



Monitoraggio di strutture storiche mediante interferometria radar terrestre

Elisa Bassoli^a, Federico Ponsi^a, Cristina Castagnetti^a, Francesco Mancini^a, Loris Vincenzi^a

^a Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, Via Vivarelli 10, 41125 Modena, Italia

Keywords: monitoraggio, interferometria radar terrestre, campanile

ABSTRACT

In questa memoria vengono discusse le prestazioni, i vantaggi e gli svantaggi dell'interferometria radar terrestre con antenna ad apertura reale (TInRAR) per il monitoraggio strutturale degli edifici esistenti e storici. L'interferometro radar terrestre è in grado di rilevare spostamenti differenziali confrontando la fase del segnale radar raccolto e riflesso dalla struttura rispetto a quella del segnale trasmesso. Gli spostamenti lungo la linea di vista (LoS) che si possono misurare sono dell'ordine del centesimo di millimetro e le misure possono essere campionate con frequenza fino a 200 Hz. La memoria riporta i test dinamici effettuati sulla torre campanaria della Basilica di San Prospero a Reggio Emilia (Italia), confrontando gli spostamenti misurati dal radar terrestre con i valori ottenuti per doppia integrazione delle accelerazioni misurate da accelerometri installati direttamente sulla struttura. Grazie alla capacità di misurare in maniera continua e diretta gli spostamenti di numerosi punti della struttura, l'uso della strumentazione TInRAR integrata alla strumentazione tradizionale potrebbe essere di grande ausilio nell'interpretazione del comportamento strutturale e nella valutazione della progressione di un potenziale danneggiamento nelle strutture a seguito di eventi sismici.

1 INTRODUZIONE

Il monitoraggio nel tempo di una struttura contribuisce all'individuazione di possibili danni dovuti ad un evento sismico (Alvandi e Cremona, 2006). I sistemi di monitoraggio tradizionali richiedono l'installazione di un numero adeguato di sensori (accelerometri, estensimetri, inclinometri o altro) sulle strutture al fine di identificare parametri strutturali globali o locali utili per l'individuazione del potenziale danno. L'accuratezza nell'identificazione o nella localizzazione del danno dipende dal numero e dalla posizione dei sensori (Vincenzi e Simonini, 2017). Per identificare danni locali o di piccola entità, è spesso necessaria una grande quantità di sensori; il costo di numerosi sensori con l'adeguata accuratezza può limitare l'applicazione del monitoraggio strutturale su larga scala. Inoltre, il monitoraggio di edifici che non hanno diaframmi rigidi o di strutture la cui vulnerabilità è dominata da meccanismi locali è complesso a causa dello specifico comportamento di tali strutture. In questa memoria vengono discusse le prestazioni, i vantaggi e gli svantaggi dell'interferometria radar terrestre con antenna ad apertura reale (TInRAR) (Strozzi et al, 2012; Stabile et al, 2013; Pieraccini et al, 2014; Di Pasquale et al, 2018) per il

monitoraggio strutturale degli edifici esistenti e storici. L'interferometro radar terrestre è in grado di rilevare spostamenti differenziali confrontando la fase del segnale radar riflesso dalla struttura in istanti successivi. Gli spostamenti lungo la linea di vista (LoS) che si possono misurare sono dell'ordine del centesimo di millimetro e le misure possono essere campionate con frequenza fino a 200 Hz.

La ricerca ha l'obiettivo di valutare l'affidabilità e l'accuratezza dei risultati forniti dalla strumentazione TInRAR, sia in integrazione ai sensori tradizionali sia come alternativa nel caso in cui non sia possibile installare sensori direttamente sulla struttura. Il caso studio è rappresentato da una torre in muratura di grande interesse storico, la torre di San Prospero di Reggio Emilia. Le prove sperimentali sono state eseguite durante un famoso evento culturale che si tiene nel centro storico di Reggio Emilia, durante il quale si è svolto un concerto di campane che ha permesso di misurare le vibrazioni del campanile anche in condizioni forzate. L'accuratezza dei risultati e la validazione della procedura di misura vengono valutate attraverso il confronto dello spostamento misurato dall'interferometro radar con quello ottenuto attraverso doppia integrazione delle accelerazioni

misurate da due tipi di accelerometri direttamente installati sulla torre.

2 LA TORRE DI SAN PROSPERO DI REGGIO EMILIA

La Basilica di San Prospero è un edificio situato in Piazza San Prospero, nel cuore del centro storico di Reggio Emilia; è dedicata al santo patrono della città e rappresenta una testimonianza del barocco emiliano. Accanto alla Basilica si trova il suo campanile, chiamato “la Torre di San Prospero” (Figura 1a), oggetto di questo studio. Il campanile ha una pianta ottagonale e si sviluppa su tre ordini, come mostrato nella Figura 1b. La struttura è in muratura di mattoni pieni ed è presente un rivestimento in pietra su tutto il perimetro. La distribuzione interna è caratterizzata da due stanze a volta ottagonale e una terza stanza, posta al piano superiore della torre, che costituisce la cella campanaria.

La costruzione della torre iniziò nel 1536, dopo una fase travagliata di approvazione del progetto, e durò più di 30 anni, con la successione di diversi architetti e tecnici responsabili di cantiere. Al termine dei lavori, avvenuto nel 1571, la torre presentava la geometria attuale. Rimane dubbio se la torre sia stata completata seguendo il progetto originale o se invece l’opera rimane tutt’oggi incompiuta: secondo gli storici, infatti, la torre doveva avere un quarto piano e una cupola. La costruzione della torre ha inoltre visto numerosi problemi nel completamento della finitura esterna a causa della difficoltà nel reperimento e dell’alto costo del marmo bianco di Verona previsto originariamente nel progetto. Tali difficoltà hanno spinto i responsabili del cantiere a modificare la scelta dei materiali di rivestimento, passando dal marmo alle più vicine ed economiche pietre arenarie delle montagne locali. Sin dai primi decenni del XVII secolo, la torre ha subito danni significativi alle facciate esterne in arenaria a causa di eventi atmosferici e sismici, nonché della mancanza di adeguate manutenzioni. Nel 1822, dopo la caduta di porzioni di rivestimento, si è provveduto alla chiusura immediata delle vicine strade di accesso ed è stato inibito il suono delle campane per evitare di aggravare ulteriormente lo stato di degrado del rivestimento. La torre fu restaurata una prima volta nel 1840; successivamente, nel 1977, vennero eseguiti importanti lavori di restauro che coinvolsero le strutture architettoniche e le facciate in pietra. Oggi la torre mostra ancora problemi di distacco del rivestimento in arenaria e, al fine di pianificare

interventi duraturi ed efficaci, è stato attivato un comitato speciale per il restauro.

Il campanile accoglie oggi cinque campane, costruite a partire dal 1546, caratterizzate da una massa variabile da 200 fino a 2400 kg, con diametri pari a 0,60, 0,80, 1,00, 1,20 e 1,50 metri (Figura 2a). Le campane sono installate su un castello ligneo della stessa età delle campane, ancora oggi perfettamente conservato (Nobili et al, 1997; Monducci, 2006).

3 I SISTEMI DI MONITORAGGIO

Il monitoraggio delle vibrazioni in condizioni ambientali e forzate del campanile di San Prospero è stato realizzato tramite due sistemi accelerometrici e tramite un interferometro radar terrestre.

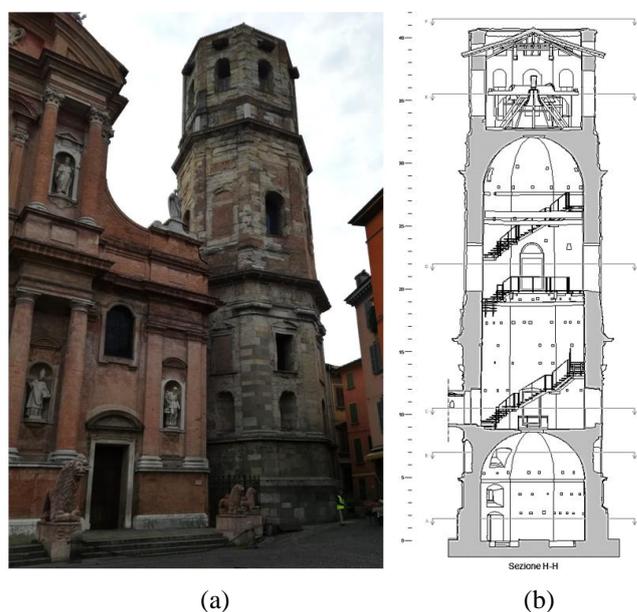


Figura 1. Torre di San Prospero: (a) vista da piazza San Prospero e (b) sezione verticale.

