

IL MONITORAGGIO DINAMICO DELLE STRUTTURE E DELLE INFRASTRUTTURE CON INTERFEROMETRIA RADAR TERRESTRE

Alessandro Brunetti⁽¹⁾, Paolo Mazzanti⁽¹⁻²⁾

⁽¹⁾ NHAZCA S.r.l., Spin-off di Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Via Bachelet n.12, 00185, Roma

⁽²⁾ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", P.le Aldo Moro n.5, 00185, Roma

1. INTRODUZIONE

Nell'ultimo decennio si è assistito ad un crescente sviluppo di soluzioni tecniche innovative di metodi osservazionali (Peck, 1969) per la caratterizzazione esaustiva e speditiva delle proprietà dinamiche di strutture ed infrastrutture e per il monitoraggio periodico dello stato di conservazione delle stesse, noto nella letteratura scientifica come "*Structural Health Monitoring*" (*SHM*) (Balageas et al., 2006). In particolare, tra le tecnologie emergenti in tale ambito, i sistemi di telerilevamento (Mazzanti, 2012) hanno avuto un ruolo predominante. Tra le tecniche di telerilevamento più efficaci per lo *SHM* figura l'Interferometria Radar Terrestre (Brunetti & Mazzanti, 2015; Mazzanti et al., 2015; Mazzanti et al., 2013; Bernardini et al., 2007; Hanssen, 2001), la cui efficacia è oggi pienamente comprovata. Grazie agli evidenti vantaggi offerti da tale tecnica (come la rapidità di installazione della strumentazione e di acquisizione dei dati, l'elevata risoluzione spaziale e temporale di campionamento, ecc.), questa viene sempre più frequentemente impiegata soprattutto per la valutazione speditiva di alcune caratteristiche strutturali (come le frequenze proprie di vibrazione, le forme modali e le ampiezze di oscillazione, i fattori di smorzamento, ecc.) di ponti, viadotti, edifici ed altre tipologie di strutture civili ed industriali, fornendo risultati del tutto paragonabili a quelli ottenuti attraverso altre tecniche convenzionali di monitoraggio "da contatto" come, ad esempio, reti di sensori velocimetrici e/o accelerometrici installati sulle strutture (Pieraccini et al., 2008; Atzeni et al., 2010; Gentile & Bernardini, 2010; Cunha et al., 2001; Mazzanti et al., 2014). Tali caratteristiche rendono la tecnica idonea per rapide ricognizioni dei principali parametri strutturali, anche in condizioni di emergenza, abbattendo i costi legati alle onerose fasi progettuali e di installazione tipiche di altre tecniche convenzionali a contatto.

2. PRINCIPI DI BASE DELL'INTERFEROMETRIA RADAR TERRESTRE

L'Interferometria Radar Terrestre (TInRAR) è una tecnica di telerilevamento attraverso la quale è possibile misurare simultaneamente gli spostamenti di numerosi punti di edifici, strutture o altri elementi antropici e naturali, con elevate frequenze di campionamento del dato, consentendo di eseguire contestualmente sia analisi statiche che dinamiche (misura delle vibrazioni). Tale misura viene eseguita completamente in remoto, ovvero senza l'installazione di altri sensori o riflettori a contatto con la struttura, sfruttando pertanto la naturale riflettività alle microonde degli elementi presenti nello scenario irradiato. In particolare, il sensore

TInRAR è costituito da un radar interferometrico ad apertura reale “coerente” (in grado quindi di emettere impulsi radar a lunghezza d’onda nota), dotato di una o più antenne emittenti e riceventi (Figura 1). La tecnica interferometrica consente il calcolo degli spostamenti lungo la linea di vista strumento-scenario (LOS), attraverso il confronto delle informazioni di fase dell’onda elettromagnetica emessa e riflessa a differenti intervalli temporali. Lo spostamento è quindi calcolato, simultaneamente, su un elevato numero di punti della struttura, attraverso la relazione fondamentale riportata in Figura 2.



Figura 1: esempi di sistemi radar interferometrici terrestri.

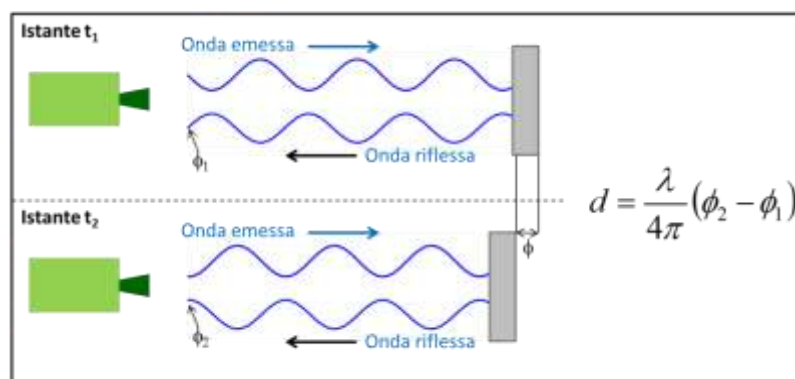


Figura 2: principio interferometrico per il calcolo degli spostamenti (d = spostamento misurato; λ = lunghezza d’onda emessa; ϕ = misura della fase grezza per ogni acquisizione).

