



# Un filtro tempo-frequenza per l'analisi delle caratteristiche dinamiche di strutture a comportamento non stazionario

Rocco Ditommaso, Marco Mucciarelli, Felice Carlo Ponzio

Dipartimento DiSGG – Università degli Studi della Basilicata, V.le dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza

*Keywords: Identificazione dinamica, sistemi non lineari, monitoraggio strutturale, S-Transform*

## ABSTRACT

Uno degli strumenti più utilizzati per lo studio del comportamento dei sistemi dinamici è la trasformata di Fourier. Tale strumento si rivela utile e affidabile quando utilizzato per analizzare la risposta di sistemi stazionari, ossia di sistemi in cui le caratteristiche dinamiche non varino nel tempo. Al contrario, qualora si volesse studiare la risposta dinamica di un sistema variabile nel tempo, la trasformata di Fourier potrebbe non essere lo strumento più adeguato. Nel corso degli ultimi decenni sono stati messi a punto diversi strumenti matematici utili a studiare l'evoluzione della risposta di un sistema dinamico in cui le caratteristiche dinamiche, quali, ad esempio, le frequenze e le deformate modali, variano con il tempo. Sia i terreni che le strutture, se sollecitate in modo opportuno, possono esibire un comportamento non lineare, e quindi non stazionario. In generale, l'escursione in campo plastico genera dei fenomeni irreversibili, dunque, un cambiamento delle caratteristiche meccaniche globali che, ad esempio sugli edifici, può implicare la presenza di danno. In questo articolo viene presentata una nuova strategia per lo studio dei sistemi tempo-evolventi, valida per gli edifici e per i terreni, che utilizza un filtro a banda variabile basato sulla trasformata di Stockwell.

## 1 INTRODUZIONE

Lo studio dell'evoluzione nel tempo delle caratteristiche dinamiche di un sistema è spesso effettuata in maniera approssimata mediante strumenti che richiedono l'assunzione del requisito di stazionarietà del sistema stesso. Tali tecniche non sempre risultano appropriate. Ad esempio, uno degli strumenti maggiormente utilizzato per l'analisi dei sistemi dinamici è la trasformata di Fourier, che per una funzione  $h(t)$  può essere così espressa:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (1)$$

Questa tecnica, così come le altre tecniche basate sull'assunzione di comportamento stazionario del sistema, può risultare non appropriata nei casi in cui le cui caratteristiche dinamiche dei sistemi mutino nel tempo. Valutando, infatti, con la trasformata di Fourier un segnale non stazionario si ottiene solo una

media di ogni ampiezza spettrale valutata sull'intero segnale. Si perdono, così, informazioni utili sulle variazioni di comportamento nel tempo del sistema indagato.

Un altro strumento largamente utilizzato per studiare sistemi transienti tempo-evolventi è la STFT (Short Time Fourier Transform) (Gabor, 1946). Tale tecnica supera alcuni limiti della Trasformata di Fourier, essendo in grado di fornire indicazioni sulle variazioni nel tempo delle caratteristiche spettrali del segnale analizzato. Per un segnale  $h(t)$  la STFT è definita come:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (2)$$

dove  $w(t - \tau)$  è rappresentativa di una generica finestra temporale che si muove lungo il segnale. Sfortunatamente anche questa tecnica è caratterizzata da alcuni limiti che tendono a distorcere il risultato. Infatti, i valori medi delle grandezze spettrali ricavati mediante la tecnica delle finestre mobili non forniscono valori

