Test sperimentali con interferometro radar

Mario Alba(*), Alberto Giussani (*), Fabio Roncoroni (*), Marco Scaioni

(*) Politecnico di Milano – Polo regionale di Lecco, via Marco d'Oggiono, 0341 488779,
(mario.alba, fabio.roncoroni,marco.scaioni)@polimi.it

Abstract
Da un paio di anni è in commercio un sensore mono-dimensionale (IBIS-S), basato su interferometria radar prodotto da IDS. Questo strumento permette la misura remota e simultanea degli spostamenti di più punti con precisioni dichiarate al di sotto di 2/100mm. In questo articolo si vogliono proporre differenti test sperimentali atti a valutare la reale precisione metrologica dello strumento in ambienti di lavoro non controllati. Inoltre è stata effettuata una differente serie di prove al fine di verificare la possibilità e la precisione del riposizionamento dello strumento per eseguire un monitoraggio statico in campagne di misura non consecutive tra loro. Durante i test sono state analizzate le diverse criticità: quelle meccaniche di riposizionamento, quelle intrinseche strumentali (salto di fase) ed in particolare quelle causate dalle variazioni ambientali e dagli algoritmi utilizzati per la modellazione delle misure.

In the last two years a mono-dimensional sensor based on radar interferometry tecnology is commercialized by IDS company. This instrument called IBIS-S measures remote point with precision lower than 2/100mm. In this paper different experimental tests have been carried out in order to valuate the real metrological accuracy of the instrument when this don't work in standard and controlled conditions. First, a test to valuate the precision of the displacement has been carried out. Other test has been carried out in order to use the sensor in different epochs without leaving the tool always installed. For this reason a mechanical system to fix the instruments always in the same place has been designed and validated.

Introduzione
Il sensore radar, convenzionalmente denominato IBIS (Image By Interferometric Survey), è stato sviluppato dall'Azienda IDS (Ingegneria Dei Sistemi SpA di Pisa) in collaborazione con il Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni dell'Università di Firenze. Il sistema radar IBIS è stato concepito per ottenere un ottimo grado di precisione nelle misurazioni anche da parte di utenti che non necessariamente abbiano conoscenze specifiche della teoria radar. Lo strumento può essere impiegato in due differenti configurazioni funzionali. La prima è composta unicamente da un sensore radar mono-dimensionale chiamato IBIS-S che consente misurazioni di tipo sia statico che dinamico. La seconda è composta dallo stesso sensore IBIS-S montato su un apposito binario, che permette di applicare la tecnica radar SAR (Synthetic Aperture Radar). Questa configurazione chiamata IBIS-L restituisce immagini bidimensionali dello scenario, per maggiori informazioni riguardo l'utilizzo di tale configurazione si veda Alba *et al.* 2008.
I test descritti in seguito prenderanno in considerazione unicamente il radar monodimensionale IBIS-S, per maggiori informazioni riguardo le sue caratteristiche tecniche e di funzionamento si rimanda a (IDS, 2009). L'obiettivo di questo articolo è quello di testare la strumentazione IBIS-S per effettuare monitoraggi statici in diverse epoche temporali e quindi con il riposizionamento dello strumento. A tal proposito oltre a verificarne la precisione di misura dello strumento (test1) si validerà un sistema progettato per il riposizionamento dello strumento sempre nella medesima

posizione (test2). Infine verrà analizzata (test 3) l'influenza sulle misure radar delle variazioni dei parametri ambientali (umidità, temperatura e pressione).

Test 1: stima della precisione di misura dello strumento

La prova sperimentale che verrà presenta in seguito ha lo scopo di valutare la precisione di misura dello strumento effettuando dei confronti tra gli spostamenti misurati e quelli imposti attraverso una slitta micrometrica. I test sono stati svolti in ambiente non controllato con durata limitata delle singole sessioni per evitare che le variazioni delle condizioni ambientali al contorno influissero sulle misure.

Il test è stato eseguito sul terrazzo dell'edificio che ospita i laboratori del Polo Regionale di Lecco del Politecnico di Milano (vedi fig. 1). Per il seguente test sono stati utilizzati appositi corner che garantissero una elevata risposta del segnale verso lo strumento se ben visibili e correttamente orientati verso il radar; I due corner utilizzati sono stati fissati rispettivamente su un lato dell'edificio ad una distanza di circa 10m, mentre il secondo, ad una distanza di circa 14,5 m dal radar, è stato posizionato su una slitta micrometrica che consente di imporre spostamenti con precisioni dell'ordine di 10µm.