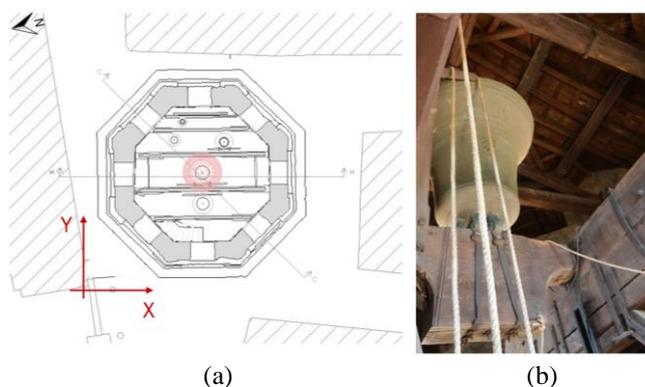


Figura 2. (a) Sezione orizzontale del campanile di San Prospero con posizione della campana principale; (b) campana principale in posizione capovolta – 1,50 m di diametro e 2400 kg di peso.

3.1 L'interferometro radar terrestre

L'interferometro radar terrestre utilizzato in questo studio è il modello IBIS-FS prodotto dalla IDS GeoRadar Srl. Lo strumento è in grado di rilevare spostamenti differenziali attraverso variazioni nelle misure di sfasamento registrate fra sensore e target (Atzeni et al, 2010; Pieraccini, 2013). Il sensore utilizzato è capace di emettere onde radar con frequenza di 17,1-17,3 GHz. Gli spostamenti che possono essere misurati lungo la linea di vista sono dell'ordine di 0,1 mm. Lo strumento è in grado di acquisire ad una frequenza massima di 200 Hz (IDS, 2019). Le caratteristiche tecniche sono mostrate nella Tabella 1. Per la sperimentazione, sono state montate due antenne operanti nella banda Ku. La misurazione simultanea di più punti sulla struttura viene eseguita posizionando lo strumento ad una distanza adeguata dalla struttura da monitorare. La capacità dell'IBIS-FS di risolvere e rilevare spostamenti di punti diversi nella direzione di vista dipende dalle proprietà dell'onda radar. In particolare, l'IBIS-FS utilizza una tecnica a onda continua modulata in frequenza lineare (LFMCW). Tale tecnica garantisce una risoluzione nella direzione definita *range* di 0,50 m, indipendentemente dalla distanza dello strumento dall'obiettivo.

Lo strumento è trasportabile, installabile su un treppiede ed alimentato a batteria. La facilità di trasporto, la veloce installazione associati all'alta frequenza di acquisizione e la precisione dello strumento rendono il radar interferometrico terrestre IBIS-FS adatto a un'ampia gamma di monitoraggi statici e dinamici, specialmente in presenza di vincoli logistici o spazi ridotti.

Nella Figura 3 è illustrato il principio di base del rilevamento radar terrestre. Tutti gli oggetti situati all'interno di una cella di risoluzione del sensore radar saranno rappresentati da una singola risposta senza possibilità di distinzione. Inoltre, va sottolineato che è possibile misurare lo spostamento unicamente nella direzione di vista.

Tabella 1. Specifiche tecniche dell'interferometro radar IBIS-FS (IDS, 2019)

Parametro	Specifica tecnica
Accuratezza	0,01 mm ÷ 0,1 mm (in funzione della distanza sensore-target)
Distanze di esercizio	Fino a 1000 m
Risoluzione in range	0,75 m
Frequenza di Acquisizione	Fino a 200 Hz
Alimentazione	Batteria 110/220V AC o 12V DC
Autonomia	4 ore
Massa	32 kg (con treppiede)
Temperature di esercizio	Da -20°C a +55°C

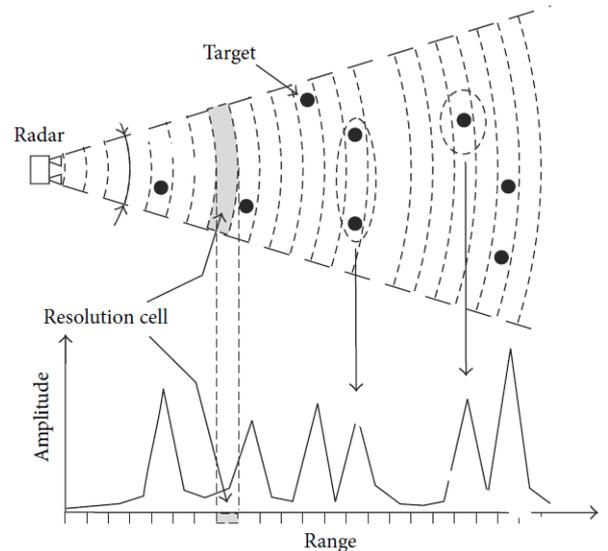


Figura 3. Principio di funzionamento dell'interferometria radar.

Attraverso la conoscenza della posizione relativa tra strumento e obiettivo, è possibile risalire alla componente di spostamento nella direzione da investigare, ricordando però che ciò che viene misurato è un'aliquota dello spostamento reale nella direzione considerata.

3.2 Sistemi di monitoraggio con accelerometri

Il primo sistema per la misura delle accelerazioni è il sistema SHM602 (produzione Teleco SpA), che sfrutta accelerometri di tipo MEMS. Nella configurazione utilizzata, il sistema è composto da un'unità di controllo e archiviazione e sei unità di rilevamento collegate all'unità centrale tramite un bus digitale. Il collegamento tramite bus garantisce un alto grado di affidabilità e prevenzione dalle interferenze elettromagnetiche. Ogni unità di rilevamento può registrare le accelerazioni lungo due assi ortogonali e la temperatura; la frequenza di restituzione delle informazioni può essere selezionata dall'utente nell'intervallo 20-80 Hz. Grazie alle tecniche di filtraggio digitale implementate a livello locale, queste unità accelerometriche presentano un basso rumore, pari circa 0,3-0,5 mg, dove g rappresenta l'accelerazione di gravità (Guidorzi et al., 2014; Bassoli et al., 2015). I vantaggi dell'utilizzo del sistema SHM602 sono la trasmissione di dati in formato digitale e la possibilità di eseguire alcune analisi di sistema direttamente a bordo dei sensori, trasmettendo solo i dati sintetici al computer principale. Lo svantaggio principale è la limitata frequenza del segnale restituito, non adatta per ogni tipologia di struttura, specialmente per strutture molto rigide.

Il secondo sistema di acquisizione dinamico è composto da 12 accelerometri uniassiali

piezoelettrici PCB/393B12, caratterizzati un intervallo dinamico di $\pm 0,5$ g, una larghezza di banda compresa tra 0,15 e 1000 Hz e una risoluzione teorica di 8 μg . Gli accelerometri sono collegati tramite cavi a connettori BNC a un sistema di acquisizione National Instruments per l'archiviazione dei dati e la gestione del sistema. L'elevato rapporto segnale/rumore degli accelerometri piezoelettrici consente una chiara acquisizione della risposta strutturale in condizioni operative anche quando l'eccitazione è limitata. D'altra parte, la trasmissione di dati analogici è molto sensibile ai disturbi esterni ed il rumore delle misure dipende fortemente dall'intera catena di misura (Trapani et al, 2015).

4 RACCOLTA ED ELABORAZIONE DEI DATI

Le prove sperimentali condotte sulla torre di San Prospero mirano a caratterizzare il comportamento dinamico della torre e a valutare le vibrazioni indotte dal suono del campane sulla struttura. Il comportamento dinamico della struttura viene identificato grazie ai test di vibrazione ambientale, in cui viene registrata la risposta strutturale in condizioni operative. La misura della risposta della torre all'azione dinamica delle campane ha invece lo scopo di valutare e confrontare gli spostamenti misurati sulla struttura mediante l'interferometro radar e con quelli ottenuti dalla doppia integrazione delle accelerazioni misurate dai due sistemi accelerometrici.

