispondente all'inizio dell'acquisizione radar, cioè misurando gli spostamenti relativi a partire dall'istante di acquisizione della prima immagine radar usata per generare il profilo degli spostamenti radar. Tuttavia forse il modo più efficace per mostrare i risultati delle misure radar è illustrato in Figura 20 che riporta la mappa degli spostamenti lungo la direzione del radar, in coordinate radar e la stessa mappa degli spostamenti questa volta in direzione monte-valle georeferenziata e rappresentata sulla superficie di estradosso della diga. La mappa mostra gli spostamenti monte-valle misurati nell'intervallo temporale che va dalle ore 22:00 del 22 novembre alle ore 7:28 del 23 novembre. La mappa mostra uno spostamento verso valle di circa 2 mm con uno spostamento della porzione di destra della diga superiore a quella della porzione di sinistra. I valori degli spostamenti relativi misurati dalle mire 2, 3 e 4 sono stati rispettivamente di 1.50 mm, 1.97 mm e 1.22 mm verso valle.

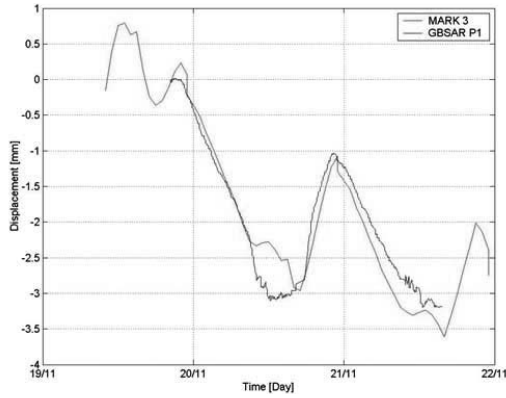


Figura 18 - Misura radar dello spostamento in P1 e della mira 3 dalla postazione 1 durante la prima campagna di novembre

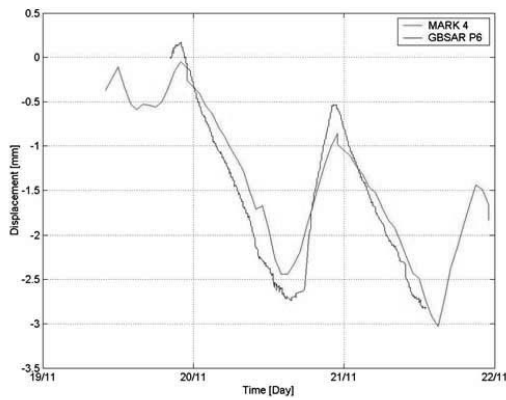


Figura 19 - Misura radar dello spostamento in P6 e della mira 4 dalla postazione 1 durante la prima campagna di novembre

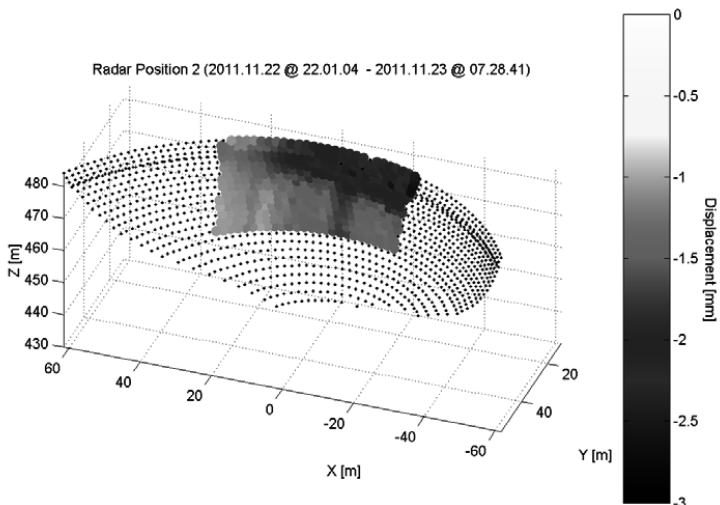


Figura 20 - Mappa di spostamento relativa al periodo dalle 22:00 del 22 novembre alle 7:28 del 23 novembre