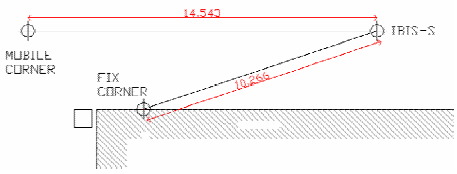


Figura 1: immagine e schema di misura della prova

Il test è composto da quattro prove tra loro indipendenti e durante ogni prova sono stati imposti spostamenti di differente ordine di grandezza: 1cm, 1mm, 100µm, 10 µm. Gli intervalli di misura, i valori medi, le deviazioni standard e gli errori ricavati dalla differenza tra lo spostamento imposto e quello rilevato sono riportati in tabella 2. Per ogni step di spostamento sono state acquisite 60 misure con campionamento di 5 secondi ed i dati riportati in tabella sono stati depurati di alcuni outlier (2%) tutti concentrati nella prima fase di acquisizione dello strumento. Inoltre per le misure di ordine centimetrico i dati registrati dallo strumento sono stati corretti dal salto di fase. Questo perché la tecnica interferometrica fornisce una misura dello spostamento radiale d_r data da:

$$d_r \propto -\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\varphi \qquad (1)$$

dove λ è la lunghezza d'onda del segnale elettromagnetico e $\Delta\varphi$ è la differenza di fase. Dalla formula (1) è evidente come sia possibile misurare spostamenti pari a ¼ λ ed essendo λ pari 18mm lo strumento non è quindi in grado di discriminare spostamenti superiori a 4.5mm; solo con misure fornite da strumentazione esterna sarà possibile discriminare tali spostamenti a meno di non ridurre il tempo di campionamento in modo da far si che tra un'epoca e l'altra non ci siano spostamenti superiori a tale entità.

I risultati di questo test hanno confermato le precisioni dichiarate dalla casa costruttrice, con deviazione standard ed errori massimi compresi in ±50µm e soprattutto tali errori risultano distribuiti normalmente attorno al valore reale. Occorre ribadire che queste precisioni sono state raggiunte per sessioni di prove con durata massima di 30 minuti dove la variabilità ambientale è rimasta pressoché costante. Inoltre per correttezza bisogna anche dire che le medesime prove sono state effettuate anche in un ambiente chiuso (un aula di dimensioni 11x6m) dando però dei risultati molto strani ed ancora non completamente giustificati; l'unico motivo è quello imputabile allo scenario non adatto a questi rilievi per la presenza di riflessioni multiple. Infatti, in questa prova sono stati ottenuti valori di deviazioni standard di pochi µ ma il confronto con i movimenti imposti ha presentato errori anche di ordine millimetrico.

step [mm]	media [mm]	dev.st [mm]	errore [mm]
0	0.01	0.00	-0.01
-10	-10.00	0.02	0.00
-20	-19.99	0.05	-0.01
-30	-30.03	0.01	0.03
0	0.00	0.00	0.00
-1	-0.98	0.02	-0.02
-2	-2.03	0.00	0.03
-3	-2.99	0.04	-0.01
-4	-4.00	0.01	0.00
0	0.00	0.05	0.00
0	0.00	0.01	0.00
-0.1	-0.11	0.01	0.01
-0.2	-0.19	0.01	-0.01
-0.3	-0.29	0.01	-0.01
-0.4	-0.36	0.01	-0.04
0	-0.03	0.01	0.03
0	-0.01	0.01	0.01
-0.01	-0.02	0.01	0.01
-0.02	-0.04	0.02	0.02
-0.03	-0.03	0.02	0.00
-0.04	-0.03	0.02	-0.01
-0.05	-0.07	0.04	0.02
0	0.01	0.02	-0.01
		errore max	0.03
		errore min	-0.04
		errore medio	0.00