La tradizione emiliana prevede che le campane vengano suonate secondo la tecnica nota come "suonata distesa". In questa tipologia di suonata, una squadra di campanari porta in primo luogo le campane al "punto morto superiore", ovvero con una serie di oscillazioni successive la campana viene ruotata di 180° e fermata in posizione capovolta (Figura 2b). Durante il concerto, la campana viene fatta oscillare di 360° a tempo di musica, con rotazioni in verso opposto ogni volta. Durante l'oscillazione, il battaglio riceve un'accelerazione dovuta al movimento relativo con la campana. Per eseguire questo movimento, è necessaria una squadra di esperti campanari (per la torre di San Prospero circa una dozzina), soprattutto per movimentare la campana di massa maggiore (Figura 2b). L'alternanza del suono delle varie campane presenti sul campanile e gli intervalli di tempo tra un'oscillazione e l'altra determinano melodie differenti.

Il test ha avuto luogo durante un famoso evento culturale che si tiene nel centro storico di Reggio

Emilia. La durata del test è stata di circa 1 ora, tra periodi di vibrazioni ambientali e periodi in cui la torre è stata sollecitata dal movimento delle campane. Il concerto ha visto tre eventi principali, ciascuno dei quali rappresentante una differente melodia.

4.1 Monitoraggio con strumentazione TInRAR

Il monitoraggio dinamico mediante la tecnologia TInRAR richiede un'accurata progettazione della prova. Infatti è necessario ricordare che l'interferometro radar è in grado di rilevare le componenti dello spostamento lungo la linea di vista e, pertanto, lo strumento andrebbe posizionato in modo da presentare la linea di osservazione orientata lungo la direzione di oscillazione da monitorare. A causa della presenza di edifici ed ostacoli, lo strumento è stato leggermente disallineato rispetto alla direzione di maggiore oscillazione della torre, in particolare in una posizione che forma un angolo di $14,22^\circ$ verso est rispetto a tale direzione (Figura 4b). Nei casi di movimenti più complessi, che non sono caratterizzati da una forte direzionalità o dove non è facilmente identificabile a priori la direzione di maggiore spostamento, è necessario effettuare misure in due direzioni ortogonali e combinare i risultati.

Il radar è stato installato quindi su un treppiede, a 13 m dalla torre e l'antenna è stata orientata con un angolo di inclinazione di circa 65° rispetto all'orizzontale (Figure 4a,c). Tale angolo di visuale è necessario per evitare ambiguità tra le risposte radar retrodiffuse provenienti da punti situati a diverse altezze della torre. Quando si monitorano strutture con tecnologia radar, infatti, vi è una dipendenza reciproca tra il numero di punti che possono essere osservati sulla struttura con una risoluzione definita e il rapporto tra la distanza struttura-strumento e l'altezza della struttura: più il radar è vicino alla struttura, più punti prossimi tra loro si possono osservare distintamente (Gocal et al, 2013). Nel caso studio in oggetto, la posizione relativa tra torre e radar ha permesso di ottenere una risoluzione spaziale di 0,75 m. La frequenza di acquisizione durante l'intero test è stata impostata a 100 Hz.

Le osservazioni acquisite tramite il radar sono state elaborate mediante il software IBIS Data Viewer. I parametri geometrici vengono introdotti nel software all'inizio dell'elaborazione; la definizione della geometria consente la conversione dei valori di spostamento radiale dr , cioè lungo l'asse del raggio radar, in spostamenti orizzontali d (Figura 4c).

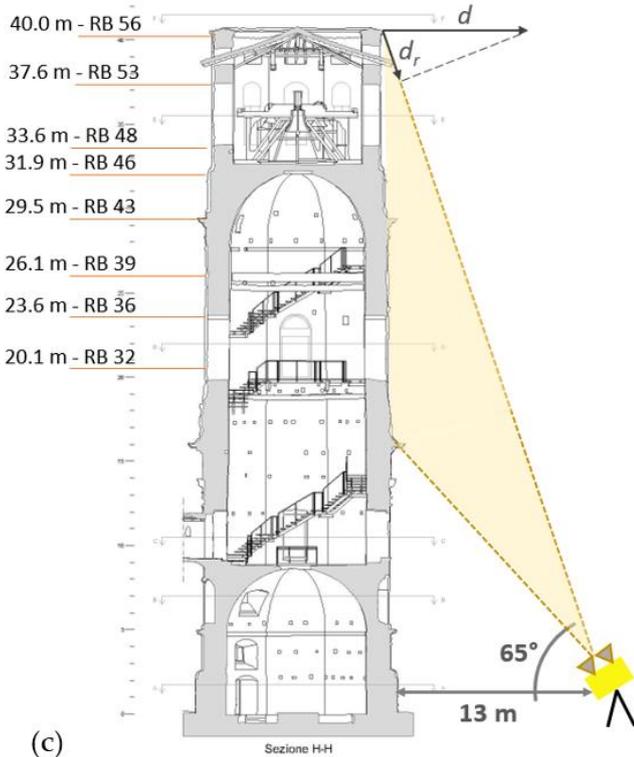
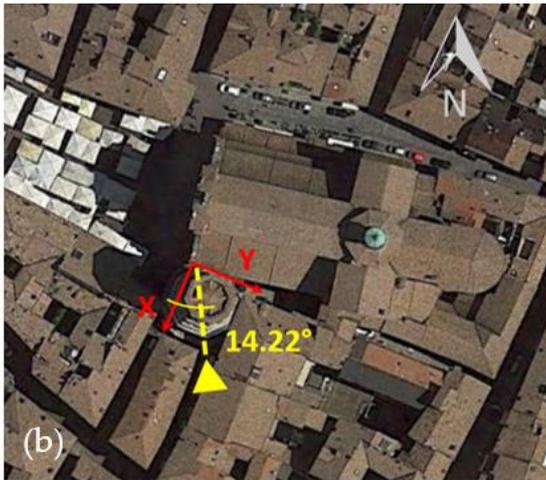


Figura 4. Monitoraggio con la strumentazione TInRAR: (a) interferometro radar terrestre IBIS-FS; (b) posizionamento del radar e inclinazione della linea di vista rispetto al sistema di riferimento; (c) posizionamento geometrico del radar, quote dei range bins selezionati e indicazione dello spostamento radiale d_r e orizzontale d .

Una volta eseguita l'elaborazione dei dati, il passo successivo consiste nel selezionare i punti della torre dei quali valutare le serie temporali degli spostamenti. I punti specifici selezionati sulla struttura per il presente caso studio sono associati alle quote in cui sono posizionati gli accelerometri, per favorire il confronto con i risultati ottenuti dai sistemi accelerometrici e per ottenere le medesime informazioni di interesse sulla struttura. Le quote selezionate, denominate "Range Bins" (RB), sono riportate nella Figura 4c.

4.2 Monitoraggio con accelerometri

La risposta dinamica della torre viene misurata simultaneamente in sette punti appartenenti a cinque livelli diversi della torre – indicati con L1-L5 in Figura 5. Sono impiegati un totale di 12 accelerometri piezoelettrici (A1-A12 nella Figura 6) e 6 accelerometri biassiali MEMS (M1-M6 nella Figura 6). In ogni punto di misurazione (ad eccezione di quelli ai livelli L1 e L5), sono stati posizionati un sensore MEMS biassiale e due accelerometri piezoelettrici uniassiali per confrontare le accelerazioni acquisite dai due sistemi di misura. Il livello L1 viene monitorato usando solo accelerometri piezoelettrici (Figura 6a). Al livello L5, invece, l'accelerometro MEMS M6 è posto su una trave del telaio in legno che supporta le campane (Figura 6e) per potere valutare le accelerazioni (e quindi gli spostamenti) relative tra torre e struttura di legno. Ad eccezione del sensore M6, i sensori sono installati sulle pareti interne del campanile mediante piastre metalliche e tasselli, come mostrato nella Figura 7. La frequenza di campionamento è impostata a 200 Hz e 80 Hz per gli accelerometri piezoelettrici e MEMS, rispettivamente.

Per confrontare i risultati ottenuti con quanto misurato dall'interferometro radar terrestre, lo spostamento della torre è stato valutato attraverso una doppia integrazione numerica delle accelerazioni registrate, adottando la regola di Simpson. Questa procedura introduce inevitabili errori e derive dovuti all'effetto del rumore (Smyth e Wu, 2006). Per limitare tali effetti è stata eseguita una procedura articolata in tre fasi. Nella prima fase viene eseguita la doppia integrazione delle accelerazioni misurate con la regola di Simpson. Le accelerazioni vengono utilizzate direttamente senza alcuna elaborazione del segnale per evitare la rimozione accidentale di qualsiasi contenuto in frequenza. Nella seconda e nella terza fase vengono applicate una procedura di denoising e di detrending basate sulla tecnica denominata "Empirical Mode Decomposition" (EMD) (Huang et al., 1998).