In Figura 3 si riporta uno schema rappresentativo della modalità di acquisizione di un sistema TInRAR: l’area investita dal fascio d’onda radar viene discretizzata in celle di risoluzione “monodimensionali” nella direzione di *range* (ovvero lungo la linea di vista strumentale). Per ogni cella di risoluzione è possibile ricavare due parametri fondamentali:

- i) Ampiezza: fornisce informazioni in merito alla capacità dei target naturalmente presenti nello scenario investigato di riflettere le onde radar;

- ii) Fase: consente di eseguire misure di spostamento attraverso il confronto tra acquisizioni eseguite a diversi intervalli temporali.

Oggetti ricadenti all'interno della medesima cella di risoluzione non sono pertanto discriminabili e contribuiscono ad un unico contributo di riflessione.

In Figura 4 si riporta uno schema rappresentativo di alcune geometrie di monitoraggio TInRAR per diverse tipologie di strutture, con la proiezione delle rispettive celle di risoluzione.

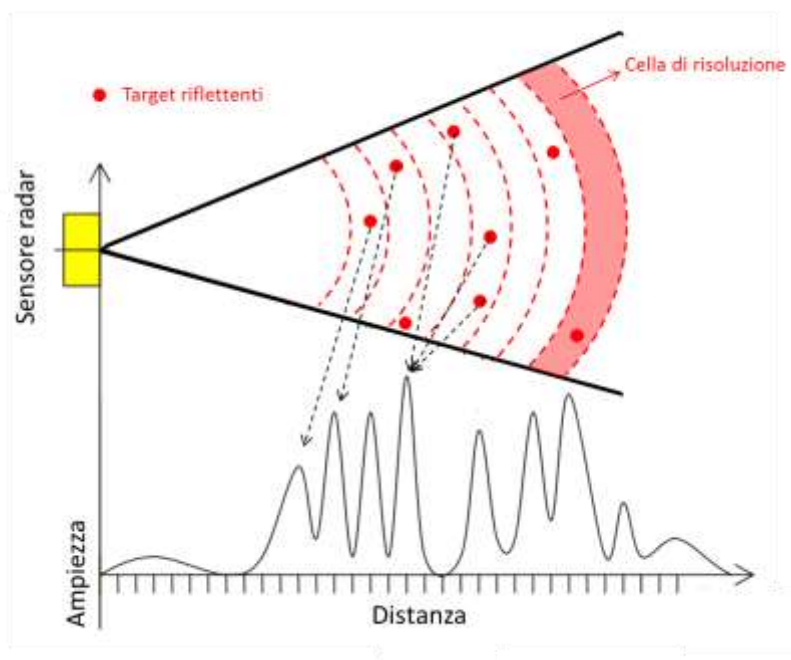


Figura 3: schema rappresentativo delle modalità di acquisizione di un sistema TInRAR.



Figura 4: schema rappresentativo di alcune geometrie di monitoraggio TInRAR per diverse tipologie di strutture: a) torri; b) ponti.

Le portate strumentali tipiche dei sensori attualmente in commercio variano da alcune centinaia di metri fino ad alcuni km.

In Tabella 1 si riportano alcuni parametri tecnici relativi ai principali sistemi TInRAR in commercio.

Parametro	Valore
Massima distanza di acquisizione	Variabile da alcune centinaia di metri ad alcuni chilometri
Massima frequenza di campionamento (PRF)	Variabile da alcune centinaia di Hz fino ad alcune migliaia di Hz
Accuratezza	Fino al centesimo di mm (in condizioni di elevato rapporto segnale/rumore)
Risoluzione spaziale	Max. 75 cm (in range)

Tabella 1: parametri tecnici relativi ai principali sistemi TInRAR in commercio.

3. PRINCIPALI CRITERI PER LA PROGETTAZIONE DI UN MONITORAGGIO DINAMICO CON TECNICA TInRAR

3.1 Analisi preliminare di fattibilità e identificazione della migliore postazione di monitoraggio

L'analisi preliminare di fattibilità si basa su alcuni criteri fondamentali che dipendono sia dalle caratteristiche intrinseche della tecnica TInRAR che dalle caratteristiche della struttura oggetto di monitoraggio e dalle condizioni logistiche sito-specifiche. In particolare, non essendo possibile discriminare oggetti ricadenti nella medesima cella di risoluzione in *range* (ubicati quindi alla stessa distanza dal radar), le strutture che meglio si prestano per un monitoraggio dinamico con tecnica TInRAR sono quelle caratterizzate da un prevalente sviluppo monodimensionale verticale (come torri, ciminiere, grattacieli, ecc., Figura 5) od orizzontale (come ponti, viadotti, passerelle, ecc., Figura 6), rispetto a strutture a prevalente estensione planimetrica (Figura 7) sulle quali si potrebbe incorrere in problemi di ambiguità (oggetti corrispondenti a diversi settori della struttura che, essendo ubicati ad eguale distanza dal radar, ricadono nella medesima cella di risoluzione e non sono pertanto discriminabili).