assoluti ma possono essere usati solo in termini di confronto. Al fine di applicare in maniera efficace la *STFT* è necessario scegliere in maniera opportuna la lunghezza, in termini di durata temporale, della finestra mobile. Tale scelta non può essere fatta in maniera arbitraria in quanto risulta legata alla necessità di ottenere una buona risoluzione in entrambi i domini: del tempo e della frequenza. Per avere una buona risoluzione nel dominio del tempo bisognerebbe optare per una finestra temporale molto corta, ma, in tale caso, si avrebbe come risultato una risoluzione nel dominio delle frequenze molto bassa. Al contrario, una finestra temporale molto lunga determinerebbe una buona risoluzione nel dominio della frequenza ma si perderebbero informazioni importanti nelle fasi di forte variazione delle caratteristiche dinamiche del sistema. In sintesi, la scelta della durata della finestra temporale utilizzata per la valutazione della *STFT* è strettamente legata al particolare problema da analizzare e richiede una grande esperienza in fase di impostazione dell'analisi, spesso non compatibile con le esigenze di automatizzazione dei sistemi di monitoraggio o di identificazione dinamica.

Di recente, sono state sviluppate diverse tecniche per l'analisi tempo-frequenza dei segnali. Quelle maggiormente utilizzate sono la Trasformata Wavelet e la distribuzione di Wigner-Ville. Per un segnale  $h(t)$  tali trasformate, sono definite rispettivamente come:

$$F(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot w^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

dove  $a$  e  $b$  sono due fattori di scala e  $w^*$  è la generica finestra mobile, e:

$$WD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h\left(\tau + \frac{t}{2}\right) \cdot h\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \cdot e^{-i2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (4)$$

dove  $t$  è il tempo,  $f$  la frequenza e  $\tau$  è un parametro che controlla la posizione della funzione. Queste trasformate forniscono alcuni vantaggi rispetto alla trasformata di Fourier e alla *STFT*, ma non permettono una valutazione corretta dello spettro locale. In altri termini tali strumenti possono risultare insufficienti per una corretta valutazione delle caratteristiche spettrali nel caso di variazioni istantanee.

Uno strumento che supera tali limiti ed è in grado di consentire una valutazione accurata delle caratteristiche spettrali e delle loro variazioni locali nel tempo è la trasformata di Stockwell (Stockwell *et al.*, 1996), o *S-Transform*. Tale trasformata per un segnale  $h(t)$  è definita come:

$$S(\tau, f) = \frac{|f|}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{\frac{(\tau-t)^2 \cdot f^2}{2}} \cdot e^{-i2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (5)$$

dove  $t$  è il tempo,  $f$  è la frequenza e  $\tau$  è un parametro che controlla la posizione della finestra gaussiana lungo l'asse del tempo.

Le proprietà della finestra gaussiana, così come definita nell'espressione (5), derivano dalla definizione della trasformata *wavelet* (Mallat, 1998). Tuttavia, in questo caso il vincolo di media zero, necessario per le *wavelet*, non è richiesto. Inoltre, se confrontato con la trasformata *wavelet*, la *S-Transform* cambia la forma dei coefficienti reali ed immaginari nel tempo, insieme alla traslazione della finestra gaussiana. La trasformata *wavelet*, invece, non gode di tale proprietà, infatti, l'intera funzione trasla nel tempo ma non cambia mai forma (Parolai, 2009).

La *S-Transform* possiede, inoltre, importanti proprietà, quali, ad esempio quella di poter essere scritta come un operatore funzione dello spettro di Fourier (Stockwell *et al.*, 1996):

$$S(\tau, f) = \frac{|f|}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\alpha + f) \cdot e^{\frac{2\pi^2 \cdot \alpha^2}{f^2}} \cdot e^{-i2\pi \cdot \alpha \cdot \tau} d\alpha \quad (6)$$

Inoltre, può essere dimostrato che (Stockwell *et al.*, 1996):

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau \quad (7)$$

In tal modo è possibile risalire alla funzione  $h(t)$  utilizzando la seguente relazione (Stockwell *et al.*, 1996):

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau \right) \cdot e^{i2\pi \cdot f \cdot t} df \quad (8)$$

L'ultima importante proprietà è la linearità della *S-Transform* (Stockwell *et al.*, 1996):

$$S\{data(t)\} = S\{signal(t)\} + S\{noise(t)\} \quad (9)$$

Dove  $S$  sta per *S-Transform*. Grazie a questa importante proprietà è possibile estrarre le informazioni di interesse dal segnale, senza modificarne le caratteristiche.