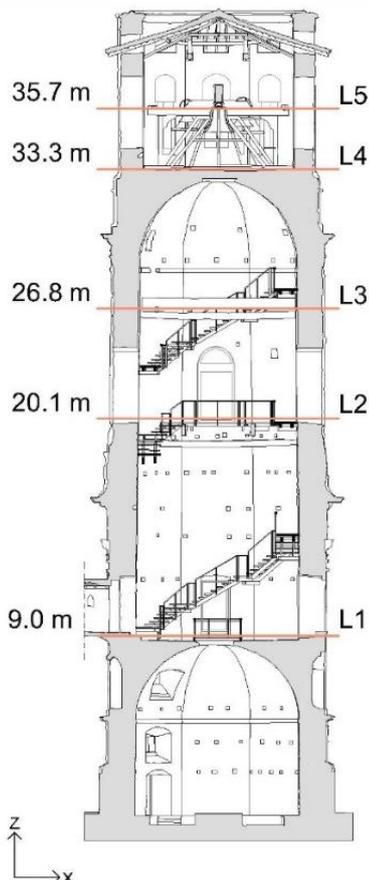


Figura 5. Livelli monitorati (L1-L5).

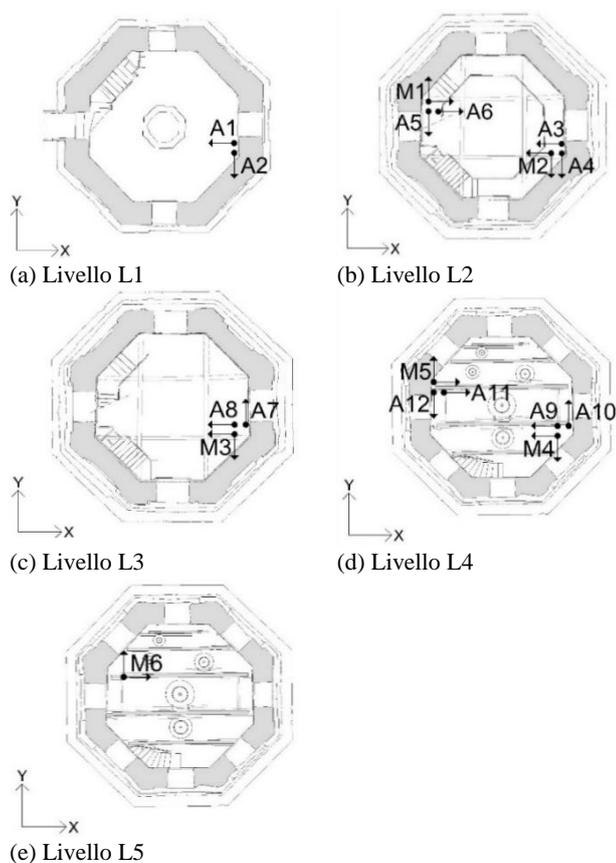


Figura 6. Posizione degli accelerometri piezoelettrici (A1-A12) e MEMS (M1-M6)

L'EMD è un metodo adattativo che decompone il segnale originale come somma di funzioni più semplici, chiamate "Intrinsic Mode Function" (IMF) $h_i(t)$, e di un segnale residuo $r(t)$:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) + r(t)$$

L' i -esima IMF $h_i(t)$ dipende dal segnale e viene estratta sequenzialmente dal segnale originale attraverso la procedura descritta in (Mukhopadhyay, 2013). Contrariamente ai metodi di decomposizione convenzionali, come la trasformata di Fourier o la trasformata Wavelet, che eseguono la decomposizione del segnale proiettando il segnale stesso su basi di forma predefinite, il metodo EMD è completamente basato e guidato dai dati, poiché la decomposizione è adattata al segnale stesso. Per questo motivo, tale tecnica è adatta anche per segnali non stazionari e non lineari. Poiché il residuo rappresenta l'andamento "lento" del segnale, l'operazione di detrending viene effettuata sottraendo il residuo dal segnale originale. L'operazione di denoising invece viene effettuata eliminando le IMF a pseudo-frequenza più alta, ovvero le prime ad essere estratte.

4.3 Stima dei parametri modali

Le proprietà dinamiche della torre sono stimate dall'accelerazione registrata in condizioni operative. A causa dell'elevato rapporto segnale/rumore degli accelerometri piezoelettrici, l'identificazione dinamica viene eseguita solo con riferimento all'accelerazione misurata da questo sistema. L'identificazione modale viene effettuata adottando il metodo "Enhanced Frequency Domain Decomposition" (EFDD) (Brincker et al., 2001).



Figura 7. Tipica installazione dei sensori MEMS e piezoelettrici (livello L4).

Il metodo si basa su una decomposizione a valori singolari (SVD) della matrice di densità spettrale di potenza (PSD) delle accelerazioni acquisite. Ogni frequenza naturale viene identificata dal picco del grafico della PSD mentre il vettore singolare e il corrispondente valore singolare della matrice PSD in corrispondenza della frequenza identificata rappresentano rispettivamente la forma modale e il fattore di amplificazione. Infine, il rapporto di smorzamento è stimato attraverso il decremento logaritmico.

5 RISULTATI

5.1 Confronto tra serie temporali durante il concerto di campane

Si confrontano in primo luogo gli spostamenti ottenuti dal sistema con accelerometri MEMS, con accelerometri piezoelettrici e dal radar interferometrico durante il concerto di campane. Nel confronto, si indica con x la direzione parallela alla direzione di oscillazione della campana maggiore (come mostrato nelle Figure 2a,b).

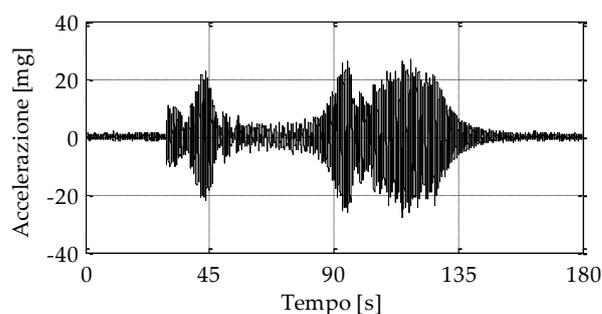
La Figura 8 mostra l'accelerazione registrata dai sensori MEMS M4 e M6 (posizionati ai livelli L4 e L5, vedi Figura 5) durante il primo evento del concerto in direzione x e y . Il sensore M4 ha registrato accelerazioni massime di circa 25 mg in direzione x , mentre le accelerazioni in direzione y sono inferiori di un ordine di grandezza, come mostrato nelle Figure 8a,b. Le accelerazioni registrate sul telaio di legno a sostegno delle campane, misurate dal sensore M6 (Figure 8c,d), sono maggiori, tipicamente comprese tra ± 60 mg con picchi fino a 120 mg nella direzione di oscillazione delle campane. Le accelerazioni misurate durante il secondo e il terzo evento (Figure 9a,b) sono prossime a quelle del primo evento.

La Figura 10 riporta gli spostamenti del livello L4 nelle due direzioni x e y ottenuti attraverso doppia integrazione numerica dalle accelerazioni acquisite dai sensori piezoelettrici A11 e A12 per un intervallo di tempo di circa 10 secondi. Come atteso, la torre oscilla principalmente in direzione x sebbene si notino spostamenti di entità non trascurabile anche in direzione y . Si nota inoltre che la direzione principale di spostamento è inclinata di circa 7° rispetto alla direzione x . La Figura 10 mostra anche il disallineamento tra la direzione di misura dell'interferometro radar e la direzione x ($14,22^\circ$).

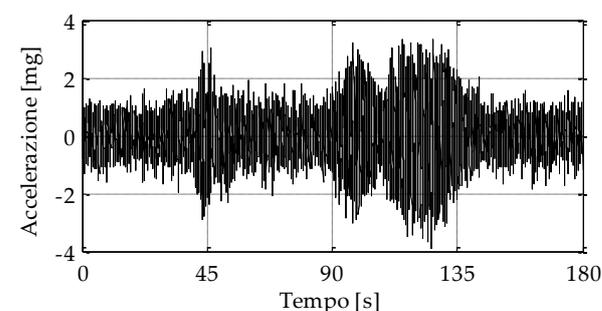
Il confronto tra gli spostamenti ottenuti dagli accelerometri (MEMS e piezoelettrici) e dall'interferometro radar terrestre è riportato nelle

Figure 11-16. Per un corretto confronto, i risultati degli accelerometri con quelli ottenuti dal TInRAR, le accelerazioni misurate vengono combinate e proiettate sulla stessa direzione di misura del radar.

