

## MISURA DELLE DEFORMAZIONI DI UNA DIGA MEDIANTE UN SENSORE SAR TERRESTRE

M. SCAIONI (\*), M. ALBA (\*), G. BERNARDINI (\*), A. GIUSSANI (\*),  
P.P. RICCI (\*), F. RONCORONI (\*), P. VALGOI (\*\*)

(\*) Politecnico di Milano – D.I.I.A.R., p.za L. da Vinci 32, 20133 Milano

e-mail: {marco.scaioni, mario.alba, alberto.giussani, fabio.roncoroni}@polimi.it

(\*\*) IDS Ingegneria dei Sistemi S.p.A., via Livornese 1019, 56122 Pisa, www.ids-spa.it

e-mail: {g.bernardini, p.ricci}@ids-spa.it

(\*\*\*) A2A, ATO/SIE, Grosio (SO), e-mail: paolo.valgoi@a2a.it

**Keywords:** GB-InSAR, Misura di deformazioni, Monitoraggio di dighe

### Riassunto

In questo documento si vogliono mostrare i risultati di un test realizzato utilizzando un sistema interferometrico SAR terrestre *IBIS-L* (IDS, Pisa) per la misurazione delle deformazioni giornaliere di una diga ad arco-gravità. Il sensore radar opera in banda *Ku* e, grazie alla possibilità di muoversi lungo un binario orientato in direzione parallela rispetto all'oggetto da monitorare, consente la misura simultanea di un numero elevato di punti sulla superficie di quest'ultimo. La tecnica interferometrica SAR permette dunque di tracciare nel tempo gli spostamenti dei punti nella direzione sensore-oggetto con precisione millimetrica. Al fine di convalidare i risultati ottenuti, questi sono stati confrontati con le misurazioni effettuate con un coordinatometro installato nella sezione maestra della diga, dimostrando un ottimo accordo.

### Abstract

In this paper some results obtained during an application of a Ground-Based InSAR system (*IBIS-L* by IDS, Pisa) to measure the daily deformation of an arch-gravity dam are presented. The radar sensor operates in band *Ku* and, thanks to the possibility of moving along a track oriented in the parallel direction w.r.t. the object to be monitored, it allows the simultaneous measurement of a huge number of points on its surface. The SAR interferometric technique makes possible to track the point displacements in *range* direction with a millimetric precision. To validate the achieved results, these have been compared to readings of a coordinatometer installed in the main vertical section of the dam. The comparison has worked out a good agreement between results of both instrumentations.

### 1. Introduzione

Negli ultimi anni è aumentata la necessità di conoscere informazioni inerenti le deformazioni delle grandi dighe in calcestruzzo. Infatti, al giorno d'oggi, lo sviluppo di tecniche innovative per la modellazione statica e dinamica delle strutture, consente di migliorare notevolmente la capacità di previsione di eventuali dissesti o crolli, riducendo così il rischio di catastrofi. Un presupposto fondamentale che tutti i modelli matematici dovrebbero avere per potersi avvicinare il più possibile alla realtà, è la disponibilità di osservazioni precise e ben distribuite sull'intera struttura, sia per quanto riguarda la geometria dell'oggetto che per le condizioni al contorno. In linea generale, le tecniche topografiche e i sensori attualmente utilizzati per questo scopo permettono di monitorare una serie limitata di punti di controllo, senza riuscire ad analizzare la struttura nella sua completezza. Tale deficit di informazioni risulta uno svantaggio per la modellazione strutturale, soprattutto quando si vogliono confrontare le previsioni delle analisi teoriche con le deformazioni reali causate da particolari condizioni esterne.