Tabella 2. Confronto tra spostamenti imposti e misurati con slitta micrometrica

Test 2: Riposizionamento del sensore

Nel caso in cui sia necessario svolgere il monitoraggio di uno stesso elemento in diverse epoche temporali, non sempre è possibile lasciare la strumentazione installata nella medesima posizione. In questi casi si ha il problema di dover riposizionare il radar esattamente nella stessa configurazione per tutti i monitoraggi. Oltre ai valori standard di configurazione come la potenza del segnale e tempi di acquisizione risulta di fondamentale importanza anche un riposizionamento meccanico di precisione del sensore. Al fine di minimizzare gli errori di assetto è stato progettato, e successivamente testato un sistema di aggancio meccanico su una piastra di supporto che sfrutta gli attacchi a coda di rondine già presenti sul sensore (figura 3).

Le prove sono state svolte nel medesimo sito descritto nel precedente test; il radar è stato montato sul sistema di aggancio progettato per il riposizionamento e sono stati disposti 2 corner di dimensione 15 cm: il primo (MC) è stato montato sopra una slitta micrometrica a 21m di distanza, mentre il secondo è stato posizionato in maniera stabile ad una distanza di 9,5m dal radar (FC). Sono stati utilizzati anche altri tre corner naturali presenti nello scenario del radar ed aventi un ottimo rapporto segnale rumore disposti rispettivamente a 5.5m (NC1), 13m (NC2) e 24m (NC3)

Al fine di verificare la qualità del riposizionamento sono state effettuate 5 prove in giorni differenti. Ogni prova è stata effettuata con le medesime impostazioni dello strumento e seguendo le stesse procedure, così suddivise:

! STEP 1: lo strumento viene montato sopra la piastra di aggancio e viene effettuata un'acquisizione di 5 minuti con campionamento 5 secondi.

- STEP 2: lo strumento viene smontato e successivamente rimontato sulla piastra di aggancio; viene imposto al MC, attraverso la slitta micrometrica, uno spostamento di 3mm in direzione radiale; viene fatta un nuova acquisizione di 5 minuti.
- STEP 3: il CM viene riportato nella posizione iniziale e viene effattua un ultima acquisizione di 5 minuti.

Figura 3: piastra di riposizionamento (sinistra) e predisposizione del sistema di aggancio sul sensore (destra).

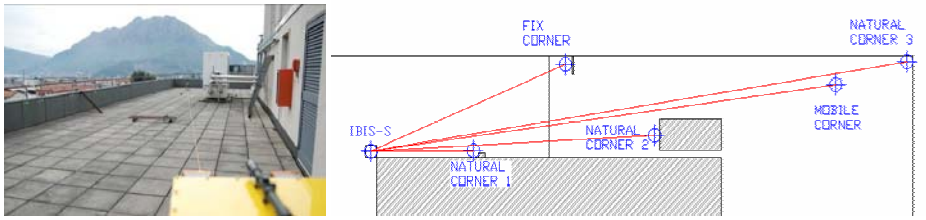


Figura 4: disposizione della strumentazione di rilievo.

[mm]	STEP	Reposition I [mm]	Reposition II [mm]	Reposition III [mm]	Reposition IV [mm]	Reposition V [mm]
NC1	2	0.028	0.058	-0.108	0.069	0.074
	3	0.044	0.133	-0.112	0.187	0.111
CF	2	-0.022	-0.052	-0.325	0.073	0.083
	3	0.048	-0.091	-0.275	-0.113	0.088
NC2	2	0.069	0.035	-0.181	-0.070	0.072
	3	0.103	-0.001	-0.177	0.081	0.072
NC3	2	0.012	0.033	-0.146	-0.021	0.092
	3	0.059	-0.022	-0.185	0.042	0.068
CM	2	0.03	0.04	0.23	-0.03	-0.04
	3	0.07	0.06	-0.24	0.01	0.03

Tabella 5: Errore in mm di riposizionamento dei bersagli tenendo come riferimento la misura effettuata allo step 1

I risultati riportati in tabella 5 evidenziano degli errori di riposizionamento molto bassi per tutte le prove ad esclusione della III dove si riscontrano errori compresi in ±0.3mm, valori che potrebbero essere causati dalla variazioni delle condizioni ambientali durante lo svolgimento della prova.
In generale sono stati misurati, sui punti di controllo, errori medi del decimo di millimetro più che accettabili per svolgere il monitoraggio di uno stesso elemento in epoche temporali. Si nota però che i risultati ottenuti variano molto se si confrontano tra loro le prove eseguite in giorni differenti, probabilmente a causa delle variazioni delle condizioni ambientali: umidità, temperatura e pressione nel quale sono state svolte le misurazioni. A tal proposito nel proseguo dell'articolo si analizzerà in dettaglio tale aspetto.