Figura 5: esempi di strutture a prevalente sviluppo verticale.



Figura 6: esempi di strutture a prevalente sviluppo orizzontale.



Figura 7: esempi di strutture a prevalente sviluppo planimetrico.

Ai fini del corretto svolgimento di un monitoraggio dinamico con tecnica TInRAR, è inoltre opportuno disporre di idonee postazioni di misura. In particolare, considerata la possibilità di misurare spostamenti lungo la sola linea di vista strumentale, è opportuno identificare almeno due (o più) postazioni di misura dalle quali si abbia di una diversa vista prospettica della struttura oggetto di indagine. Ad esempio, nel caso di strutture a prevalente sviluppo verticale, la configurazione standard ideale è quella riportata in Figura 8, attraverso la quale è possibile identificare i principali modi di vibrazione lungo le tre componenti di movimento (x, y e z). In particolare, nello schema di Figura 8, la postazione TInRAR_1 è ubicata in prossimità della base della struttura e la linea di vista (LOS) risulta pressoché parallela alla struttura, consentendo di eseguire la misura degli spostamenti (e di conseguenza delle vibrazioni) lungo l'asse verticale. Di contro, le postazioni TInRAR_2 e TInRAR_3, sono ubicate ad una maggiore distanza e la linea di vista (LOS) risulta orientata prevalentemente sul piano ortogonale alla struttura consentendo di eseguire la misura degli spostamenti orizzontali. Disponendo le due postazioni ad angolo retto rispetto all'asse verticale della struttura, è infine possibile identificare tutti i modi di vibrazione orizzontali. Conoscendo la distanza esatta delle postazioni di misura TInRAR dalla struttura e l'inclinazione del sensore radar sul piano verticale, è infatti possibile eseguire la scomposizione dei vettori spostamento di ciascuna cella di risoluzione, determinarne l'esatta quota rispetto al piano campagna e ricavare i valori di spostamento sul piano orizzontale (Figura 9).

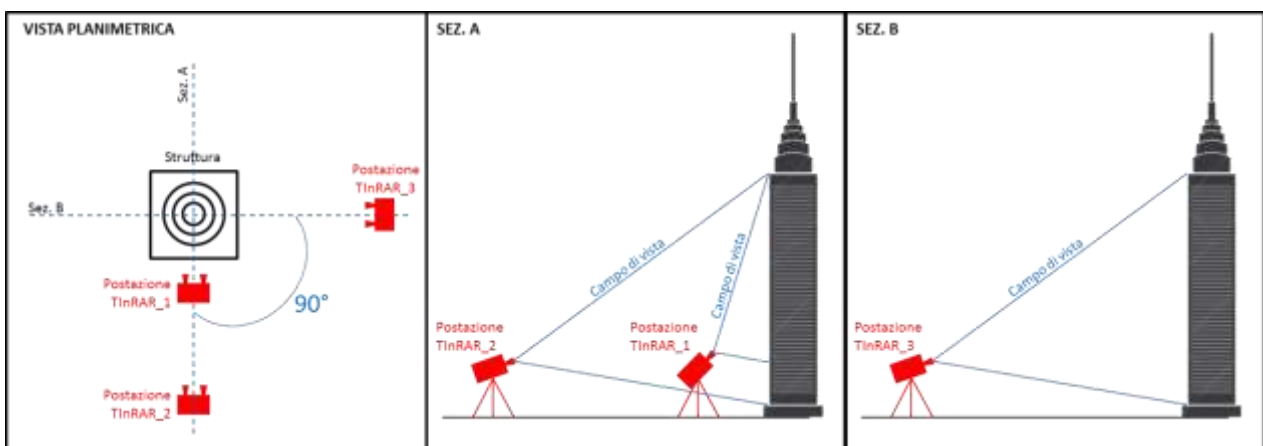


Figura 8: esempio di geometria di monitoraggio dinamico di una struttura a prevalente sviluppo verticale con tecnica TInRAR.

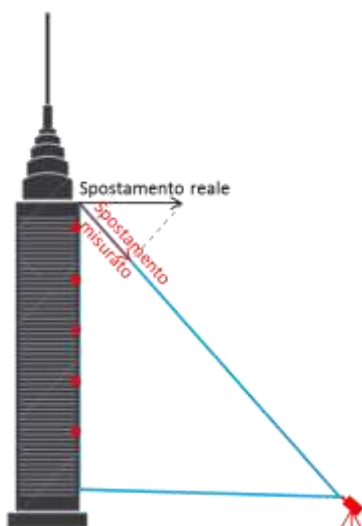


Figura 9: schema esemplificativo della misura degli spostamenti lungo la linea di vista strumentale (LOS) e scomposizione vettoriale per ricavare lo spostamento orizzontale.