Per poter determinare le deformazioni di grandi porzioni della superficie di una struttura, negli ultimi anni sono state effettuate delle sperimentazioni utilizzando due diversi tipi di sensori: il *laser scanning terrestre* (TLS) e i *sistemi radar interferometrici SAR terrestri* (GB-InSAR). Entrambi gli strumenti, dal momento che misurano punti *non specifici* sulla struttura – salvo l'utilizzo di target particolari – sono in grado di determinare le variazioni della posizione di un punto lungo la cosiddetta “Line-of-Sight” (LoS- linea di vista) che parte dalla testa del sensore ed arriva al punto misurato. Dalla conoscenza della geometria 3D dell'oggetto misurato è comunque possibile calcolare le componenti dei vettori spostamento lungo le altre direzioni.

Per quanto riguarda l'impiego della tecnologia *laser scanning* per il monitoraggio delle deformazioni, dalla bibliografia esistente (Tsakiri *et al.*, 2006) e dall'esperienza degli autori (Alba *et al.*, 2006) si riscontra come questa possa essere utilizzata per valutare le deformazioni stagionali di strutture con punti aventi spostamenti di pochi centimetri, ma non per il monitoraggio continuo che richiede precisioni assai più elevate.

Negli ultimi dieci anni sono stati sviluppati alcuni sensori *radar terrestri* che possono applicare la tecnica *SAR interferometrica* (GB-InSAR) per la misurazione di deformazioni (Rudolf *et al.*, 1999; Bernardini *et al.*, 2007, Lingua *et al.*, 2008). Anche se la densità dei punti monitorati è inferiore rispetto a quanto fornisce il TLS, la precisione intrinseca ottenibile ne consente un buon uso per il monitoraggio in continuo di grandi strutture. Inoltre, nel caso di costruzioni come le dighe, che presentano grandi superfici regolari, avere un'enorme densità di punti non è una questione chiave, come lo è invece la precisione sulle misure.

La risoluzione spaziale delle misure è definita sia in “range” (allineata alla LoS) che in “cross-range”; quest'ultima risulta essere ortogonale alla LoS e parallela alla “baseline” lungo la quale il sensore trasla durante l'acquisizione. La superficie rilevata viene suddivisa in pixel e in ognuno dei quali viene monitorato ad ogni epoca di misura. All'interno di ciascuna cella, se possibile, viene individuato il punto avente la *coerenza* (Ferretti *et al.*, 2007) più elevata, il quale viene poi tracciato nel tempo. La geometria della superficie e il materiale di cui è costituita rivestono dunque un ruolo fondamentale nella localizzazione dei punti misurati. In letteratura si può trovare un'esperienza di monitoraggio di deformazioni di una diga a doppia curvatura (Ridracoli, Romagna) con l'utilizzo di un sensore GB-InSAR sviluppato da LiSALab (Tarchi *et al.*, 1999). Qui sono state misurate le deformazioni durante un periodo di circa 2 mesi, nel quale il sistema radar è stato riposizionato periodicamente per 5 volte nello stesso punto. La registrazione dei dati nello stesso sistema di riferimento è stata effettuata grazie alla disponibilità di un DSM della diga stessa. Le deformazioni sono state misurate lungo il paramento di valle della diga e validate dal confronto con le letture eseguite mediante un coordinatometro posto in corrispondenza della sezione maestra; il controllo ha interessato solo alcuni punti ma ha fornito precisioni inferiori a  $\pm 1$  mm. La dimensione delle celle di risoluzione sul paramento è stata di circa 30x30 cm, resa possibile da una “baseline” del sensore di 4 m.

Recentemente è stato sviluppato un nuovo sistema radar chiamato IBIS, il quale è in grado di misurare la risposta sia dinamica che statica di una struttura in corrispondenza di molti punti con una sensibilità massima di spostamento pari a 10÷20  $\mu$ m (Bernardini *et al.*, 2007a). Il sensore è stato progettato e realizzato dalla società IDS in collaborazione con il Dip. di Elettronica e Telecomunicazioni della Università di Firenze (Pieraccini *et al.*, 2004, 2005).