Test 3: influenza delle variabili ambientali sulla misura degli spostamenti

Al fine di analizzare l'influenza delle variazioni ambientali sulla misura degli spostamenti sono stati svolti ulteriori test. Sebbene, come dimostrato precedentemente, lo strumento fornisca eccellenti risultati in termini di precisione se impiegato nel monitoraggio di elementi posti in ambiente protetto dalle variabilità ambientali, la sua accuratezza e conseguentemente la sua affidabilità vengono decisamente meno allorché lo si impieghi per effettuare operazioni di misura in ambienti aperti. L'obiettivo di queste nuove prove risiede dunque nella ricerca di motivazioni e possibilmente dei rimedi per gli errori di entità non trascurabile di cui si vedranno essere affette le misure grezze.

Le misure sono state svolte in una zona recintata collocata nella città di Lecco. Si è realizzata in loco la postazione di misura su cui collocare lo strumento. Il fissaggio dello stesso è stato effettuato mediante l'apposita piastra, validata nel test precedente, che ne permettesse l'esatto riposizionamento in tempi successivi. All'interno dell'area visibile dallo strumento sono stati individuati, a diversa distanza dallo stesso, quattro punti che si è scelto di monitorare. Due di essi sono stati materializzati mediante il fissaggio di appositi corner (FC1 a 43m, FC2 a 96m) che garantissero una elevata risposta verso lo strumento e fossero dunque ad esso ben visibili; il terzo punto, nonché il più lontano, è stato individuato nel muro retrostante (FC3 a 125m) che, essendo caratterizzato da un elevato rapporto segnale/rumore, forniva di per sé ottime caratteristiche di risposta. Anche in questo caso come per i test precedentemente descritti un punto (MC1) è stato posizionato sulla slitta mircrometrica ad una distanza di 93m dal radar. Le operazioni di misura sono state effettuate in tre diverse giornate e le prove si sono svolte a partire dal mattino prolungandosi fino a sera. Per quanto riguarda la slitta, al corner fissato su di essa sono state imposte diverse combinazioni di spostamenti. Per avere la possibilità di confrontare le misure ottenute con valori di variabili ambientali si è identificata una stazione meteorologica situata a 500m circa dal luogo di misurazione. Per l'analisi dei risultati si sceglie di concentrarsi solo sui dati raccolti il primo giorno. Sulla destra in figura 6 si riporta un grafico rappresentante l'andamento delle variabili ambientali, che in letteratura sono indicate come maggiormente influenti: umidità, temperatura e pressione. Sempre in figura 6 è rappresentato l'andamento di un corner fisso nel tempo che causa delle variazioni ambientali, presenta movimenti che raggiungono anche 4 mm; essi risultano proporzionali alla distanza del corner dal radar ed in questo caso denotano un andamento molto simile a quello dell'umidità.

Questo test è servito agli autori per confrontare tra loro differenti metodi atti a depurare dalle misure l'influenza delle variazioni ambientali: il metodo dei PS (Permanant Scatter, Ferretti et al., 1999), il metodo Zebcher (Zebker e Rosen, 1996), e diversi metodi di stima ai minimi quadrati. Questi confronti, per completezza, verranno presentati accuratamente in un prossimo articolo, al momento ci si limita a presentare i risultati della modellazione con il metodo dei PS che è anche quello implementato nel software di gestione dello strumento. Come si può notare dai risultati numerici in figura 12, tale metodo riesce a depurare molto bene gli effetti delle variazioni ambientali e le differenze tra i movimenti rilevati sul corner MC1, rispetto ai movimenti imposti, risultano essere dell'ordine del decimo di millimetro.