3.2 Modalità di installazione

Il sistema di monitoraggio interferometrico per analisi statiche e dinamiche può essere installato sia su piattaforma permanente (utile in caso di campagne di monitoraggio in continuo oppure per l'esatto riposizionamento del sensore in caso di monitoraggi periodici), sia su treppiede per di rilievi di breve durata che non prevedono ulteriori campagne di misura nel tempo (Figura 10). In entrambi i casi è opportuno prevedere dei sistemi che consentano l'orientamento del sensore radar sia sul piano orizzontale che verticale.

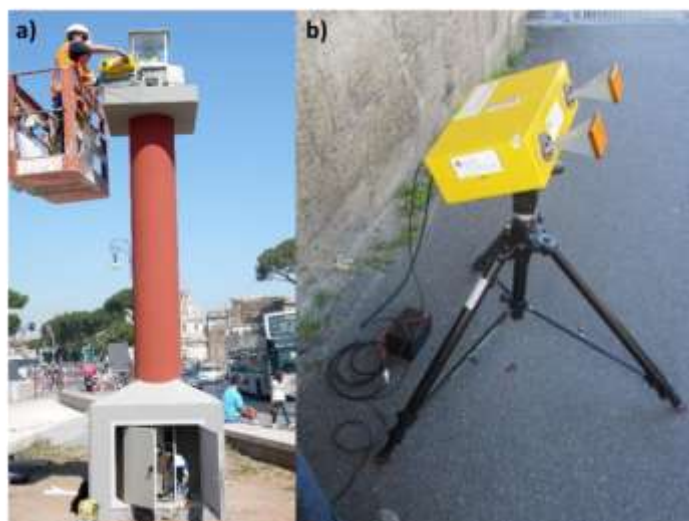


Figura 10: esempio di installazione di un sistema TInRAR su piattaforma permanente (a) e su treppiede (b).

3.3 Eventuale installazione di sensori complementari (opzionali)

Come anticipato in precedenza, tramite il monitoraggio con tecnica TInRAR è possibile misurare solo le componenti dei vettori spostamento coincidenti con la linea di vista strumentale (ovvero la congiungente

sensore-target riflettente). Nei casi in cui non sia possibile eseguire rilievi da punti di vista differenti al fine di ricostruire modi e frequenze di vibrazione lungo diverse direzioni di movimento (come mostrato in precedenza in Figura 8), oppure nel caso si renda necessario eseguire simultaneamente misure lungo le tre direzioni di movimento (senza disporre di due o più sistemi TInRAR), si può valutare di installare uno o più sensori accelerometrici o velocimetrici a contatto sulla struttura, al fine di acquisire informazioni complementari relativamente alle frequenze con direzione di oscillazione ortogonale alla linea di vista del radar, altrimenti non rilevabili. Nello schema mostrato in Figura 11, relativo a un monitoraggio dinamico di un ponte (tipicamente eseguito installando il sensore radar al di sotto dell'impalcato), ad esempio, non è possibile identificare eventuali frequenze lungo l'asse y a meno che non si identifichi una seconda postazione di rilievo laterale dalla quale la linea di vista non sia ortogonale all'asse y oppure non si installino dei sensori complementari a contatto in grado di sopperire a tale mancanza di informazioni.

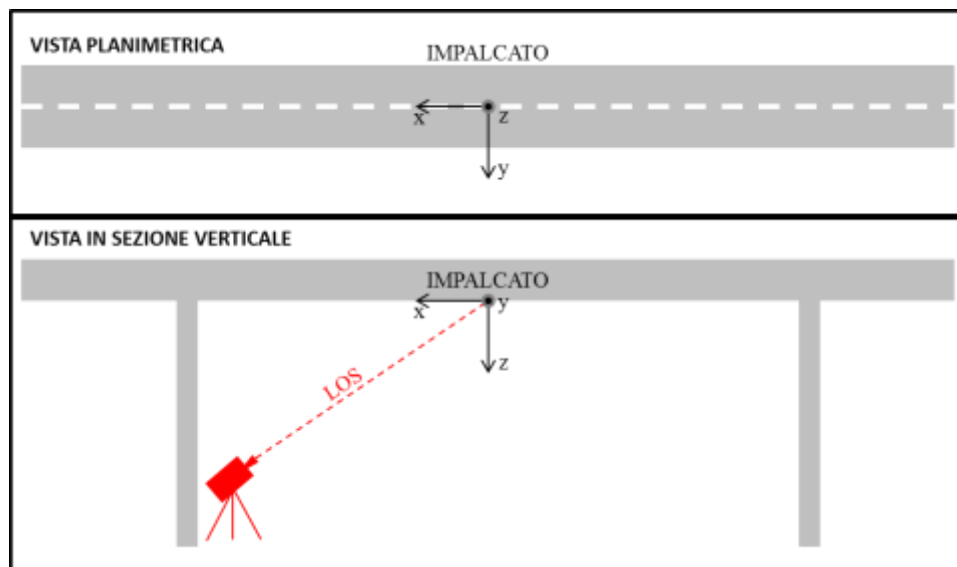


Figura 11: schema esemplificativo rappresentante le direzioni di movimento di un ponte lungo gli assi x , y e z . In questo caso, non è possibile acquisire informazioni sul comportamento dinamico della struttura nella direzione di movimento coincidente con l'asse y .