Attualmente IBIS è un sistema commerciale GB-InSAR concepito per essere utilizzato da parte di utenti finali anche senza conoscenze specifiche inerenti la teoria e la pratica radar. Esso si basa su due configurazioni volte a diverse applicazioni:

- *IBIS-S*: è un sensore radar monodimensionale che può essere utilizzato sia per misure statiche che dinamiche; è dotato di un'elevata precisione in “range” e può essere utilizzato fino ad una distanza massima di 1000 m;
- *IBIS-L*: si tratta di un sensore GB-InSAR basato sul radar *IBIS-S*; è dedicato a misurazioni statiche e fornisce informazioni bidimensionali date dalla risoluzione in “range” e in “cross-range”; può essere utilizzato fino ad una distanza massima di 4000 m.

Alcuni test con *IBIS-S* sono stati effettuati da IDS in collaborazione col Dip. di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano, all'interno di un programma di ricerca attualmente in corso con lo scopo di convalidare le prestazioni del sensore durante prove dinamiche su grandi strutture (Gentile, Bernardini, 2008). Il Dip. I.I.A.R. dello stesso ateneo ha dato inoltre a IDS l'opportunità di effettuare dei test con il sistema *IBIS-L* sulla diga ad arco-gravità di Cancano in Alta Valtellina. Durante i due giorni di test il bacino idrico della diga è stato caricato facendo crescere il livello dell'invaso e misurando gli spostamenti dovuti alle deformazioni termiche. Lo scopo di questo test non è stato solo quello di verificare le prestazioni strumentali ottenibili da questo tipo di sensori, già dimostrate dalle citate esperienze, quanto piuttosto quello di verificare l'utilizzabilità pratica di uno strumento commerciale che viene distribuito pronto all'impiego. Si omettono nel presente documento sia la descrizione tecnica del sistema *IBIS* e delle tecniche radaristiche che implementa; queste possono essere reperite in Bernardini *et al.*, 2007 e in Alba *et al.* 2008. Nel successivo par. 2 verrà dunque direttamente descritta l'applicazione di monitoraggio statico di una diga, illustrando i risultati ottenuti e la loro validazione.

## 2. Applicazione del sistema *IBIS-L* per il monitoraggio di una diga

Il sistema *IBIS-L* è stato utilizzato per misurare le deformazioni di una diga ad arco-gravità causate dalla variazione della quota di invaso del bacino e dalla variazione di temperatura della struttura. La diga di Cancano (Alta Valtellina, Italia) presenta un'altezza massima di circa 130 m ed una lunghezza del coronamento pari a 380 m, ed è gestita dalla società A2A (vedi Figura 1). La diga viene attualmente controllata con tecniche topografiche classiche così suddivise: due linee di livellazione geometrica di alta precisione, una posta sul coronamento e l'altra in corrispondenza di un cunicolo a quota intermedia; collimatori ottici per rilevare gli spostamenti orizzontali di tre punti del coronamento; variazioni di verticalità della sezione maestra misurate con coordinatometri manuali e automatici; misure estensimetriche sui giunti. Inoltre è stato creato, con l'utilizzo di un TLS, un preciso modello digitale della struttura. La disponibilità di tutti questi dati hanno permesso di validare le misure eseguite dal sistema GB-InSAR.

L'acquisizione dei dati con l'*IBIS-L* è stata eseguita ad una distanza media di 400 m per un periodo di 37 ore; Il sistema è stato installato su dei punti di stazione temporanei, in quanto per questa prova non è stato effettuato il riposizionamento dello strumento. Come mostrato in Figura 1, il sistema radar è stato collocato proprio di fronte al paramento di valle della diga. Questa disposizione ha permesso di catturare gli spostamenti della diga sfruttando la direzione in range per tutta la durata di campionamento. Il tempo necessario per eseguire una singola scansione di tutta la valle è stato di 9 minuti ed ogni ciclo è stato ripetuto senza pause intermedie. E' rilevante notare la facilità di