## 2 FILTRO A BANDA VARIABILE

Nel passato molti autori hanno tentato di sviluppare metodi per "pulire" un generico segnale inquinato da rumore (Weaver *et al.*, 1991; Donoho and Johnstone, 1994; Donoho,

1995; Douglas, 1997; Galiana-Merino *et al.*, 2003). Una possibilità è fornita dall'eq. 9, che suggerisce la possibilità di filtrare il segnale utilizzando la trasformata di Stockwell (Pinnegar and Eaton, 2003; Schimmel and Gallart, 2005; Ascari and Siahkoohi, 2007; Simon *et al.*, 2007; Parolai, 2009; Ditommaso *et al.*, 2010c).

Con il presente lavoro viene valutata la possibilità di utilizzare un filtro basato sulla *S-Transform*, (*S-Filtro* o *filtro a banda variabile*) per estrarre le caratteristiche dinamiche di sistemi che evolvono nel tempo, operando simultaneamente nel dominio del tempo e delle frequenze. Il filtro è stato costruito utilizzando le proprietà di convoluzione, linearità e invertibilità proprie della *S-Transform*. L'algoritmo su cui il metodo è basato può essere sintetizzato nei seguenti passi:

1. Valutazione della *S-Transform*  $S(\tau, f)$  del segnale  $h(t)$ ;
2. Generazione della matrice filtrante  $G(\tau, f)$ ;
3. Calcolo della convoluzione nel dominio delle frequenze  $M(\tau, f) = G(\tau, f) * S(\tau, f)$ ;
4. Recupero del segnale filtrato  $h_f(t)$  attraverso il calcolo dell'inversa della matrice  $M(\tau, f)$ .

In sintesi, l'intero processo può essere scritto come:

$$h_f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} [S(\tau, f) * G(\tau, f)] d\tau \right) \cdot e^{i2\pi \cdot f \cdot t} df \quad (10)$$

La generica colonna *k-esima*, definita come  $G(\tau_k, f)$ , identifica una finestra di filtraggio ad un determinato istante temporale.

La definizione della matrice filtrante potrebbe essere un'operazione molto impegnativa in termini di tempo. Infatti, la banda passante di ciascuna finestra filtrante, deve essere allargata o ridotta per ogni istante di tempo, in accordo con la larghezza di banda selezionata e la forma della matrice.

Al fine di velocizzare tale processo può essere conveniente tentare di automatizzare lo stesso. A tale scopo è stata proposta un'implementazione che definisce la matrice di filtraggio mediante un'interfaccia grafica (GUI), che consente di visualizzare l'ampiezza dello spettro della *S-Transform* del segnale e di selezionare la regione da filtrare direttamente nel dominio tempo-frequenza, come mostrato in Figura 1.

La routine è stata progettata in modo che l'utente possa selezionare i punti di interesse a video, consentendo all'elaboratore di individuare una curva interpolante (spline cubica) che definisce la regione da filtrare. Per definire la matrice filtrante è stata utilizzata la funzione "pimf" del MATLAB®, maggiori dettagli su tale

funzione sono disponibili su [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).