3.4 Scelta delle antenne

Le antenne per sistemi TInRAR si differenziano per l'apertura del fascio lungo il piano orizzontale e verticale, che a sua volta ne influenza il guadagno. Il criterio di scelta delle antenne si basa essenzialmente sulla tipologia di struttura da monitorare, sulla sua lunghezza (o altezza) e sulle postazioni di monitoraggio prescelte, che determinano la visibilità della struttura e lo spazio che essa ricopre nel campo di vista strumentale. E' bene tuttavia tener presente che antenne con ampia apertura angolare (sia sul piano orizzontale che verticale) sono solitamente caratterizzate da un minor guadagno che può determinare una minore ampiezza del segnale radar di ritorno e, di conseguenza, perdita di accuratezza nella misura degli spostamenti.

3.5 Definizione dei parametri di acquisizione

Si riporta, di seguito, un elenco (non necessariamente esaustivo) dei principali parametri di acquisizione tipici per un monitoraggio dinamico con tecnica TInRAR:

- i) Massima distanza di acquisizione: è necessario impostare un valore almeno pari alla distanza tra il radar e il punto più lontano della struttura (meglio se leggermente maggiore) per evitare una possibile perdita di informazione sui settori più lontani. Tuttavia, la mole di dati generata (e, di conseguenza, i tempi di elaborazione) incrementa in modo considerevole con l'aumento della distanza.
- ii) Frequenza di campionamento (PRF): la scelta della frequenza di campionamento si basa sulla conoscenza preliminare delle possibili frequenze di vibrazione della struttura (molte delle quali sono disponibili in letteratura) e dovrebbe essere pari ad almeno il doppio della massima frequenza di vibrazione attesa. E' opportuno considerare che la massima frequenza di acquisizione (per alcuni sistemi TInRAR) può variare in funzione della massima distanza di acquisizione impostata e che, comunque, la mole di dati generata (e, di conseguenza, i tempi di elaborazione) incrementa in modo considerevole con l'aumento della frequenza di campionamento.
- iii) Durata dell'acquisizione: uno dei principali vantaggi della tecnica TInRAR è quello di consentire l'acquisizione di dati per la definizione dei principali parametri dinamici delle strutture attraverso rilievi speditivi. Nella maggior parte dei casi (soprattutto se sussistono sollecitazioni naturali sulla struttura come vento o altre forzanti ambientali) sono sufficienti rilievi della durata compresa tra 15 e 30 minuti (da ciascuna postazione di monitoraggio stabilita).
- iv) Risoluzione in range (lungo la linea di vista): è sempre preferibile impostare la massima risoluzione spaziale (pari a 75 cm) al fine di ottenere il maggior numero possibile di punti di misura sulla struttura.

4. ESEMPI APPLICATIVI

Si riportano di seguito i principali risultati ottenuti dal monitoraggio dinamico con tecnica TInRAR di un antico ponte in ferro (sito in Amantea, CS) e della Colonna Aureliana a Roma. Si rimanda alle pubblicazioni di riferimento per maggiori approfondimenti.

4.1 Monitoraggio dinamico di un antico ponte in ferro [Beninati et. al, 2015]

Amantea (CS)

Ubicazione del sito



Antico ponte in ferro rivettato a singola campata, realizzato alla fine della Prima Guerra Mondiale e tutt'oggi in esercizio per il traffico veicolare locale. La struttura è costituita da due travi longitudinali in acciaio connesse tra di loro da assi trasversali della lunghezza di 2 m. La lunghezza complessiva del ponte è di 41,6 m.

Breve descrizione della struttura



Obiettivi del monitoraggio

Analizzare il comportamento strutturale del ponte, riproducendo le condizioni ordinarie di esercizio, al fine di valutare lo stato di salute della struttura e la sua idoneità alle attuali destinazioni di impiego.