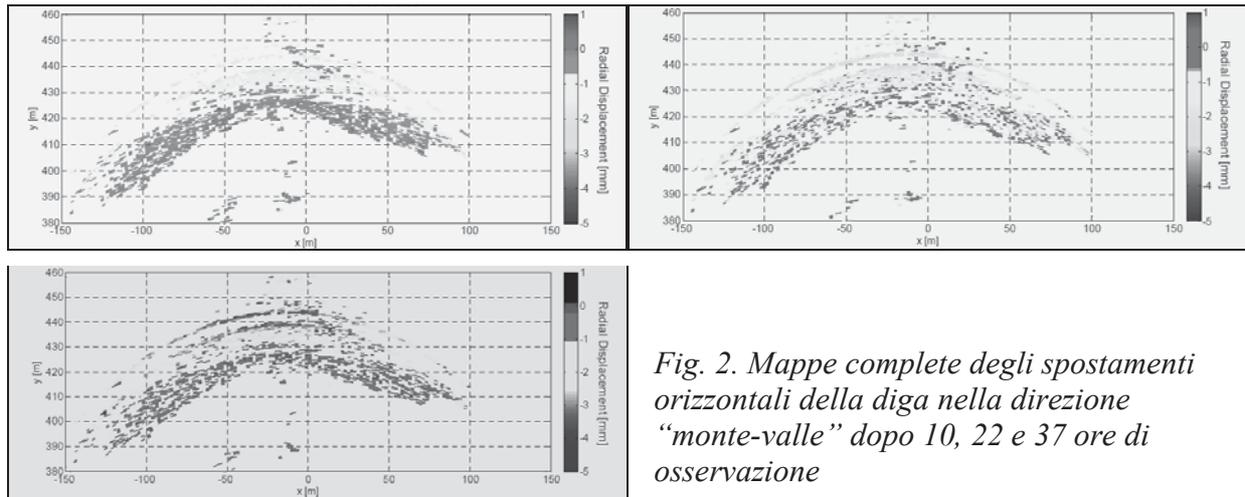
configurazione dei parametri necessari per eseguire una corretta acquisizione dei dati che permette di svolgere tale compito anche ad operatori non qualificati. Durante l'acquisizione dei dati, il software di controllo permette di verificare la mappa di risposta del segnale che fornisce le informazioni inerenti le proprietà di riflettività dell'oggetto illuminato dal sensore SAR. Inoltre è possibile valutare gli spostamenti intermedi dei punti misurati sulla struttura, opzione molto importante per le applicazioni di monitoraggio continuo.

I risultati delle misurazioni GB-InSAR sono mappe di deformazione 2-D degli spostamenti, che registrano un valore massimo di circa 4 mm nella sezione centrale. Durante un anno, considerando il minimo e massimo invaso, tali spostamenti potrebbero raggiungere circa 80 mm. Nella Figura 2, sono rappresentate le mappe



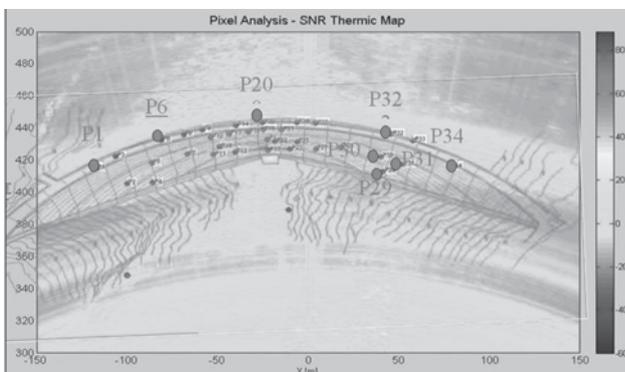
Fig. 1. *IBIS-L* posizionato di fronte al paramento di valle della diga di Cancano