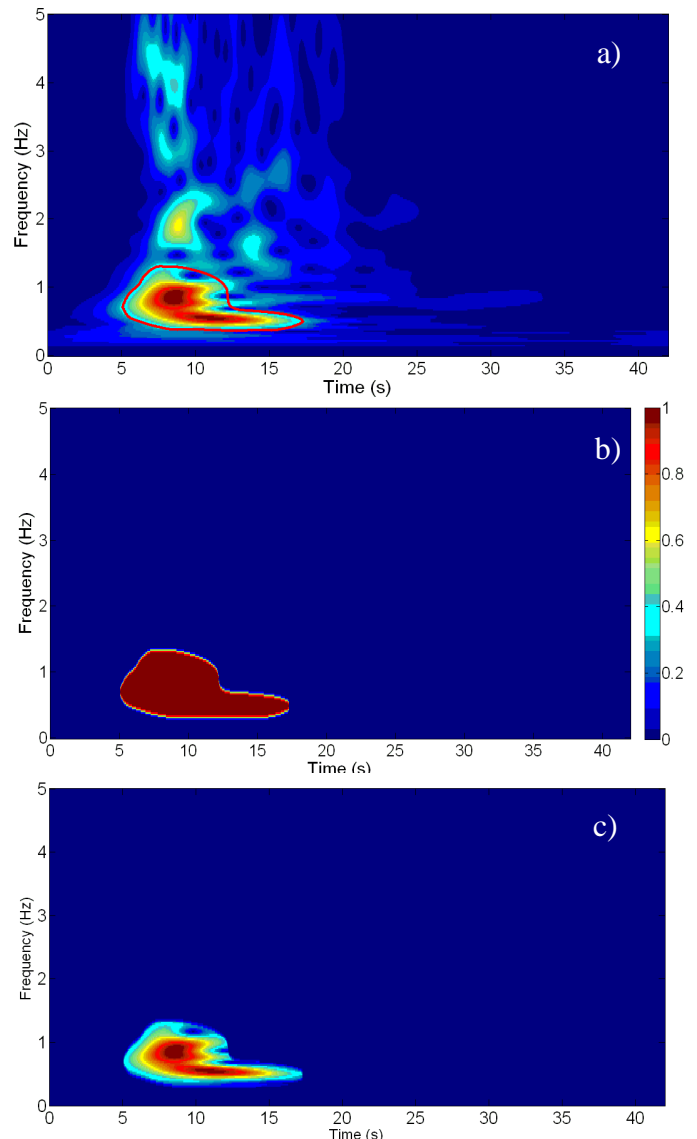


Figura 1. (a) Selezione manuale della regione; (b) Matrice filtrante; (c) Matrice Filtrata

La Figura 2 mostra un esempio di applicazione della funzione *pimf*, utilizzata per costruire la matrice filtrante  $G(\tau, f)$ . La funzione MATLAB® relativa al filtro a banda variabile è disponibile, sul sito <https://sites.google.com/site/prinstessa/> o, in alternativa, su <http://roccoditommaso.xoom.it>.

Il primo esempio riportato per evidenziare le potenzialità del filtro a banda variabile riguarda un segnale sintetico caratterizzato da un contenuto in frequenza variabile nel tempo, con un transiente sovrapposto. La lunghezza del segnale è uguale a 22 sec, con una sequenza di valori nulli di durata pari ad 1 sec all'inizio e alla fine del segnale.

La frequenza iniziale è di 11 Hz. Nella parte centrale il segnale raggiunge la frequenza minima, uguale a 3 Hz, per poi ritornare alla frequenza iniziale, seguendo un andamento di

tipo parabolico. Il segnale è visualizzato nella Figura 3a. Tale segnale è stato sommato ad un altro segnale caratterizzato da un'ampiezza unitaria, come il primo, ma con una frequenza costante pari a 9 Hz.

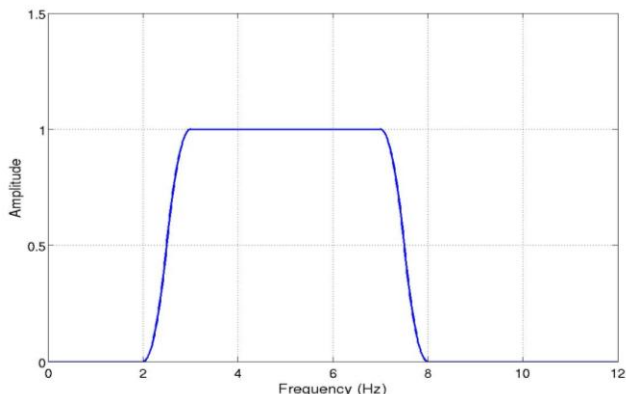


Figura 2. Esempio di funzione *pimf* utilizzata per costruire la matrice di filtraggio

Il risultato è quello di un disturbo nella parte centrale, corrispondente al valore minimo di frequenza del segnale principale. Va sottolineato che la frequenza del disturbo è contenuta nell'intervallo di variazione del segnale principale. La Figura 4a riporta la somma dei due segnali, mentre la Figura 4b mostra lo spettro di Fourier calcolato sull'intero segnale.