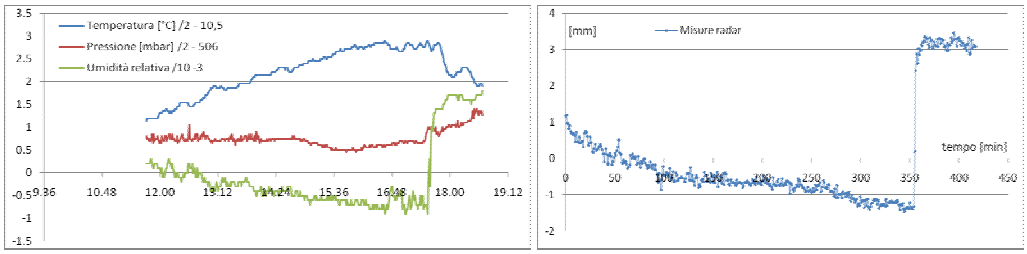
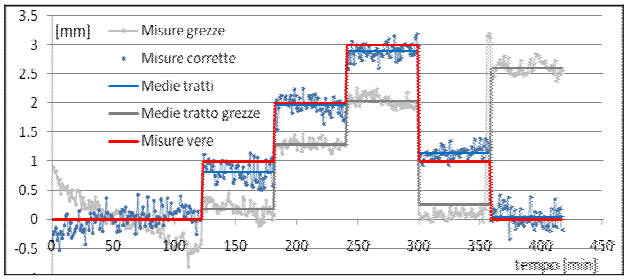


Figura 6: Andamento delle principali variabili ambientali (sinistra) e variazione del corner fisso più lontano FC3 (destra)



step [mm]	media [mm]	dev.st [mm]	errore[mm]
0	0	0.1832	-
1	0.8186	0.1692	0.1814
2	1.9604	0.1414	0.0396
3	2.8919	0.1319	0.1081
1	1.1478	0.1016	-0.1478
0	0.0433	0.1598	-0.0433

Figura 7: Correzione dei dati relativi al corner sulla slitta con l'utilizzo del corner FC1 come GCP.

Conclusioni

In questo articolo sono state analizzate le caratteristiche dello strumento IBIS-S finalizzate a verificare la possibilità di impiegare lo stesso in operazioni di monitoraggio statico senza lo stazionamento continuo dello strumento. Le precisioni di misura, confrontate con i movimenti imposti ad una distanza di circa 20m si sono dimostrate ottime, in quanto dell'ordine di pochi centesimi di millimetro. Anche il sistema di aggancio per il riposizionamento si è dimostrato affidabile con errori di riposizionamento medio inferiori al decimo di millimetro. Infine le misure radar risultano influenzate notevolmente dalle variazioni ambientali e non è possibile ottenere misure attendibili senza tener conto di questo aspetto. Per depurare il dato dalla componente ambientali il metodo dei PS si dimostra vincente, anche se, nelle applicazioni reali risulta spesso difficile applicazione; infatti è necessario trovare dei punti fissi e con una buona risposta del segnale da utilizzare come punti di controllo. Anche se non trattati in questo articolo, esistono altri metodi che, anche se pur meno precisi, che permettono di depurare le misure a partire dalla conoscenza delle variazioni ambientali. Dalle prove eseguite è quindi possibile eseguire un monitoraggio con riposizionamento dello strumento, con un errore complessivo dell'ordine di pochi decimi di millimetro.

I vincoli nell'utilizzo dello strumento sono principalmente due: il primo è la presenza di punti fissi all'interno dello scenario per depurare gli errori causati dalle variabili ambientali; il secondo è che gli spostamenti in esame tra un posizionamento ed il successivo siano inferiori a 4.5mm (salto di fase). In caso contrario bisogna procedere con misure esterne anche di minor precisione, a verificare questo aspetto per poter correggere le misure con la costante del salto di fase.

Bibliografia

Alba M., Bernardini G., Giussani A., Ricci P. P., Roncoroni F., Scaioni M., Valgoi P., Zhangd K., 2008. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Vol. XXXVII. Part B1. Beijing.

Ferretti A., Prati C., Rocca F.,1999. *Sistema per misure di spostamento di aree urbane e zone franose*. Patent n. MI99 A 001154.

IDS SpA. *IBIS-S Image by interferometric survey*. www.idsgeoradar.com

Zebker H. A., Rosen P. A., 1996. *Atmospheric artifacts in interferometric SAR surface deformation and topographic maps*.