La corretta misura degli spostamenti della diga tra due campagne successive richiede che venga mantenuta fissa ciascuna delle due postazioni radar. Lo spostamento della diga in un intervallo temporale di alcuni mesi dipende fondamentalmente dalla variazione della temperatura della struttura ma anche dalla differenza del livello di invaso durante le acquisizioni delle due immagini SAR usate per ottenere la mappa di spostamento. L'evidente vantaggio di tale strategia di monitoraggio è di risparmio economico, in quanto la misura degli spostamenti della diga richiede solo pochi giorni e non di molti mesi. Lo svantaggio è l'impossibilità di osservare quotidianamente, ora per ora, gli spostamenti della diga. La mappa di spostamento fornisce solo l'informazione sullo spostamento totale della diga nell'intervallo temporale tra campagne di monitoraggio successive. La Figura 21 mostra la mappa di spostamento monte-valle della diga misurata dalla postazione 1. Le immagini SAR utilizzate sono state acquisite alle 10:56 del 20 novembre 2011 e alle 10:58 del 5 marzo 2012. Il livello di invaso in corrispondenza delle due acquisizioni era rispettivamente di 481.0 m s.l.m alle ore 11 del 20 novembre m e 481.26 m s.l.m alle ore 12 del 5 marzo. Sono mostrati solo i valori della mappa corrispondenti a un livello di coerenza interferometrica superiore a 0.8. La sequenza di cerchi e rombi in nero evidenzia i punti della diga alle quote $z = 484$ m e $z = 455$ m, in termini delle loro coordinate polari calcolate rispetto alla posizione del radar. Inoltre, la linea tratteggiata in verde mostra la linea della sezione maestra trasformata in coordinate radar. La mappa mostra chiaramente due aree caratterizzate da un comportamento differente. L'area in giallo lungo la diagonale mostra uno spostamento del coronamento in allontanamento dalla postazione radar, quindi verso monte. L'entità di tale spostamento in corrispondenza della sezione maestra, laddove sono disponibili sia le misure della mira sia il risultato della simulazione agli elementi finiti, è di quasi 4 mm verso monte. Invece, la quota a $z = 455$ m.s.l.m mostra uno spostamento verso valle di entità inferiore. In particolare, lunga la sezione maestra tale spostamento è di circa 1 mm. La Figura 22 riporta i valori della posizione della mira 3 in un intervallo temporale di poche ore, in corrispondenza dell'acquisizione delle due immagini radar. In particolare si osserva che la mira 3 passa dalla posizione -11.29 mm alle 11 del 20 novembre alla posizione -8.15 mm alle 11 del 5 marzo, mostrando quindi uno spostamento relativo di poco più di 3 mm verso monte. Non è possibile però confrontare la misura radar a quota $z = 455$ m.s.l.m. con altre misure non essendo installato nessuno strumento di misura a tale quota. Rispetto alla informazione di spostamento fornita dalla mira 3, la misura radar fornisce una informazione aggiuntiva sul particolare distribuzione spaziale degli spostamenti della diga che presenta un comportamento differente sul coronamento e a quote attorno ai 460 m. Questo comportamento è spiegato in termini di effetto termico come mostrato dalla simulazione riportata in Figura 23. La simulazione è stata effettuata usando le misure del livello di invaso e della temperatura della struttura in coincidenza con il periodo di acquisizione delle due immagini radar usate per generare la mappa in Figura 21. La Figura 23 mostra a destra la deformata della sezione maestra e a sinistra la deformazione della mesh in corrispondenza della sezione maestra. Il risultato della simulazione predice uno spostamento verso monte del coronamento pari a circa 2 mm e verso valle della porzione della diga posta a circa 460 m pari a circa 1 mm. Aldilà del confronto numerico con i dati delle misure radar che potrebbe anche essere influenzato dalle ipotesi semplificatrici usate nella simulazione, il dato importante da evidenziare è la osservazione, sia in simulazione sia nell'analisi dei dati radar, di uno spostamento verso monte del coronamento di entità pari a circa il doppio dello spostamento verso valle della diga a quota 450 m. Tale comportamento è osservabile nelle misure radar è leggermente superiore, sia nello spostamento verso valle sia in quello verso monte, rispetto a quanto previsto dalla simulazione. Si fa notare, tuttavia che la misura radar di spostamento del coronamento è in accordo con la misura fornita dalla mira 3.