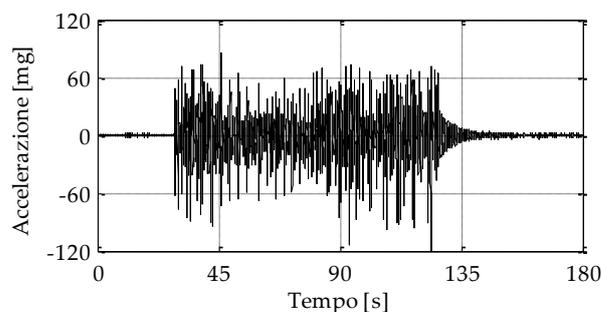
Per meglio comprendere le prestazioni del sistema radar, si riporta il confronto in termini di spostamento nel tempo (Figure 11a, 12a, 14a, 15a) e di valori RMS ("Root Mean Square") dello spostamento valutati con un periodo di media di 2 secondi (Figure 11b, 12b, 14b, 15b).



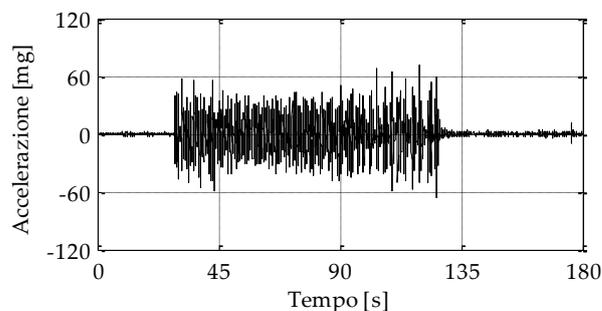
(a) Sensore M4 – direzione x – primo evento



(b) Sensore M4 – direzione y – primo evento

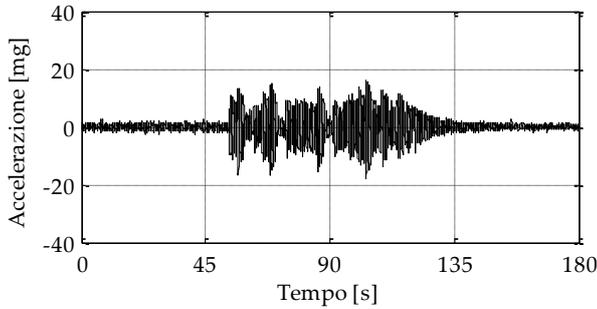


(c) Sensore M6 – direzione x – primo evento

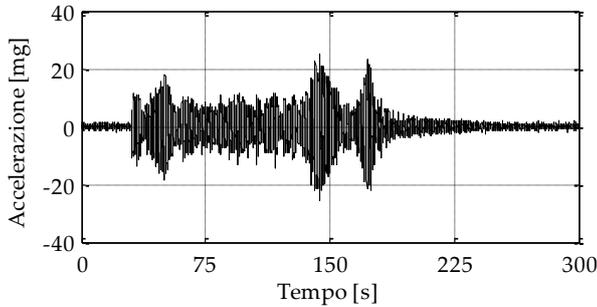


(d) Sensore M6 – direzione y – primo evento

Figura 8. Accelerazioni misurate dai sensori (a,b) M4 e (c,d) M6 durante il primo evento del concerto di campane.



(a) Sensore M4 – direzione x – secondo evento



(b) Sensore M4 – direzione x – terzo evento

Figura 9. Accelerazioni misurate dal sensore M4 durante il (a) secondo e (b) terzo evento del concerto di campane.

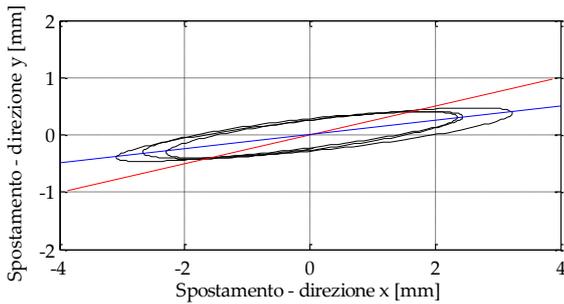
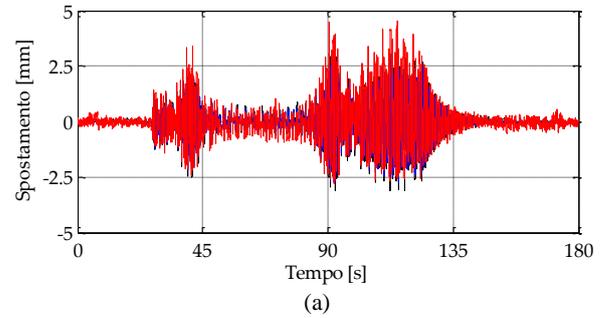


Figura 10. Spostamento in direzione x (sensore A11) e y (sensore A12) del livello L4 (linea nera). Linea blu: direzione di massimo spostamento della torre ($7,05^\circ$ rispetto all'asse x); linea rossa: direzione di misura del TInRAR ($14,22^\circ$ rispetto alla direzione x).

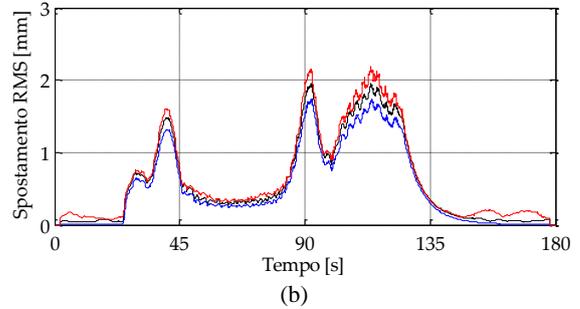
I risultati presentati nelle figure si riferiscono al primo evento del concerto; i risultati degli altri eventi non sono mostrati in quanto sono simili e permettono di trarre le medesime conclusioni.

Le Figure 11 e 12 presentano, rispettivamente, gli spostamenti dei livelli L3 e L4. È possibile osservare una stretta corrispondenza tra i risultati dei due sistemi accelerometrici mentre il radar interferometrico tende a sovrastimare o sottostimare gli spostamenti, in base al livello analizzato. Le differenze sui picchi di spostamento delle serie temporali acquisite dal radar e ottenute dai sistemi accelerometrici sono, in media, dell'ordine di 0,20 mm, corrispondente a circa il 5% dello spostamento.

La differenza massima misurata è pari a 1,28 mm (circa il 32%) in corrispondenza del livello L4.

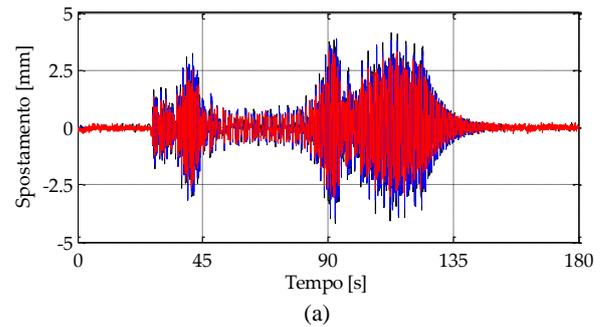


(a)

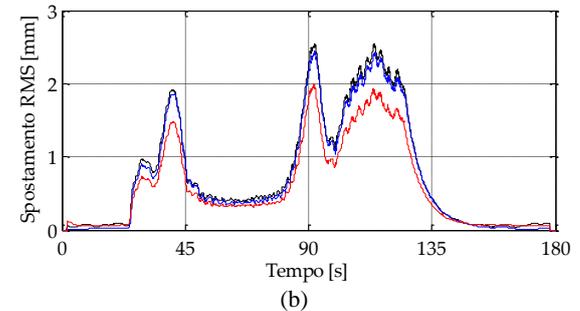


(b)

Figura 11. (a) Spostamento e (b) RMS dello spostamento del livello L3. Linea nera: accelerometro MEMS M3; linea blu: accelerometro piezoelettrico A8; linea rossa: TInRAR – RB 39.



(a)



(b)

Figura 12. (a) Spostamento e (b) RMS dello spostamento del livello L4. Linea nera: accelerometro MEMS M4; linea blu: accelerometro piezoelettrico A9; linea rossa: TInRAR – RB 48.