corrispondenti a tre diverse epoche (dopo 10, 22 e 37 ore), ottenute durante la prova in esame. IBIS-L può misurare automaticamente spostamenti maggiori al salto di fase (pari a 4.5 mm) solo se l'acquisizione avviene in continuo e lo spostamento dell'oggetto da rilevare tra due epoche consecutive (in questa applicazione 9 minuti) è inferiore allo stesso salto di fase. In caso di riposizionamento dell'IBIS-L, durante il processamento dei dati non è possibile ricostruire spostamenti più grandi del salto di fase. Una soluzione a questo problema potrebbe essere fornita dall'integrazione del sistema GB-InSAR con altri sensori, aventi precisione minore ma in grado di ricostruire spostamenti a bassa frequenza (ad esempio TLS o stazioni totali robotizzate).



*Fig. 2. Mappe complete degli spostamenti orizzontali della diga nella direzione "monte-valle" dopo 10, 22 e 37 ore di osservazione*

Durante il processamento dei dati è possibile impostare delle soglie sulla base della coerenza del segnale ( $\rho$ ) ed al rapporto segnale/rumore ammissibile (Signal-to-Noise Ratio - SNR). Più elevate sono le soglie selezionate, maggiore è la precisione nella misurazione dello spostamento del punto selezionato. In Figura 3, è mostrato un sottogruppo  $S_{0.99}$  di soli punti con  $\rho > 0.99$ . Per ciascuno di questi, è completamente disponibile la serie temporale degli spostamenti. Nella parte a sinistra della Figura 4 sono mostrati gli spostamenti di 5 punti presenti sul coronamento della diga mentre, nella parte destra, sono visualizzati gli spostamenti di alcuni punti disposti verticalmente sulla struttura. Come si può vedere, il trend degli spostamenti della diga osservati è in accordo con il



*Fig. 3. Posizione dei punti monitorati sul paramento di valle della diga con una coerenza  $\rho > 0.99$ ; i punti rossi sono quelli illustrati in dettaglio nei grafici in Fig. 4*

comportamento statico previsto in entrambi i casi. Si nota inoltre che lungo il periodo d'osservazione l'entità massima degli spostamenti è inferiore ai 2 mm.

Nelle misure registrate in corrispondenza dei punti P34 e P30 sono presenti alcuni outlier ad indicare che, probabilmente, tali punti sono stati disturbati da turbolenza locale o sono localizzati su una superficie con cattiva riflettività nonostante l'elevata coerenza. D'altra parte, questi outlier non si traducono in una tendenza d'errore e possono essere rimossi con un opportuno filtraggio. Infatti, confrontando gli spostamenti dei punti P30 e P29, la cui posizione differisce solo per 15 m, è possibile vedere che solo il primo di essi è affetto da rumore anomalo (vedi Figura 4).

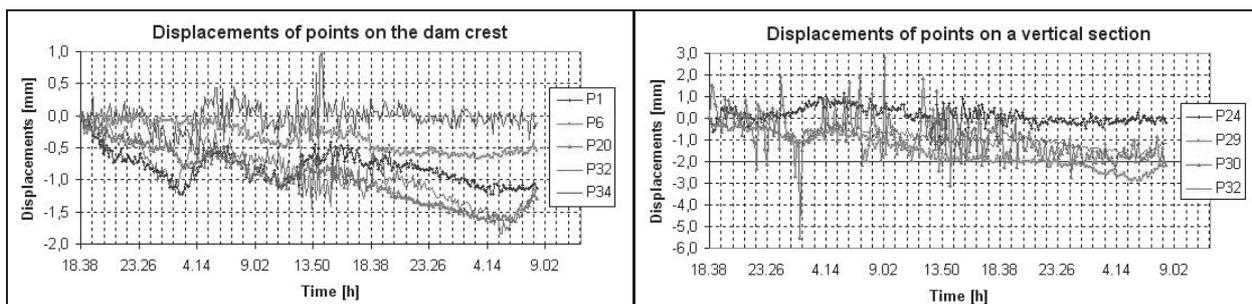


Fig. 4. Serie temporale degli spostamenti di un sottogruppo di punti ad alta coerenza ( $\rho > 0.99$ ), in accordo con la Fig. 3. A sinistra sono rappresentati cinque punti disposti sul coronamento della diga, a destra tre punti lungo una sezione verticale