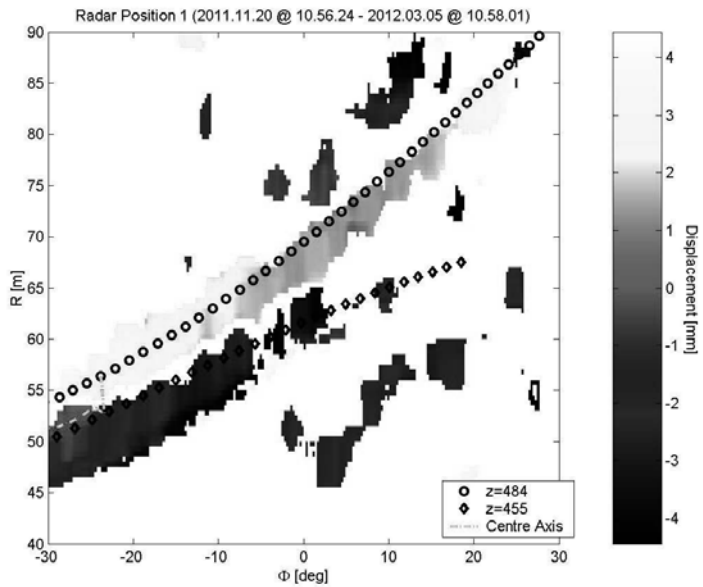


Figura 21 - Mappa di spostamento relativa al periodo che va dalle 10:56 del 20 novembre alle 10:58 del 5 marzo

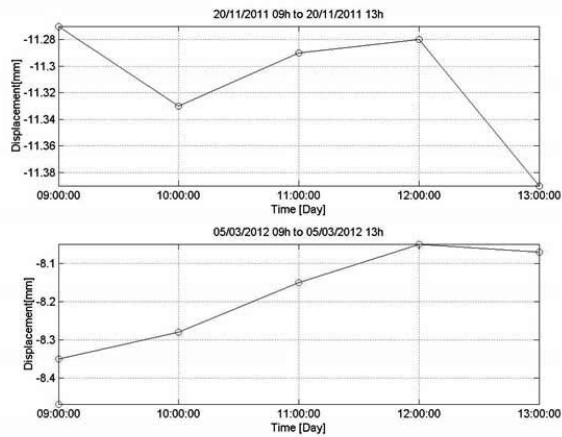


Figura 22 - Spostamenti della MIRA 3 misurati dalle 9h alle 13h di 20 novembre e dalle 9h alle 13 del 5 marzo

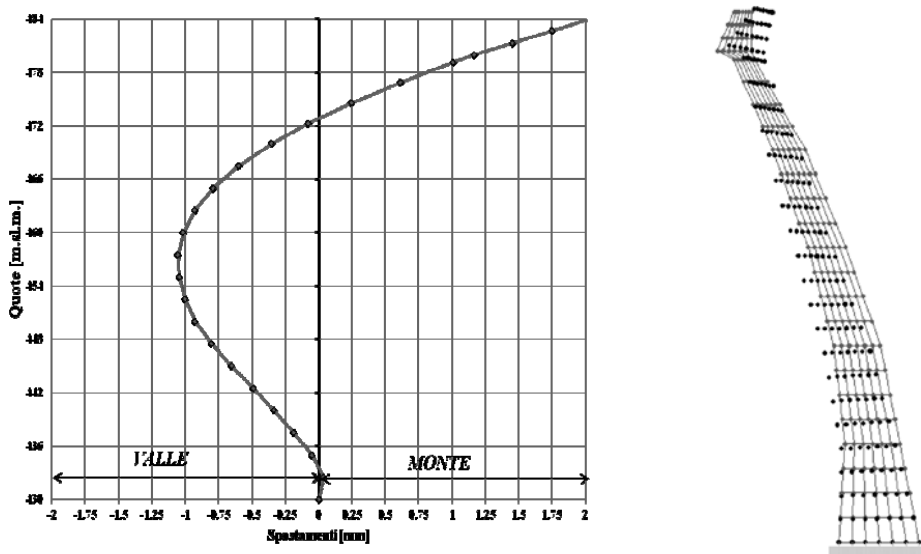


Figura 23 - Simulazione delle deformazioni della sezione di mezzeria dovuto alle variazioni termiche tra le 4:00 del 21.11.2011 e le 23.55 del 09.03.2012