Al contrario, le differenze sui picchi tra gli accelerometri piezoelettrici e MEMS sono minori, con un valore medio inferiore a 0,10 mm (circa il 2%) e una differenza massima di 0,52 mm (circa il 14%). Le differenze sono, in generale, apprezzabili ma non tali da compromettere l'affidabilità dei risultati; si evidenziano maggiormente quando si confrontano i profili di spostamento dell'intera torre per un selezionato

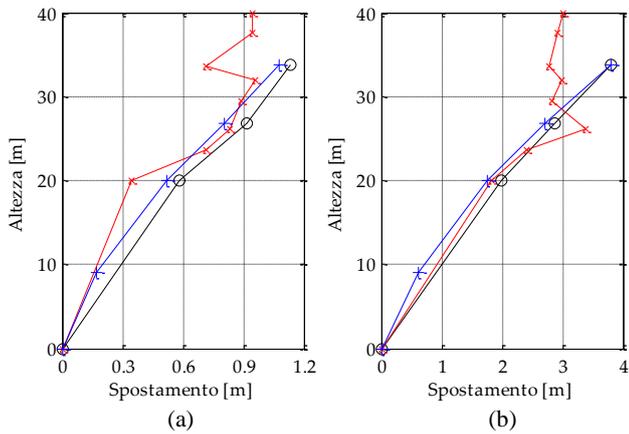


Figura 13. Spostamenti lungo l'altezza della torre a due istanti temporali: (a) $t=30,8$ s, (b) $t=92,9$ s. Linea nera: accelerometri MEMS; linea blu: accelerometri piezoelettrici; linea rossa: TInRAR.

istante temporale. La Figura 13 mostra lo spostamento dei punti di misura lungo l'altezza in due diversi istanti di tempo. La figura mostra chiaramente la congruenza tra quanto ottenuto dai due sistemi accelerometrici mentre il radar, come già affermato, sottostima o sovrastima i risultati a seconda del livello considerato e dell'istante temporale.

Gli spostamenti del livello L5 ottenuti dall'accelerometro MEMS M6 e i corrispondenti ottenuti dal radar sono confrontati nella Figura 14. In questo caso, la differenza è significativa ed è dovuta al fatto che l'accelerometro MEMS è posizionato sul telaio di legno che sostiene le campane anziché sulla torre: la struttura in legno si muove relativamente rispetto alla struttura muraria quando le campane sono messe in moto dai campanari, fungendo da "filtro" per le vibrazioni indotte dalle campane alla struttura. Infine, la Figura 15 mostra lo spostamento misurato dal TInRAR nella parte sommitale della torre, alla quota di 40,00 m. A quel livello, la risposta strutturale misurata dagli accelerometri non è disponibile a causa di problemi di accessibilità. Questo dimostra la principale limitazione della strumentazione tradizionale rispetto al radar che consiste, appunto, nella necessità di dover accedere direttamente ai punti di misura. In generale, i risultati mostrano che lo spostamento massimo causato dall'oscillazione delle campane aumenta fino a circa 4 mm.

Infine, analizzando alcuni secondi di vibrazioni libere dopo il concerto di campane (Figura 16), si può osservare che gli spostamenti misurati dal radar interferometrico sono caratterizzati da livelli di rumore più elevati rispetto a quelli ottenuti dagli accelerometri, a conferma della minore accuratezza della misura del TInRAR.

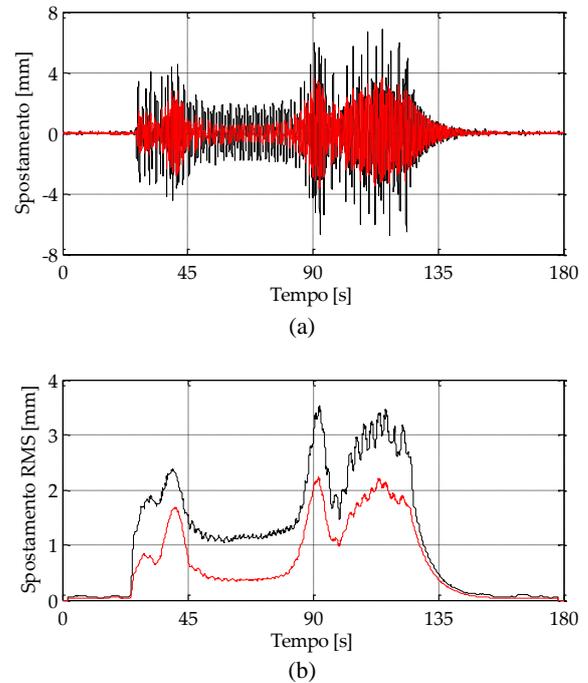


Figura 14. (a) Spostamento e (b) RMS dello spostamento del livello L5. Linea nera: accelerometro MEMS M6; linea rossa: TInRAR - RB 53.

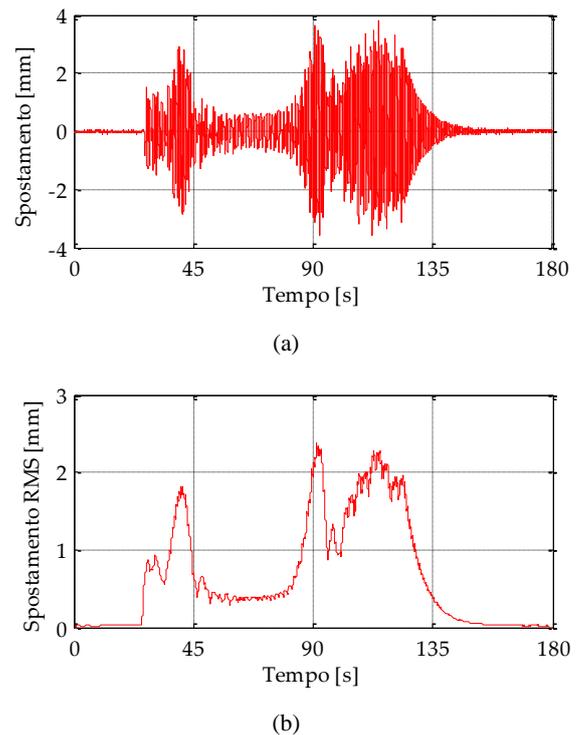


Figura 15. (a) Spostamento e (b) RMS dello spostamento misurato dal TInRAR alla quota di 40,00 m - (RB 56).

5.2 Confronto tra i contenuti in frequenza

La Figura 17a mostra una tipica serie temporale registrata dagli accelerometri piezoelettrici al livello L4; la corrispondente funzione PSD è presentata nella Figura 17b. L'accelerazione misurata è dell'ordine di $\pm 0,15$ mg, valore decisamente inferiore rispetto a quanto misurato durante i test di vibrazione forzata.

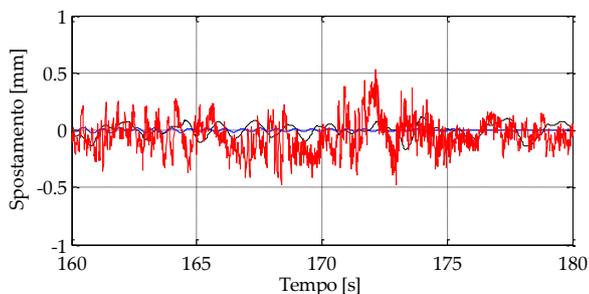


Figura 16. Dettaglio dello spostamento del livello L3 dopo il suono delle campane (oscillazioni libere). Linea nera: accelerometro MEMS M3; linea blu: accelerometro piezoelettrico A8; linea rossa: TInRAR – RB 39.

La procedura di identificazione riportata nella sezione 4.3 ha permesso di identificare chiaramente i primi sei modi di vibrare. A titolo di esempio, la Figura 18 presenta le frequenze naturali e le forme modali dei primi tre modi. Le prime due forme modali sono riconducibili alla flessione in direzione y (Figura 18a) e x (Figura 18b), rispettivamente, mentre il terzo modo è torsionale (Figura 18c).

Si è effettuata successivamente una valutazione preliminare delle prestazioni della strumentazione TInRAR nel caso di vibrazioni ambientali. La Figura 19 riporta le funzioni PSD dei livelli L3 e L4 calcolate dagli spostamenti dei tre sistemi di acquisizione in condizioni di esercizio. Gli accelerometri piezoelettrici (Figura 19c,d) consentono una chiara identificazione del picco a 1,44 Hz (modo 2 di Figura 18) a entrambi i livelli, dimostrando l'alta affidabilità di questi accelerometri anche nel caso di bassa eccitazione. Per quanto riguarda gli accelerometri MEMS, lo stesso picco può essere riconosciuto ad entrambi i livelli (Figura 19e,f), sebbene le funzioni PSD siano caratterizzate da un rumore più elevato. Anche le PSD ottenute dai segnali acquisiti dal TInRAR consentono un'identificazione abbastanza chiara del picco a entrambi i livelli (Figura 19a,b), ma con presenza di un rumore elevato.