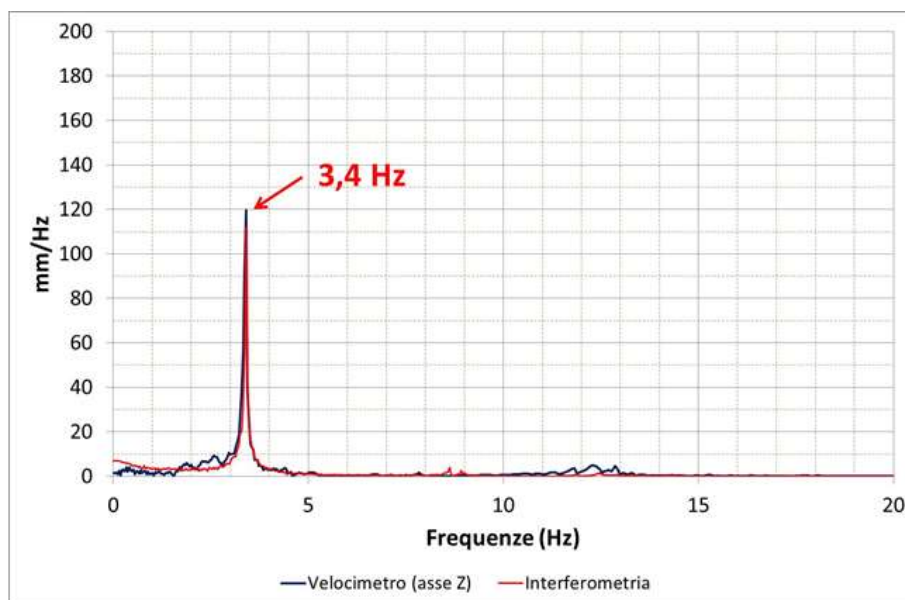
Modalità di esecuzione

I rilievi per la caratterizzazione del comportamento dinamico della struttura sono stati eseguiti con un sensore IBIS-S (IDS S.p.A.), temporaneamente installato su treppiede al di sotto dell'impalcato. Sono stati eseguiti sia rilievi di breve che di lunga durata, anche al fine di monitorare la risposta statica della struttura all'applicazione di carichi variabili nel tempo. E' stato inoltre installato un sensore velocimetrico

triassiale (modello Syscom MS2003+) nel settore centrale dell'impalcato per la calibrazione delle misure interferometriche e per lo studio della risposta alle sollecitazioni dinamiche lungo l'asse trasversale alla struttura.

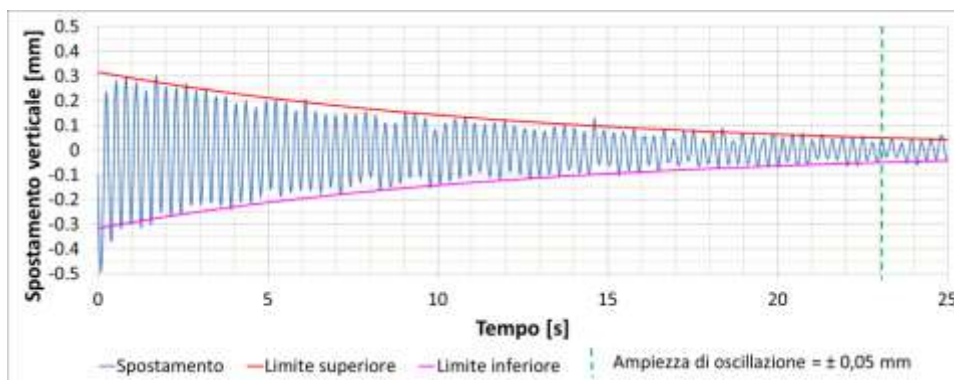


i) Identificazione della prima frequenza di vibrazione verticale, pari a 3,4 Hz (risultata concorde con le misurazioni velocimetriche).

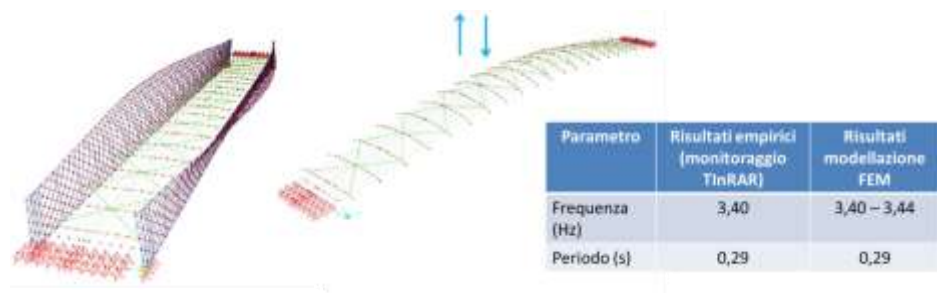


Principali risultati
 ottenuti

ii) Calcolo del fattore di smorzamento a partire dal grafico delle oscillazioni verticali a seguito del passaggio di un veicolo (pari a circa 0,6 %).



iii) Validazione del modello numerico ottenuto con metodi FEM (Finite Element Model).



4.2 Monitoraggio dinamico della Colonna Aureliana a Roma [Bongiovanni et. al, 2015]

Piazza Colonna (Roma)

Ubicazione del sito



La Colonna Aureliana è costituita da 19 blocchi anulari cavi, impilati ad ottenere una scala interna a spirale. La colonna è alta 29,6 m ed ha un diametro di 3,7 m. Sulla sommità della Colonna è presente la statua di San Paolo, che poggia su un basamento a pianta quadrata di lato pari a circa 6 m.