### 3. Validazione dei risultati

Contemporaneamente alle misurazioni GB-InSAR, la diga è stata monitorata tramite un coordinatometro ed i risultati degli spostamenti sono stati confrontati con i quelli dell'IBIS-L. I risultati sono molto positivi in quanto la tecnica interferometrica restituisce dei movimenti in buon accordo con quelli misurati con il filo a piombo; confrontando le differenze tra le misurazioni, ottenute durante un periodo di 24 ore, queste presentano un RMSE di  $\pm 0,2$  mm (vedi Fig. 5).

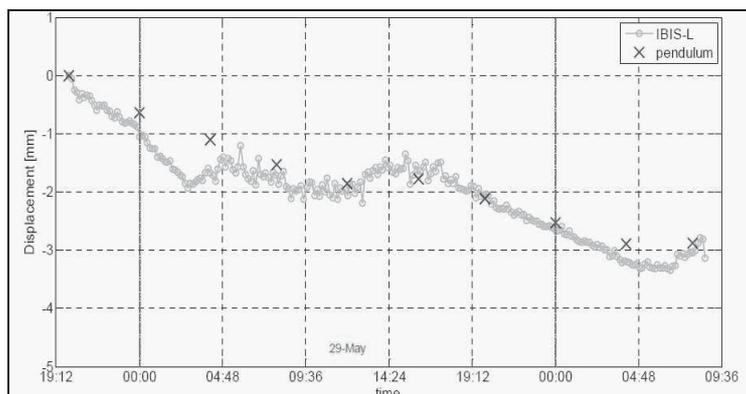


Fig. 5. Spostamento in mezzeria del coronamento misurato con l'IBIS-L (cerchi verdi), confrontato con le misure del coordinatometro lungo l'intero periodo di osservazione

### 4. Conclusioni

Dopo una presentazione dell'innovativo sistema radar (IBIS-L dell'IDS, Italia) e dei suoi principi di funzionamento è stata descritta un'applicazione di monitoraggio statico su una diga ad arco-gravità. I risultati del test, confrontati con strumenti standard di controllo, evidenziano buone prestazioni di questo sensore accoppiato con la tecnica SAR per la misurazione di movimenti lenti. I risultati di questa sperimentazione sono molto promettenti e aprono nuove prospettive per l'analisi statica del comportamento di grandi dighe e di altri tipi di costruzioni di grandi dimensioni. Infatti, gli strumenti e i sensori applicati finora per la misurazione delle deformazioni della diga, funzionano con un'alta precisione e affidabilità ma riescono a dare informazioni solo per un numero limitato di punti. D'altra parte, nel corso di questa sperimentazione, sono stati misurati un elevato numero di punti (alcune migliaia), monitorati nel corso di un periodo di 37 ore. Anche nel caso dell'insieme  $S_{0,99}$  di soli punti con elevata coerenza, sono presenti più di 30 punti diffusi su tutto il paramento di valle della diga. Gli spostamenti misurati sono stati verificati tramite un confronto con le misure effettuate su un filo a piombo attraverso un coordinatometro; i risultati hanno confermato la

precisione di questo sistema GB-InSAR inferiore a  $\pm 1$  mm. Per l'attuale stato dell'arte, questa applicazione non può essere realizzata da altri strumenti (stazione totale o TLS) visto che il sensore dovrebbe essere posizionato molto lontano dalla struttura monitorata (anche alcune centinaia di metri), in quanto le dighe si trovano solitamente in ambienti di montagna impervi; da distanze così elevate le strumentazioni classiche non permettono di fornire precisioni elevate come per l'IBIS-L. Inoltre, il passo temporale di acquisizione dei dati (9 minuti) e il grado di automazione, sono eccellenti se comparati ad altri sensori di monitoraggio. Queste caratteristiche favoriscono l'utilizzo dei sistemi GB-InSAR per il controllo continuo e per la loro integrazione con altre tecniche di monitoraggio.