L'eliminazione del disturbo in tali condizioni può rappresentare un ostacolo insormontabile utilizzando i classici approcci per il filtraggio.

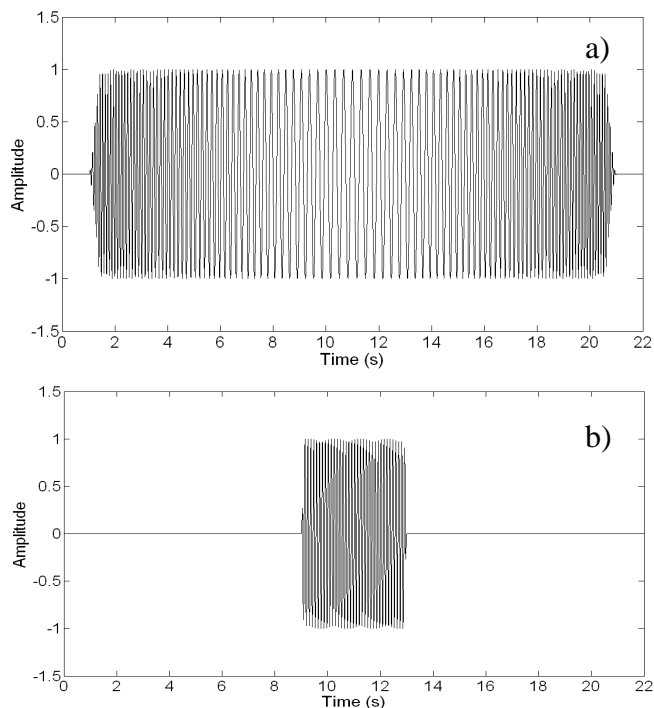


Figura 3. (a) Sinusoide a frequenza variabile (b) Sinusoide ad ampiezza costante

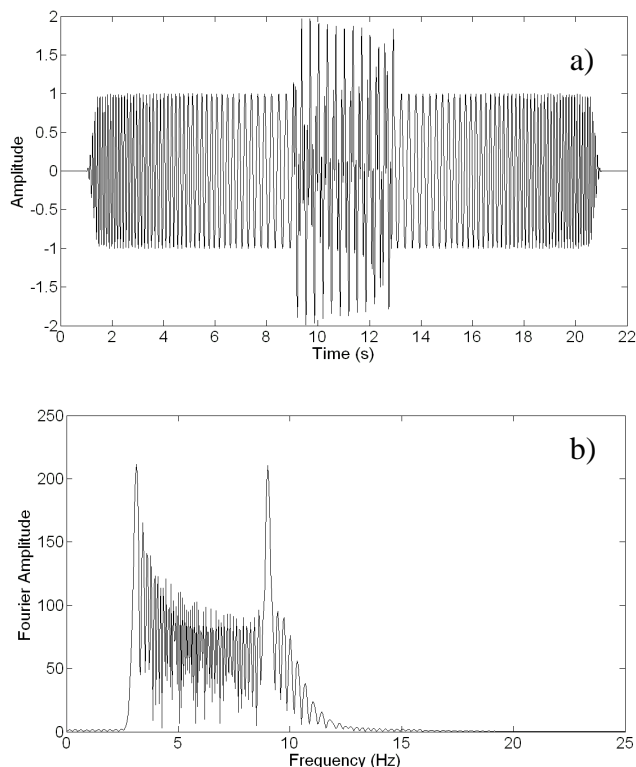


Figura 4. (a) Segnale risultante con rumore (b) Spettro di Fourier del segnale risultante