Breve descrizione della struttura

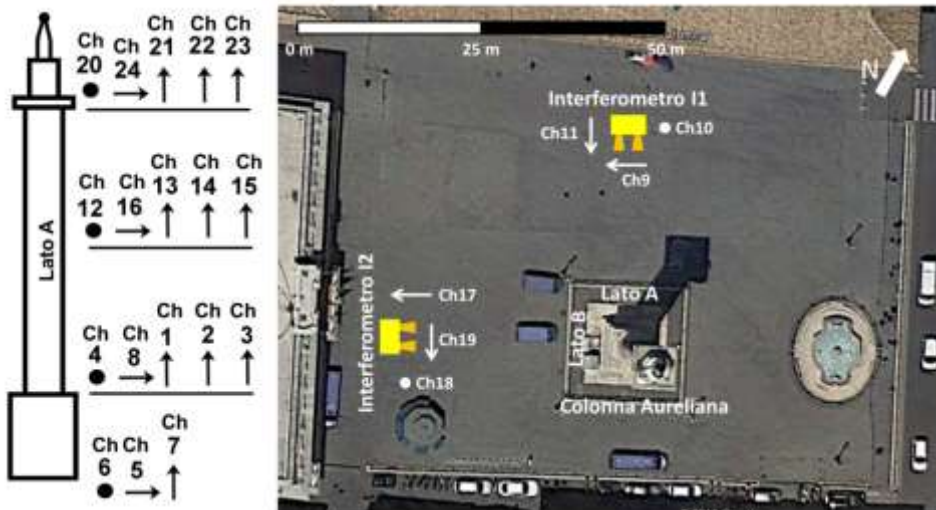


Obiettivi del monitoraggio

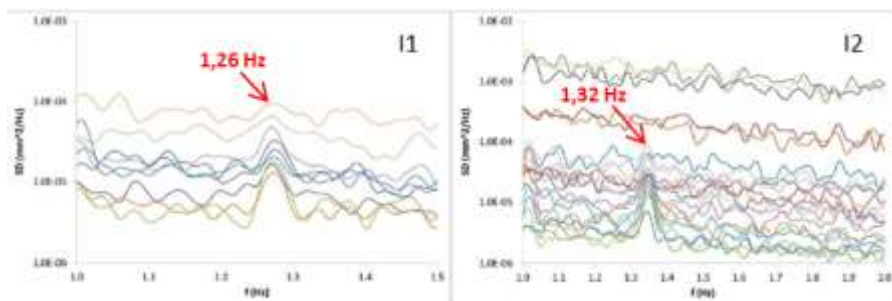
Analizzare le caratteristiche dinamiche della struttura ai fini della valutazione dello stato di conservazione (anche a seguito di terremoti storici i cui effetti hanno causato danni noti all'Opera).

E' stato eseguito un rilievo dinamico mediante due sistemi IBIS-S (IDS S.p.A.), disposti a 90° rispetto all'asse centrale della struttura, al fine di rilevare simultaneamente le oscillazioni lungo tutte le direzioni planimetriche. Inoltre, è stata eseguita l'installazione di un arrey di 18 sensori sismometrici monoassiali (modello Kinematics SS-1) all'interno della struttura per l'esecuzione di misure sismometriche contemporanee a quelle interferometriche.

Modalità di esecuzione

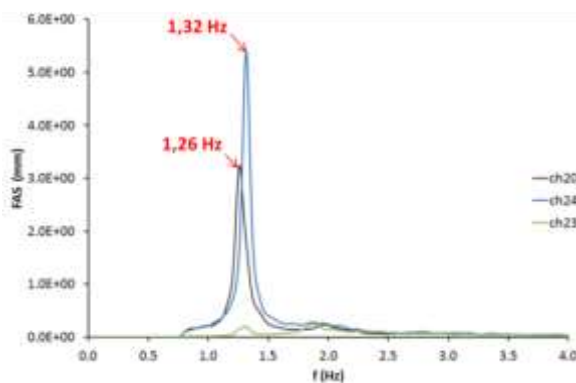


i) Densità spettrali ottenute dalle misure degli interferometri (I1 e I2)

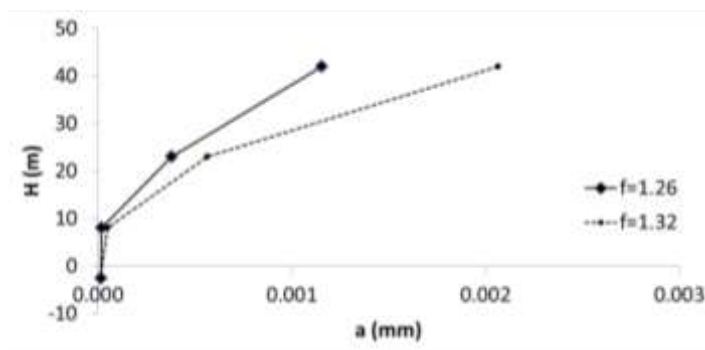


Principali risultati ottenuti

ii) Spettri di Fourier ottenuti dai sismometri ubicati sulla sommità della Colonna (con assi di misura orizzontali disposti parallelamente alle linee di vista dei sistemi TInRAR).



iii) Ampiezze modali della struttura.



5. CONCLUSIONI

In base a quanto discusso nel presente articolo (oltre alla letteratura scientifica sul tema), l'Interferometria Radar Terrestre (TInRAR) si configura tra le principali tecniche di telerilevamento emergenti nell'ambito del monitoraggio dinamico delle strutture. Se opportunamente impiegata può rappresentare, in determinati casi e per determinate finalità, una valida alternativa ai sistemi di monitoraggio convenzionali a contatto. Al fine di fornire uno strumento utile per la progettazione di un monitoraggio dinamico TInRAR, si riporta di seguito una tabella di riepilogo dei principali vantaggi e dei principali limiti di tale tecnica nell'ambito dello *Structural Health Monitoring* (Tabella 2).