Un secondo importante risultato di questa prova riguarda la facilità di utilizzo del sistema commerciale IBIS-L per le quotidiane attività di monitoraggio della diga da parte degli utenti finali. La presenza di una semplice interfaccia, il basso numero di parametri da impostare e la standardizzazione del processo SAR, consentono il suo utilizzo anche da parte di persone non qualificate in tecniche radar. Tuttavia, la ricerca sperimentale e teorica in questo settore, necessita di ulteriori miglioramenti. In particolare, deve essere sviluppata una metodologia che consenta la precisa localizzazione dei punti di controllo. Inoltre, si prevede che l'integrazione dei dati tra TLS (in grado di rilevare deformazioni a bassa frequenza con una maggiore densità di punti) e GB-InSAR (in grado di monitorare deformazioni ad alta frequenza con una soluzione spaziale inferiore) aprirà ulteriori interessanti applicazioni.

### **Ringraziamenti**

Infine si vuole ringraziare A2A ATO-SIE (Grosio, Italia) per la disponibilità della diga del Lago di Cancano e per la cooperazione nel corso degli esperimenti con il sistema *IBIS-L*.

### **Bibliografia**

- Alba M., Bernardini G., Giussani A., Ricci P.P., Roncoroni F., Scaioni M., Valgoi P., Zhang K. (2008), "Measurement of Dam Deformations by Terrestrial Interferometric Techniques", *IAPRSSIS*, 37(B1), Pechino, Cina: 133-139.
- Bernardini G., Ricci P., Coppi F. (2007), "A ground based microwave interferometer with imaging capabilities for remote measurement of displacements", *GALAHAD Work.*, 7<sup>th</sup> Geomatic Week, Barcellona, Spagna, 20-23 Feb, [www.idscompany.it/upload4](http://www.idscompany.it/upload4) (ultimo accesso 30/04/2008).
- Ferretti A., Monti Guarnieri A., Prati C., Rocca F., Massonet D. (2007), "InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation", *ESA Publications*, Noordwijk, Olanda.
- Gentile C., Bernardini G. (2008), "Radar-Based Measurement of Deflection on Bridges and Large Structures: Radar Techniques and Static Tests", Proc. of *SACoMaTiS 2008*, 1-2 Sett., Varenna (LC), Vol. 1: 507-517.
- Lindenbergh R., Pfeifer N. (2005), "A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock", Proc. of 7<sup>th</sup> *Optical 3-D Measurement Techniques*, Vienna, Austria, 3-5 Oct, Vol. 2: 61-70.
- Lingua A., Piatti D., Rinaudo F. (2008), "Remote Monitoring of a Landslide Using an Integration of GB-InSAR and LIDAR Techniques". *IAPRSSIS*, 37(B1), Pechino, Cina: 361-366.
- Tarchi D., Rudolf H., Luzi G., Chiarantini L., Coppo P., Sieberg A.J. (1999), "SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam", Proc. of *IGARSS '99*, 28 Giu-2 Lug, Amburgo, Germania, Vol.3: 1522-1524.
- Tsakiri M., Lichti D., Pfeifer N. (2006), "Terrestrial laser scanning for deformation monitoring", Proc. of 12<sup>th</sup> *FIG Symp. on Deformation Measurement* e 3<sup>rd</sup> *IAG Symp. on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Baden, Austria, 22-24 Mag, immaginato su CDROM: 10 pp..