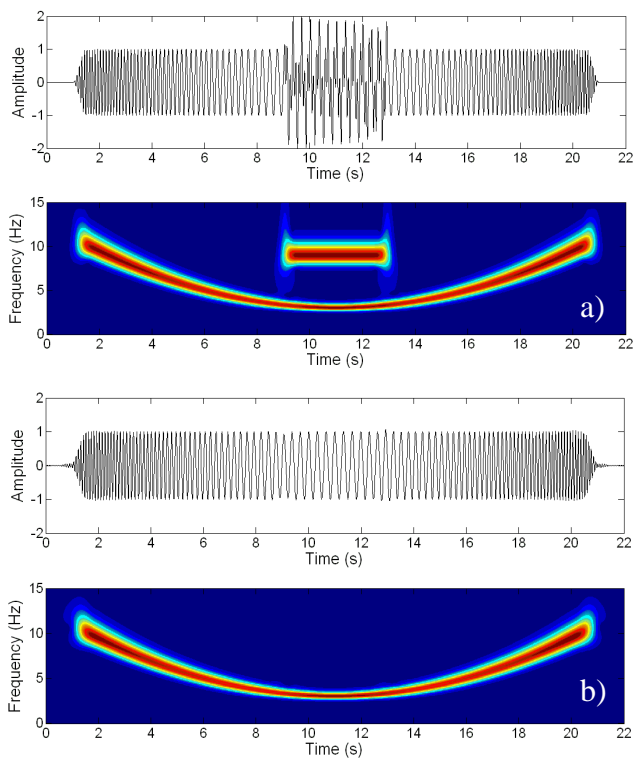


Figura 5. (a) S-Transform del segnale; (b) Segnale filtrato utilizzando il filtro a banda variabile.

Risulta evidente dallo spettro di Figura 4b che con il solo spettro di Fourier è impossibile distinguere i due segnali e che con i filtri tradizionali non si riesce ad eliminare l'interferenza senza alterare in maniera

significativa il segnale originale. In questo caso un filtro a banda variabile può aiutare ad isolare il segnale principale dal secondo. La Figura 5a, infatti, evidenzia il vantaggio di utilizzare la *S-Transform* al posto della classica trasformata di Fourier. In tal caso, infatti, è possibile distinguere chiaramente i due segnali, nonché la variazione del contenuto energetico nel tempo.

Figura 5b mostra, invece, il segnale originale recuperato con il filtro a banda variabile e con la sua *S-Transform*. Analogamente a quanto è stato fatto per estrarre il segnale a frequenza variabile, è possibile anche estrarre la componente definita come disturbo. È importante sottolineare che i valori utilizzati per costruire la matrice di filtraggio sono numeri reali, quindi la parte complessa della matrice risultante dal calcolo della *S-Transform* non viene alterata dalla procedura. Il risultato è una matrice filtrante che cambia l'ampiezza senza alterare le fasi del segnale. Così, utilizzando un filtro a banda variabile si ottiene un segnale filtrato con angoli di fase identici a quelli del segnale originale.

### 3 APPLICAZIONE A DATI REALI

Di seguito vengono mostrate alcune applicazioni a casi reali, che illustrano le modalità e le potenzialità di estrazione delle informazioni di interesse da un segnale di partenza riferito a sistemi non stazionari.

Il primo caso si riferisce ad una registrazione sul terreno effettuata durante una campagna sperimentale su un edificio reale. Il secondo caso è relativo all'acquisizione fatta su un edificio per civile abitazione durante il principale aftershock del terremoto del Molise del 2002, mentre il terzo caso si riferisce ad una registrazione sul terreno durante il terremoto di Kobe del 1995, in cui sono stati registrati importanti fenomeni di liquefazione.