È opportuno notare però che i risultati sono stati ottenuti con soli dieci minuti di misurazioni in condizioni ambientali in quanto tale è l'intervallo di tempo di registrazione disponibile con il radar interferometrico. Per un corretto confronto, anche le funzioni PSD dei sistemi di monitoraggio accelerometrico sono calcolate con riferimento allo stesso intervallo di tempo. Tuttavia, l'analisi di serie temporali più lunghe consentirebbe di ottenere funzioni PSD di qualità migliore anche con il radar interferometrico.

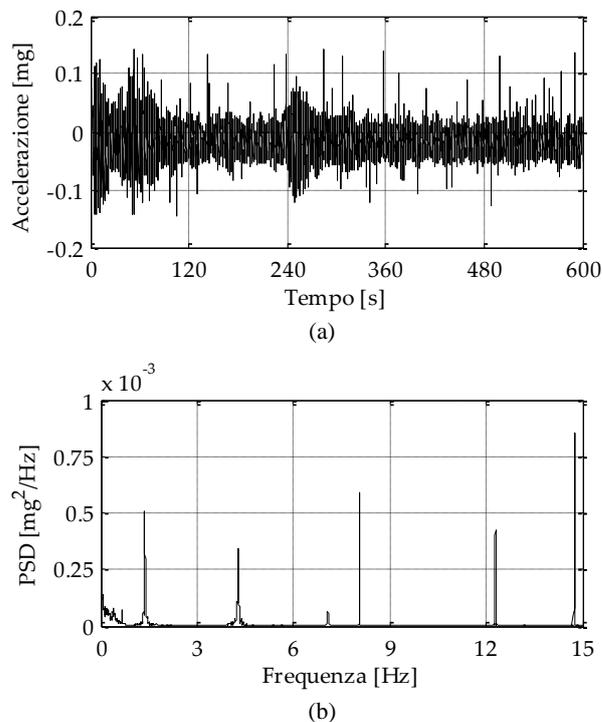


Figura 17. (a) Tipico andamento delle accelerazioni misurate al livello L4 in condizioni di esercizio e (b) corrispondente funzione PSD.

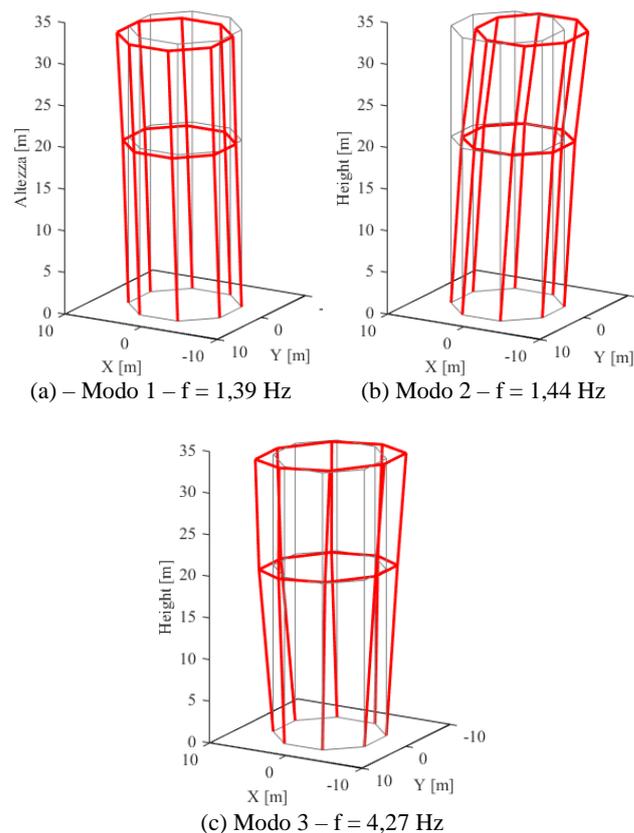
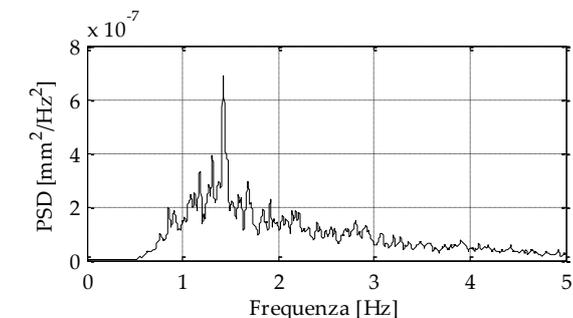
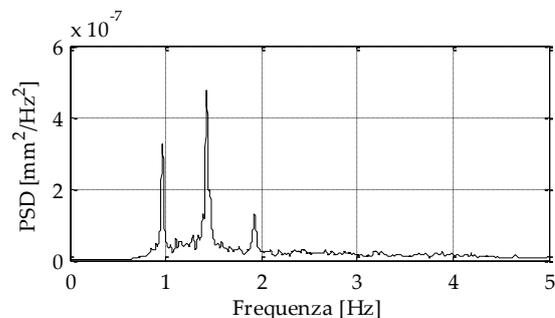


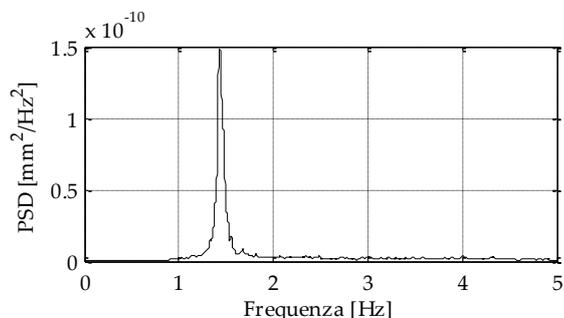
Figura 18. Primi tre modi di vibrare della struttura.



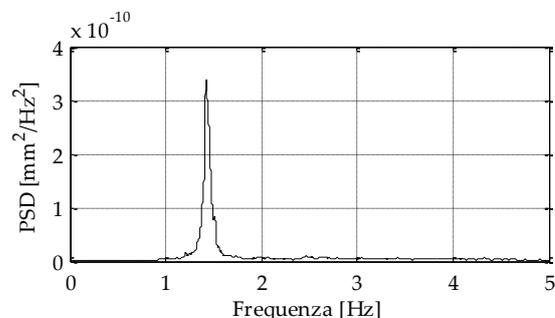
(a) Livello L3 – TInRAR RB 39



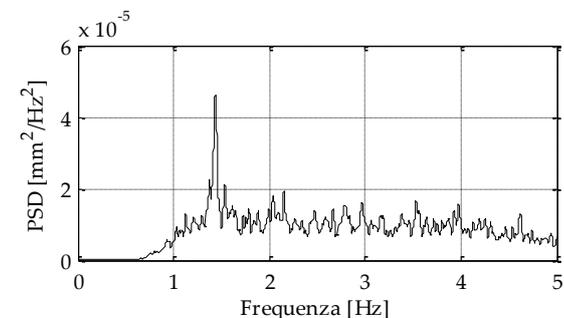
(b) Livello L4 – TInRAR RB 48



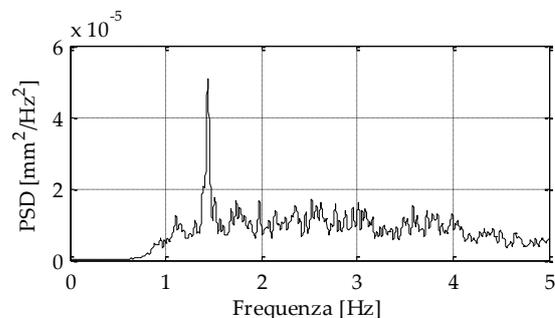
(c) Livello L3 - accelerometro piezoelettrico A8



(d) Livello L4 - accelerometro piezoelettrico A11



(e) Livello L3 - accelerometro MEMS M3



(f) Livello L4 - accelerometro MEMS M5

Figura 19. PSD calcolate ai livelli L3 (colonna di sinistra) e L4 (colonna di destra) dal radar (prima riga), dagli accelerometri piezoelettrici (seconda riga) e dagli accelerometri MEMS (terza riga).

