Campi applicativi dell'Interferometria Radar: potenzialità e limiti

M. Alba(*), A. Giussani(*), F. Roncoroni(*), M. Scaioni(*)

(*) Politecnico di Milano –Polo Regionale di Lecco,via M. D'Oggiono 18/a, 23900 Lecco, Italia
e-mail: {mario.alba, alberto.giussani, fabio.roncoroni, marco.scaioni}@polimi.it

Riassunto
Il sensore IBIS-S è un radar interferometrico che permette di effettuare in remoto sia il monitoraggio statico che quello dinamico di strutture. I suoi campi di utilizzo sono moltissimi ed in particolare quelli relativi ai collaudi statici e dinamici di ponti sono abbastanza diffusi. Al momento l'esperienza accumulata nel suo utilizzo lascia in sospeso alcune problematiche non ancora perfettamente chiarite. Essendo la misura degli spostamenti monodimensionale, ossia effettuata unicamente lungo la linea di vista dello strumento, per ricavare ad esempio lo spostamento altimetrico di un punto è necessario proiettare lo spostamento rilevato lungo la componente verticale. Alcuni ponti, sottoposti ad un aumento di carico, risultano soggetti oltre che ad una deformazione verticale anche a movimenti trasversali. Di questi, quelli che si sviluppano nella direzione longitudinale, falsano inevitabilmente la misura in range e pertanto causano una fittizia componente nel movimento verticale. Per depurare questa componente sono stati effettuati degli appositi test in laboratorio che grazie al supporto di misure clinometriche riescono ad apportare le dovute correzioni alle misure di range e quindi a quelle delle variazioni altimetriche.

IBIS-S sensor is a interferometric radar, which allows static and dynamic monitoring of structures. Its application fields are many, in particular it is commonly used for static and dynamic testing of bridges. Upon the experience gained in its use leaves open some issues not yet fully clarified. The radar measure displacements only along the line of sight of the instrument, to get the altimetric displacement is necessary project this along the vertical component. Some bridges, subjected to increased load, are subject not only to vertical deformation but also transverse movements. The movement along the longitudinal direction can cause an artificial component in the vertical movement and the measurements result distorted. For this reasons a laboratory test has been carried out in order to purify this component. Thank to support of clinometric measurement the range displacement has been corrected and the final result validated by first order levelling.

Introduzione
IBIS-S è un recente radar interferometrico, la sigla sta per Image By Interferometric Survey,che può essere utilizzato nel campo dell'ingegneria civile per la misura di movimenti, deformazioni o vibrazioni delle strutture (Bernardini *et all.* 2007). Alcuni punti a favore di questo nuovo sistema radar sono la velocità di installazione e la possibilità di operare sia di giorno che di notte in qualsiasi condizione ambientale, sempre considerando gli errori e le imprecisioni che le variazioni delle condizioni ambientali possono portare.
Le caratteristiche principali di questo strumento possono essere riassunte nei due punti successivi:
- Capacità di eseguire un monitoraggio in remoto: questo significa che è possibile monitorare una struttura senza necessariamente accedere ad essa ad esempio per l'installazione di particolari sensori o mire topografiche, dato che lo strumento si basa sull'analisi degli echi radar riflessi da elementi naturali appartenenti alla struttura stessa.
Tale caratteristica permette il monitoraggio della struttura anche in una condizione di emergenza evitando situazioni di pericolo o di difficile accesso, la possibilità di monitorare un ponte senza

chiudere il traffico, effettuare un monitoraggio statico e dinamico contemporaneamente oppure monitorare una struttura in corso d'opera senza interrompere i lavori.
Comunque sia, può sempre risultare che la struttura da monitorare non sia sufficientemente riflettente e quindi non in grado di fornire un eco di risposta tale da essere percepito con chiarezza dal ricevitore; solo in questo caso si procede all'installazione di appositi corner reflector, semplici apparecchi che, una volta applicati sulla struttura, sono in grado di fornire un eco di risposta chiaro e rilevabile dal ricevitore. Essi possono essere installati anche nel caso in cui sia necessario il monitoraggio di un particolare punto della struttura.
- Capacità di monitorare simultaneamente più punti in modo continuo: il fascio radar che illumina una porzione o l'intera struttura permette un monitoraggio veloce e completo della stessa. Gli spostamenti dei diversi punti della struttura vengono registrati con frequenza di acquisizione massima di 100 Hz e con un'accuratezza compresa fra 1/100 ed 1/10 di millimetro. Queste caratteristiche sono dovute all'impiego combinato di due tecniche differenti: quella interferometrica e quella SF-CW (Stepped Frequency Continuous Wave). La prima consente di misurare movimenti submillimetrici mentre la seconda permette di discriminare lo scenario radar in intervalli di 50 cm, restituendo per ognuno di essi una misura di spostamento. Per una più completa spiegazione di queste tecniche si veda Alba *et all.* 2008