L'esperimento effettuato a Bagnoli, nell'area industriale dell'ex Italsider, su un edificio in scala reale, in calcestruzzo armato di due piani (Dolce *et al.*, 2005 e 2006), è stato sviluppato al fine di verificare l'efficacia di differenti sistemi di protezione sismica di tipo passivo, basati sulla dissipazione di energia. Durante i test di rilascio è stato possibile studiare le onde sismiche trasmesse dall'edificio al terreno durante le fasi di oscillazioni libere. Durante le prove l'edificio è stato dapprima spostato dalla sua posizione originaria, grazie all'utilizzo di un martinetto idraulico ancorato ad un telaio in acciaio di contrasto (Figura 6), quindi è stato rilasciato istantaneamente tagliando con il plasma un

particolare elemento d'acciaio di collegamento tra la testa del martinetto ed il sistema di aggancio all'edificio, infine è stato fatto oscillare liberamente in regime di oscillazioni smorzate.

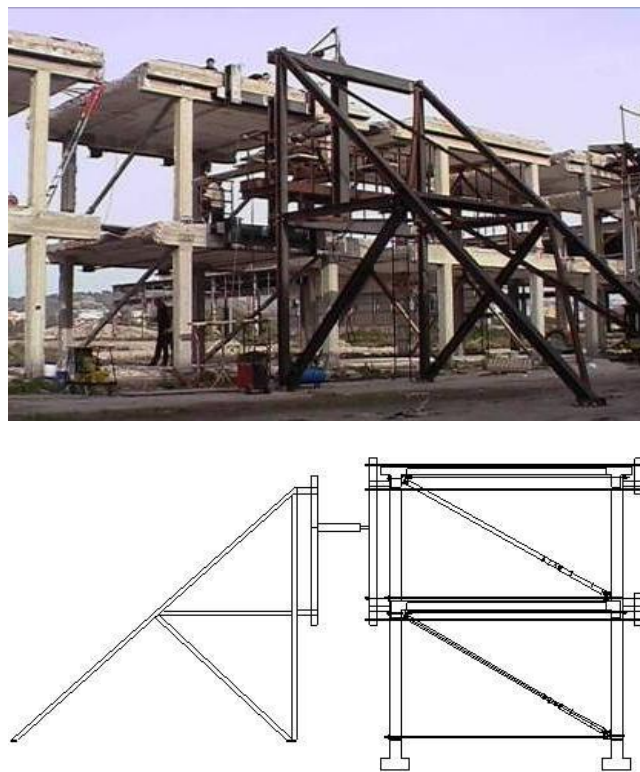


Figura 6. Edificio sottoposto a test di rilascio e schema sperimentale completo della struttura di contrasto

Al fine di monitorare il comportamento della struttura, sono stati utilizzati diversi sensori installati sia sulla struttura, sia sul terreno circostante l'edificio.

Grazie agli strumenti installati nel terreno è stato possibile registrare il moto indotto nel suolo dalle oscillazioni libere dell'edificio.

In precedenti lavori (Gallipoli *et al.*, 2006; Ditommaso *et al.*, 2010a) è stato mostrato che le onde sismiche, generate durante i test di rilascio dell'edificio, sono caratterizzate da due frequenze dominanti: una pari a circa 20Hz, dovuta alla struttura di contrasto in acciaio, ed una variabile tra 1 e 2 Hz, dovuta all'edificio oggetto di prova. La variabilità della seconda frequenza è da attribuire agli effetti non lineari determinati dall'azione dei controventi dissipativi posizionati nel telaio in c.a. dell'edificio. Nel caso specifico della prova analizzata sono stati utilizzati particolari controventi dissipativi basati sulle capacità ricentranti e dissipative delle leghe a memoria di forma.

La Figura 7 mostra lo spostamento registrato in corrispondenza della stazione accelerometrica posizionata a circa 10m dall'edificio, insieme alle *S-Transform* delle registrazioni ed un ingrandimento nell'intervallo 0-3Hz. Il modo

fondamentale di vibrazione è stato isolato dai modi superiori e dal rumore contenuto nel segnale mediante il filtro a banda variabile.