5.3 Discussione

Dai risultati ottenuti, si può concludere che la tecnologia TInRAR ha portato a risultati in buon accordo con quanto ottenuto dai sensori che convenzionalmente sono usati per il monitoraggio dinamico strutturale. Durante le prove di vibrazione forzata, la torre ha manifestato vibrazioni che sono state registrate da tutti i sistemi con buona accuratezza. L'analisi dello spostamento massimo lungo l'altezza della torre (Figura 13) mostra che i due tipi di accelerometri hanno portato a risultati coerenti e molto simili, mentre quanto ottenuto con il radar differisce maggiormente, rendendo meno chiara l'identificazione della deformata della torre. Le differenze in valore assoluto tra gli spostamenti sono rilevanti solo in condizioni di scarsa riflettività della superficie della struttura da monitorare. D'altra parte, il maggior rumore del segnale del radar, mostrato in Figura 16, può

limitare l'uso del TInRAR solo a strutture che presentano ampie deformazioni o per il rilievo di movimenti lenti. In questo ultimo caso, infatti, è possibile effettuare numerose medie per compensare l'effetto del rumore ed aumentare quindi la precisione dei risultati.

Vale la pena sottolineare inoltre che l'interferometro radar rileva direttamente gli spostamenti. Ai fini della valutazione del danno sulle strutture, ad esempio, il radar fornisce dati preziosi che non possono essere ottenuti con sistemi basati su accelerometri, come lo spostamento residuo alla fine di un evento sismico. Inoltre, l'elaborazione dei dati richiesta per fornire le serie temporali di spostamento è veloce e leggera in termini di manipolazione dei dati. Al contrario, la doppia integrazione delle accelerazioni, se non ben eseguita, può introdurre grandi incertezze nei risultati che possono rendere inefficace l'accuratezza intrinseca dei sensori.

Infine, la Figura 15 indica anche una proprietà rilevante dell'interferometro radar: la capacità di fornire informazioni sugli spostamenti nella parte sommitale della torre. In alcune porzioni della struttura, infatti, è spesso difficile o addirittura impossibile installare accelerometri a causa di problemi di accessibilità. Il radar interferometrico diventa quindi particolarmente interessante per tutte quelle applicazioni in cui vi è la necessità di monitorare più punti contemporaneamente, inaccessibili o scarsamente accessibili, oppure per edifici per i quali problemi di sicurezza non permettono l'accessibilità diretta di operatori alla struttura, come per gli edifici danneggiati da un sisma.

6 CONCLUSIONI

La sperimentazione condotta sulla torre di San Prospero ha permesso di valutare gli spostamenti della torre a seguito di vibrazioni ambientali e dovute al suono delle campane. I sistemi di monitoraggio tradizionale installati sulla torre hanno permesso di analizzare, verificare e convalidare le prestazioni della tecnologia TInRAR.

La capacità della strumentazione TInRAR di osservare a distanza una struttura e fornire informazioni in numerosi punti di interesse, anche se inaccessibili, rappresenta il punto chiave per l'utilizzo di tale tecnologia nel monitoraggio strutturale. Inoltre, la rapida installazione dello strumento, le misurazioni dirette degli spostamenti e la rapida elaborazione dei dati rendono l'interferometro radar adatto alla misura degli spostamenti della struttura anche in condizioni di emergenza. La limitazione principale consiste nel rilevamento di spostamenti solo nella direzione di vista. Grazie alla capacità di misurare in maniera continua e diretta gli spostamenti di numerosi punti della struttura, l'uso della strumentazione TInRAR potrebbe essere di grande ausilio nell'interpretazione del comportamento strutturale e nella valutazione della progressione di un potenziale danneggiamento nelle strutture a seguito di eventi sismici. Un sistema di monitoraggio che combina l'interferometro radar terrestre con alcuni accelerometri, infatti, sarebbe in grado di ottenere risultati completi. Probabilmente, un sistema di monitoraggio integrato radar-accelerometri potrebbe essere la soluzione per ottenere risultati affidabili e diffusi per molte applicazioni.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è parte delle attività che si stanno svolgendo in ambito del progetto RELUIS 2019-2021 per il task WP6 "monitoraggio e dati satellitari".

Gli autori desiderano ringraziare Stefano Ovi, Presidente del Comitato di Restauro della Torre di San Prospero, per aver permesso di accedere alla struttura e di eseguire il test; Sergio Padovani e Fabio Giannino, IDS GeoRadar Srl, per aver collaborato alla raccolta dati fornendo il radar IBIS-FS e i membri dell'Unione Campanari Reggiani per aver suonato le campane durante il test. Un ringraziamento speciale al dr. Riccardo Rivola, CEO di GEIS - Geomatics Engineering Innovative Solutions SRL, per la promozione ed il contributo all'organizzazione del test.

REFERENCES

- Alvandi, A.; Cremona, C. 2006. Assessment of vibration-based damage identification techniques. *J. Sound Vibration*, 292, 179–202.
- Atzeni, C.; Bicci, A.; Dei, D.; Fratini, M.; Pieraccini, M. 2010. Remote survey of the leaning tower of Pisa by interferometric sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(1), 185–189.
- Bassoli, E.; Vincenzi, L.; Bovo, M.; Mazzotti, C. 2015. Dynamic identification of an ancient masonry bell tower using a MEMS-based acquisition system. In Proceedings of the IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, Trento, Italy, 9–10 July, 226–231.
- Brincker, R.; Zhang, L.; Andersen, P. 2001. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, *Smart Materials and Structures*, 10(3), 441–445.
- Di Pasquale, A.; Nico, G.; Pitullo, A.; Prezioso, G. 2018. Monitoring Strategies of Earth Dams by Ground-Based Radar Interferometry: How to Extract Useful Information for Seismic Risk Assessment. *Sensors*, 18 1–27.
- Gocal, J., Ortyl, L., Owerko, T., Kuras, P., Kocierz, R., Cwiakala, P., Puniach, E., Sukta, O., Balut, A. 2013. *Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry*; AGH University of Science and Technology Press: Krakow, Poland; pp. 78–115, ISBN 978-83-7464-645-1.
- Guidorzi, R., Diversi, R., Vincenzi, L., Mazzotti, C. 2014. Simioli, V. Structural monitoring of a tower by means of MEMS-based sensing and enhanced autoregressive models. *European Journal of Control*, 20(1), 4–13.
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.L., Shih, H.H., Zeng, Q., Yen, N.C., Tung C.C., Liu H.H. 1998. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. Roy. Soc. London A*, 454(1971), 903–995.
- IDS GeoRadar Srl. IBIS-FS Datasheet. Available online: <https://idsgeoradar.com/products/interferometric-radar/ibis-fs> (accessed on 20th January 2019).
- Monducci, E. 2006. *San Prospero la torre di Giulio Romano a Reggio Emilia*; Motta Editore: Milano, Italy, pp. 13–75.

- Mukhopadhyay, S., Betti, R., Galli, E., Savoia, M., Vincenzi, L. 2013. A new denoising procedure based on empirical mode decomposition for SHM purpose Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures. In Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, New York, USA, 16-20 June, 4547-4554.
- Nobili, U., Codazzi, G.M., Squarza, N. 1997. *Nel cuore della città: momenti di storia dell'arte a Reggio Emilia tra Umanesimo e Manierismo*; Musei Civici Reggio Emilia Collana Fotografia: Reggio Emilia, Italy, pp. 120.
- Pieraccini, M. 2013. Monitoring of civil infrastructures by interferometric radar: A review. *The Scientific World Journal*.
- Pieraccini, M., Dei, D., Betti, M., Bartoli, G., Tucci, G., Guardini, N. 2014. Dynamic identification of historic masonry towers through an expeditious and no-contact approach: Application to the "Torre del Mangia" in Siena (Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 15(3), 275-282.
- Smyth A., Wu M. 2006. Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurements in dynamic system monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(2), 706-723.
- Stabile, T.A., Perrone, A., Gallipoli, M. R., Ditommaso, R., Ponzio, F.C. 2013. Dynamic survey of the Musmeci bridge by joint application of ground-based microwave radar interferometry and ambient noise standard spectral ratio techniques. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4), 870-874.
- Strozzi, T., Werner, C., Wiesmann, A., Wegmuller, U. 2012. Topography mapping with a portable real-aperture radar interferometer. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(2), 277-281.
- Trapani, D., Maroni, A., Debiase, E., Zonta, D. (2015). Uncertainty evaluation of after-earthquake damage detection strategy. *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, EESMS 2015* - art. no. 7175864, pp. 125-130.
- Vincenzi, L., Simonini, L. 2017. Influence of model errors in optimal sensor placement. *Journal of Sound and Vibration*, 389, 119-133