Il collaudo di ponti con il radar IBIS
Secondo la normativa vigente in Italia (DM 12-1-08), qualsiasi ponte che abbia una luce superiore ai 6 m, deve necessariamente essere collaudato prima della messa in esercizio. L'opera dunque viene assoggettata ad una prova di carico ed il collaudatore accerterà che non si producano lesioni od altri segni esteriori di dissesto durante od a seguito del carico. Inoltre è necessario, attraverso un'adeguata strumentazione, rilevare gli spostamenti (frecce) della struttura nei diversi step di carico decisi dal collaudatore, le quali vengono confrontate con quelle teoriche calcolate tenendo conto delle prescrizioni imposte dalla normativa. Il collaudatore potrà anche procedere all'esecuzione di controlli a mezzo di prove dinamiche, prove fisiche, ecc. Esso dovrà infine effettuare i riscontri geometrici essenziali dell'opera (ad es.: verticalità delle pile; posizione e corsa iniziale degli apparecchi di appoggio, ecc.), confrontandoli con i dati di progetto e riportandoli nella relazione di collaudo, anche al fine dei periodici successivi accertamenti.
Tenendo in considerazione la possibilità di effettuare la misura degli spostamenti in remoto attraverso l'utilizzo del radar IBIS-S e della sua facilità e rapidità d'installazione sarebbe utile poter sfruttare queste sue caratteristiche nell'esecuzione di un collaudo di un ponte (Gentile *et al.* 2008).
Lo strumento può essere messo in prossimità di una spalla del ponte e iniziare così con la prova di carico; dopo l'acquisizione dei dati otterremo come dato acquisito lo spostamento lungo la direzione di vista del radar (line-of-Sight).

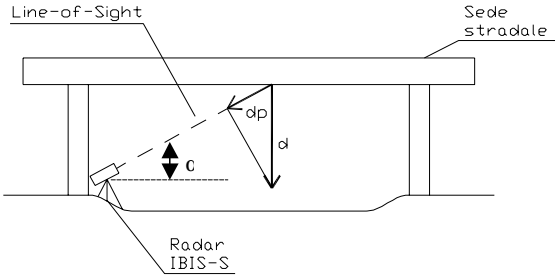


Fig. 1 – Schema del posizionamento del radar IBIS-S durante un collaudo di un ponte e misura della freccia di mezzeria

Grazie alla conoscenza della geometria del rilievo è elementare ricavare lo spostamento proiettato lungo la verticale.

$$S_{proiettato} = \frac{S_{radiale}}{sen(\alpha)} \qquad (1)$$

Se assimiliamo il ponte ad una trave, quando questa viene caricata, il concio di trave oltre che traslare verticalmente ruota attorno alla posizione dell'asse neutro in quel tratto preso in esame. Ovviamente questo vale per tutti i punti che stanno sull'intradosso o sull'estradosso della trave diversi da quelli appartenenti alla sezione di mezzeria.
La rotazione suddetta influenza notevolmente lo spostamento lungo la linea di vista dello strumento e di conseguenza non permette di ricavare la vera freccia che la struttura subisce. Le travi generalmente utilizzate nella costruzione di un ponte stradale presentano uno spessore rilevante e questa caratteristica non fa altro che influenzare ancor di più il dato ricavato dallo strumento.
Si analizza ora un concio di trave e si ipotizza che la sua unica deformata sia una traslazione verticale, come accade nella sezione di mezzeria; in questa configurazione la semplice scomposizione geometrica dello spostamento radiale lungo la verticale fornisce la freccia reale (figura 2). Come già accennato, per tutti i punti non disposti in mezzeria oltre che ad una traslazione, vi è pure una rotazione attorno alla posizione dell'asse neutro in quel concio. Si analizza ora la situazione di pura rotazione così da mettere in luce la componente che va ad influenzare la lettura dello spostamento lungo la linea di vista dello strumento.