VI. Conclusioni

La tecnologia GBSAR in conclusione presenta i seguenti vantaggi:

- è in grado di generare mappe di spostamento georeferenziate che riescono a coprire qualche chilometro quadrato di superficie e può essere utilizzato per il monitoraggio “stand alone” o per testare, progettare o implementare reti di sensori tradizionali;
- il sistema funziona totalmente in remoto e presenta un’assoluta indipendenza da punti di riferimento presenti nello scenario di misura, ciò significa che non si deve accedere all’area instabile né posizionare su di essa alcuna strumentazione, a vantaggio della sicurezza degli operatori e della praticità di utilizzo;
- è possibile eseguire le misure anche in totale assenza di luce o in presenza di nebbia ed in condizioni climatiche avverse;
- fornisce risultati preliminari sul campo, pochi minuti dopo aver effettuato le misure;
- presenta una velocità d’approntamento limitata a poche ore;
- offre una estrema precisione nelle misurazioni effettuate, nell’ordine dei decimi di millimetro, ed il confronto con sensoristica tradizionale, ha mostrato un perfetto accordo tra i risultati;
- è uno strumento utile per la validazione dei modelli teorici di deformazione di strutture e/o frane e altri fenomeni geologici;
- è un valido supporto alle reti di monitoraggio con strumenti tradizionali, sia già installate ed operanti sia in fase di installazione. I risultati ottenuti dimostrano come la tecnica possa fornire utili indicazioni per ottimizzare la distribuzione di tali sensori sul corpo di frana;
- è in grado di individuare e riconoscere le aree di spostamento significativo e/o discriminare tra di esse i cambiamenti morfologici o di cinematica avvenuti;
- nel campo della “zonazione della pericolosità”, è un strumento essenziale per l’individuazione e la perimetrazione delle aree più critiche e per la programmazione e la progettazione degli interventi di mitigazione e salvaguardia più idonei;

- è utilissimo in situazioni di emergenza, quando un evento critico è ritenuto imminente o appena avvenuto, specialmente nei casi in cui siano a rischio elementi di particolare rilevanza, quali centri abitati, vie di comunicazione o beni culturali;
- consente in modo semplice e rapido di effettuare collaudi statici e dinamici di strutture.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Consorzio Roma Ricerche per aver finanziato il progetto MISSAR nell'ambito del quale sono stati ottenuti alcuni dei risultati mostrati in questo articolo. Si ringraziano i tecnici delle società committenti per il supporto fornito durante le fasi di acquisizione dei dati e loro elaborazione.

Riferimenti bibliografici

1. D. Leva, G. Nico, D. Tarchi, J. Fortuny, A.J. Sieber (2003), "Temporal analysis of a landslide by means of ground-based radar", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 745-752.
2. G. Nico, D. Leva, J. Fortuny-Guasch, G. Antonello, D. Tarchi, "Generation of digital terrain models with a ground-based SAR system", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1), 45-49, 2005.
3. A. Di Pasquale, M. Corsetti, P. Guccione, A. Lugli, M. Nicoletti, G. Nico, M. Zonno, "Ground-based SAR interferometry as a supporting tool in natural and man-made disasters", 33rd EARSel Symposium, 3-6 June 2013, Matera, Italy.
4. G. Nico, M. Corsetti, A. Di Pasquale, D. Donnaruma, L. Doti, L. Fiorentino, M. Nicoletti, "On the monitoring of dams by means of ground-based radar interferometry (GB-SAR)", 9th ICOLD European CLUB Symposium, 10-12 April 2013, Venice, Italy.