VANTAGGI	LIMITI
Rapidità di installazione (idonea per scopi di pronto intervento in casi di emergenza)	Risoluzione spaziale monodimensionale (ambiguità per target ubicati alla stessa distanza dal radar)
Rapidità di acquisizione dei dati	Misura degli spostamenti lungo la sola linea di vista
Misure completamente da remoto: non necessita l'installazione di sensori o riflettori sulla struttura	Misure di tipo differenziale: non è possibile discriminare a priori eventuali frequenze ambientali che interessano il sensore radar
Elevato numero di punti di misura	Misure solo sulle porzioni della struttura visibili dalla postazione di monitoraggio
Elevata frequenza di acquisizione del dato (fino ad alcune migliaia di Hz)	Complessità nel caso di monitoraggio di strutture con prevalente sviluppo planimetrico
Elevata accuratezza nella misura degli spostamenti (fino ad alcuni centesimi di mm)	
Monitoraggio statico e dinamico	
Elevata portata strumentale (fino ad alcuni km)	
Completa funzionalità in qualunque condizione atmosferica e di illuminazione	

Tabella 2: principali vantaggi e limiti della tecnica TInRAR nell'ambito SHM.

BIBLIOGRAFIA

- Atzeni C., Bizzi A., Dei D., Fratini M., Pieraccini M., 2010. Remote survey of the leaning Tower of Pisa by interferometric sensing. *IEEE GEOSCI. REMOTE SENS. LETT.* 7(1); 185–189.
- Balageas D., Fritzen C.P., Güemes A., 2006. *Structural Health Monitoring*. Hermes Science Publishing.
- Beninati L., Brunetti A., Caruso C., Mazzanti P., 2015. Structural Health Characterization of an Old Riveted Iron Bridge By Remote Sensing Techniques . Proceedings of the 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (Turin, Italy, 1-3 July 2015).
- Bernardini G., De Pasquale G., Bicci A., Marra M., Coppi F., Ricci P., ET AL., 2007. Microwave interferometer for ambient vibration measurements on civil engineering structures: 1. Principles of the radar technique and laboratory tests. *Evaces'07*.
- Bongiovanni G., Brunetti A., Clemente P., Conti C., Mazzanti P., Verrubbi V., 2015. Dynamic characterization of tower structures by means of interferometry measurements. Proceedings of the 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (Turin, Italy, 1-3 July 2015).
- Brunetti A., Mazzanti P., 2015. Monitoring an unstable road embankment for public safety purposes by terrestrial SAR interferometry. Proceedings of the 9th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (Sydney, 9-11 September 2015) pp. 769-780.
- Cauberghe B., 2004. Applied frequency-domain system identification in the field of experimental and operational modal analysis. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, mech.vub.ac.be/avrg.
- Cunha A., Caetano E., Delgado R., 2001. Dynamic tests on large cable-stayed bridge. *Journal of Bridge Engineering*; 6(1):54–62.
- Gentile C. & Bernardini G., 2010. An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests. *Structinfrastructeng*; 6(5):521–34.
- Hansenn R., 2001. *Radar Interferometry*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer.
- Mazzanti P., 2012. Remote monitoring of deformation. An overview of the seven methods described in previous GINs. *Geotechnical Instrumentation News*, Dicembre 2012, pp. 24-29.
- Mazzanti P., 2012. Il monitoraggio degli spostamenti con Interferometria SAR Terrestre. *Geomedia 1-2012*, pp. 6-10.
- Mazzanti P., Bozzano F., Rocca A., 2013. Monitoring natural slopes and man-made structures by TInSAR: understanding behaviour and forecasting methods. *GEOTECHNICAL DIVISION 33RD ANNUAL SEMINAR “Geotechnical Aspects of Housing Supply and Development”*, Hong Kong, 31 May 2013, pp. 187-192.
- Mazzanti P., Bozzano F., Brunetti A., Esposito C., Martino S., Prestininzi A., Rocca A., Scarascia Mugnozza G., 2015. Terrestrial SAR Interferometry Monitoring of Natural Slopes and Man-Made Structures . G. Lollino et al. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory*, Volume 5, Springer International Publishing, Switzerland, 189-194.
- Mazzanti P., Brunetti A., Buffarini G., Bongiovanni G., 2014. Integrating Contact and Remote Sensing Techniques For Quick Recognition of Bridge Dynamic Behaviour. *The ISHMII Monitor*, June 2014, Vol. 9., pp. 17-19

Peck R.B., 1969. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotechnique*; 19(2), 171-187.

Pieraccini M., Fratini M., Parrini F., Atzeni C., Partoli G., 2008. Interferometric Radar vs. Accelerometer for dynamic monitoring of large structures: an experimental comparison. *NDT&E INT*, 41 (4); PP. 258–264.