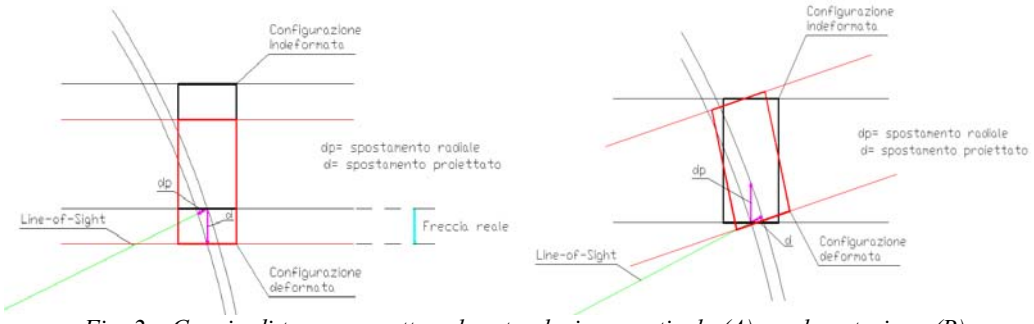


Fig. 2 – Concio di trave soggetta solo a traslazione verticale (A) e solo rotazione (B)

Osservando figura 3 si nota come una pura rotazione di un concio di trave provoca una variazione dello spostamento radiale che, se scomposta lungo la verticale dà una componente diretta verso l'alto.
Ovviamente questo spostamento non è presente nella realtà e quindi, considerarla durante un collaudo, porterebbe ad un errore non indifferente.
Combinando entrambi gli effetti precedentemente analizzati si ha una rototraslazione che provoca, come illustrato in figura 3, uno spostamento che proiettato lungo la verticale risulta sbagliato al punto da fare registrare dei possibili innalzamenti.

Fig. 3 – Concio di trave soggetto a rototraslazione e scomposizione del vettore spostamento "d"

La prova sperimentale

La prova sperimentale è stata effettuata con lo scopo di studiare una metodologia che permetta di depurare la misura in range effettuata con la strumentazione radar dall'effetto negativo indotto dalla rotazione del concio di trave; una possibile soluzione al problema consiste nell'abbinare delle misure clinometriche a quelle radar. Queste ultime hanno lo scopo di fornire gli angoli di rotazione del concio di trave nei diversi step di carico attraverso i quali si cercherà di correggere l'errore presente nella misura radar. Lo strumento di misura utilizzato è stato un clinometro monoassiale servo accelerometrico con un campo di misura pari a ± 14,5 gradi sessadecimali, una risoluzione migliore di 0,001 gradi sessadecimali e un'incertezza totale pari a ± 0,04% del fondo scala (vedi SISGEO, 2008). La validazione dei risultati avverrà infine confrontando le frecce corrette misurate con il radar con le medesime ottenute con livellazione geometrica di alta precisione. E' stato riprodotto in laboratorio il comportamento di una generica trave sottoposta a cicli di carico e, non essendo ovviamente possibile creare un modello a dimensioni reali, considerati gli ingombri e gli eccessivi carichi in gioco, si è costruito un modello che rispecchiasse il più possibile i movimenti in gioco nella realtà. Allo scopo è stato predisposto un telaio costituito da tubolari in alluminio che rappresenta solo in via semplificata un modello di ponte, come rappresentato nella figura 4. L'elemento principale di questa struttura è il tubo orizzontale superiore il quale rappresenta l'asse della trave da caricare, mentre il semispessore è rappresentato da un braccio rigidamente vincolato al tubo stesso sul quale sono stati applicati i punti di misura. Su di esso infatti troviamo: la base per le misure clinometriche, il corner reflector necessario per le misure radar.

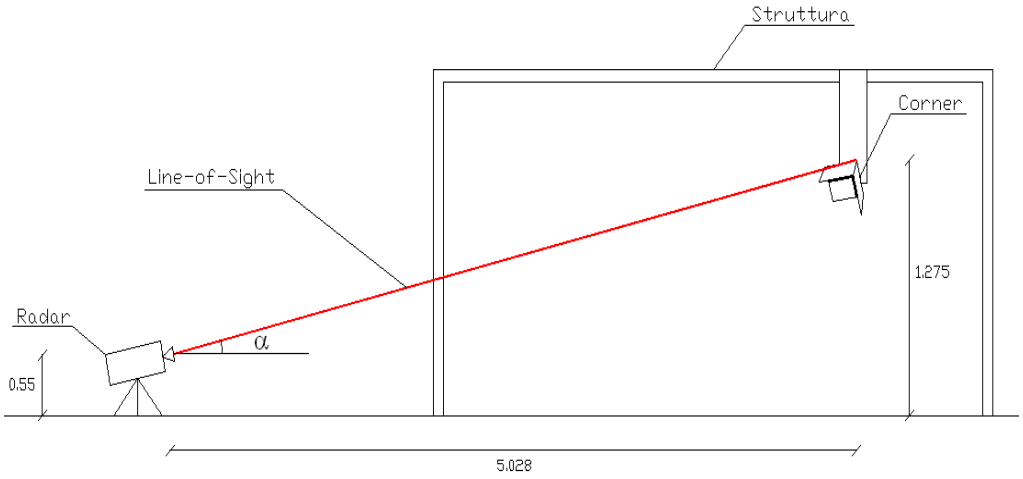
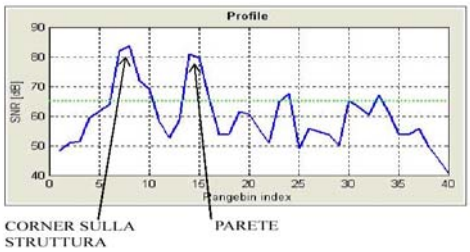


Fig. 4 – Vista frontale della struttura e geometria di rilievo.

L'utilità di questo braccio è proprio quella di mettere in luce l'effetto della rotazione del concio di trave; esso è applicato al tubo ad una distanza pari a L/4 mentre il carico, costituito da dischi metallici del peso di 10 kg l'uno, è stato applicato in mezzeria. La prova è stata realizzata in tre differenti step di carico: 0, 10 e 20 kg; per ognuno sono state eseguite simultaneamente le letture a tutti gli strumenti di misura installati. Per evitare che tra i differenti step di carico ci fossero spostamenti superiori al salto di fase (4.5mm), e quindi non individuabili dallo strumento, le acquisizioni sono state di tipo continuo con frequenza di 100Hz.

Elaborazione dei dati e risultati ottenuti

In figura 6 è rappresentato lo scenario radar dove a 7m è individuabile il picco provocato dal corner; per tale punto si riportano gli spostamenti radiali con le relative incertezza misurati per ogni step di carico.



Step [Kg]	Spostamento radiale	
	Media [mm]	Dev. Standard [mm]
0	0,031	0,052
10	1,752	0,061
20	3,623	0,145

Fig. 5 –Profili in range dello scenario radar e, spostamenti radiali rilevati con le relative incertezze

Grazie alla formula (1) è possibile calcolare gli spostamenti proiettati lungo la verticale. La geometria del sistema è stata misurata sia attraverso una stazione totale sia attraverso una misura più approssimata della stessa che del resto non influisce molto sui risultati finali.
Nella tabella 6 vengono riportate le frecce ricavate dai dati radar proiettati sulla verticale per gli step 10 e 20 kg, le medesime rilevate con livellazione e la loro differenza.%

Step [kg]	Spostamenti proiettati (mm)	Frecce Radar [mm]	Frecce Livellazione [mm]	Differenza [mm]
0	0,219	0,000	0,000	0,000
10	12,364	12,145	-2,375	14,503
20	25,567	25,348	-4,943	30,291

Tab. 6– dati radar proiettati sulla verticale e confronto con le frecce reali.

Grazie all'ausilio delle misure clinometriche è possibile correggere lo spostamento radiale rilevato dall'errore dovuto alla rotazione del concio di trave. La rotazione produce sul corner reflector un movimento sia orizzontale H_i che verticale V_i, (figura 7) che si ricava facilmente conoscendo gli angoli $+_{10}$ e $+_{20}$ e la lunghezza del braccio R secondo le relazioni:

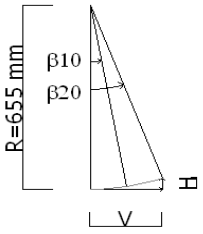
V_i (R & R , cos $+_i$! (2)

H_i (R , $sen+_i$ (3)

Una volta note le componenti dovute alla rotazione è possibile sottrarre tale componente allo spostamento radiale misurato:

$S'_{radiale}$ (V_i , sen) # H_i , cos) (4)

$S_{corretto}$ ($S_{radiale}$ &$S'_{radiale}$ (5)



Step [Kg]	Letture clinometriche (deg)	Angolo +% (deg)	Vi (mm)	Hi (mm)
0	0,367	-	-	-
10	0,549	0,182	0,003	2,085
20	0,753	0,386	0,015	4,414

Fig. 7 – Movimenti del corner ricavati dalle letture clinometriche, e schema delle misure

Una volta riproiettato lo spostamento dovuto alla rotazione in direzione radiale è possibile correggere le misure iniziali e, attraverso la formula (1), ricalcolare lo spostamento in direzione verticale (freccia). In tabella 8 si riportano le frecce finali confrontate con quelle risultanti dalla

livellazione; l'errore riscontrato, calcolato come differenza tra questi, è dell'ordine di pochi decimi di millimetro e comparabile a quello degli strumenti classici fino ad ora utilizzati per i collaudi.

Step [Kg]	Frecce Radar [mm]	Frecce Livellazione [mm]	Errore [mm]
0	-	-	-
10	-2,102	-2,358	0,256
20	-5,065	-4,943	-0,122

Tab. 8 – Dati radar corretti e confronto con le frecce reali.

Conclusioni

L'utilizzo di una strumentazione radar interferometrica per il collaudo di un ponte preclude necessariamente la conoscenza dell'inclinazione della linea di vista dello strumento stesso e in alcuni casi particolari anche della rotazione della sezione presa in esame. Questo ultimo dato è essenziale per depurare il disturbo derivante dalla rotazione del concio di trave, operazione fondamentale per poter giungere alla vera freccia.

Oltre alla necessità di dover effettuare queste misurazioni aggiuntive si è riscontrata una certa sensibilità dello strumento nell'individuazione del punto sul quale effettuare le misure se, nello scenario illuminato dalle onde radar, vi sono superfici altamente riflettenti che disturbano eccessivamente il segnale. E' risultato fondamentale il dato fornito dal clinometro in quanto una piccola variazione dello stesso porta a risultati assai diversi. E' dunque necessario utilizzare un clinometro di buona precisione che non venga eccessivamente influenzato dalle eventuali vibrazioni presenti nella struttura da monitorare. In questa prima fase non è stato possibile testare questa metodologia di lavoro su una struttura reale; sarebbe interessante infatti verificare su scala maggiore il buon funzionamento del metodo di correzione dei dati rilevati. In secondo luogo sarebbe opportuno verificare, avendo a disposizione i disegni esecutivi dell'opera, se è possibile ricostruire la geometria di rilievo evitando di utilizzare la stazione totale. Infatti, l'impiego di un eccessivo numero di strumenti nel collaudo farebbe passare in secondo piano i vantaggi forniti dal radar a favore di un ritorno alla strumentazione di tipo classico per l'esecuzione delle prove.

Si fanno presenti i molteplici vantaggi nell'utilizzo della strumentazione radar interferometrica nel collaudo statico di ponti come la rapidità d'installazione della strumentazione mantenendo comunque paragonabili i tempi di elaborazione dati rispetto ai metodi tradizionali usati e la possibilità di eseguire contemporaneamente un monitoraggio sia statico che dinamico.

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. *IIAPRSSIS.* Vol. XXXVII. Part B1. Beijing.

C. Gentile, G. Bernardini (2007): *Interferometria radar per il monitoraggio dinamico di ponti,* Strade & Autostrade n.4/07, 2-7

Ministero delle Infrastrutture (2008): *Norme tecniche per le costruzioni,* D.M.12-01-2008

Ministero dei Lavori Pubblici: *Aggiornamento delle norme tecniche per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo di ponti stradali,* D.M. 04-04-1990

C. Gentile, G. Bernardini (2008): *Misura remota di spostamenti in prove di carico su ponti stradali,* Strade & Autostrade n.4/08, 174-179

Sito SISGEO: www.sisgeo.it, ultimo accesso settembre 2009