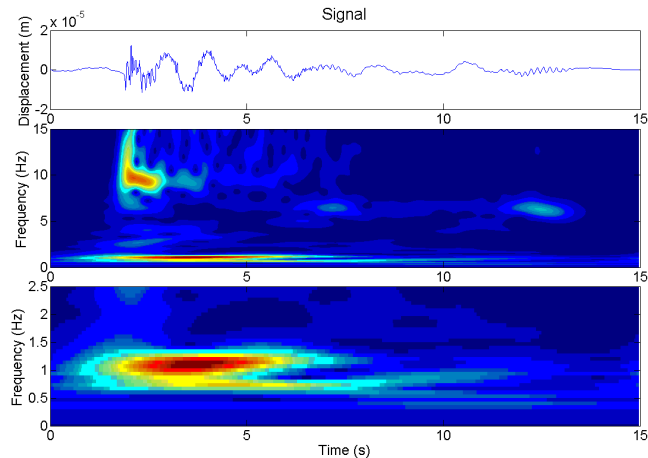


Figura 7. Registrazione in Free-Field effettuata a 10m di distanza dall'edificio durante le prove di rilascio. In testa il segnale e sotto le relative trasformate di Stockwell valutate nell'intervallo 0-15Hz e 0-2,5Hz

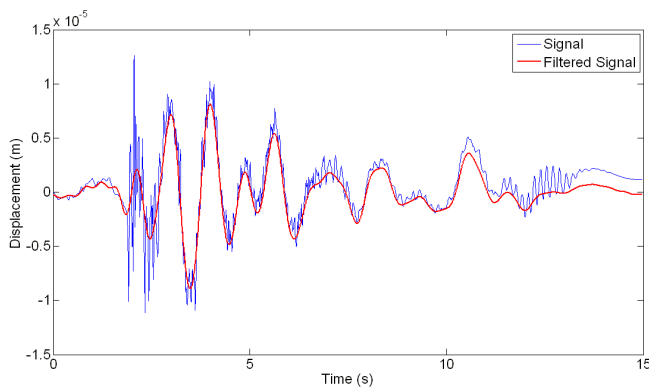


Figura 8. Confronto tra segnale filtrato e segnale originario

I grafici mostrati in Figura 8 mostrano le potenzialità del filtro a banda variabile nell'estrarre da un segnale reale, a contenuto in frequenza variabile nel tempo e affetto da rumore e dell'influenza di strutture interagenti con quella principale, lo spettro locale a maggiore contenuto energetico. Mediante l'applicazione del filtro a banda variabile è stata, inoltre, evitata la distorsione di fase introdotta dai filtri di tipo standard.

Il secondo esempio si riferisce alla sequenza sismica verificatasi in Molise nel 2002. Durante tale terremoto gli edifici del Comune di Bonefro hanno subito, in generale, solo danni leggeri, classificati come  $I_{MCS} = VII$ , eccetto due edifici per civile abitazione, realizzati in calcestruzzo armato, che sono stati gravemente danneggiati dal sisma (Mucciarelli *et al.*, 2004). I due edifici, molto simili tra loro, sia in termini di progetto che di tipologia costruttiva, sono contigui e posizionati in un'area dove gli strati di terreno sono formati da strati di terreno soffice di tipo

sedimentario. L'edificio maggiormente danneggiato è costituito da 4 piani, mentre quello meno danneggiato è costituito da soli 3 piani.

A seguito della replica sismica del 1° novembre 2002 (M 5.3), l'edificio più alto ha subito ulteriori danni alle parti strutturali rispetto a quelli già evidenziati durante l'evento principale. Durante tale scossa un sismometro posizionato sull'edificio ha registrato la risposta della struttura durante le fasi di progressione del danno (Mucciarelli *et al.*, 2004). La struttura ha evidenziato un comportamento fortemente non lineare, testimoniato da un decadimento della frequenza fondamentale, nel corso dell'evento calamitoso secondario, pari a circa il 40%. Le registrazioni delle due componenti ortogonali nel piano orizzontale sono mostrate in Figura 9, insieme alle rispettive *S-Transform*. Nonostante la saturazione del segnale durante l'evento, è stato possibile seguire l'evoluzione del comportamento dinamico dell'edificio nel dominio tempo-tempo-frequenza.

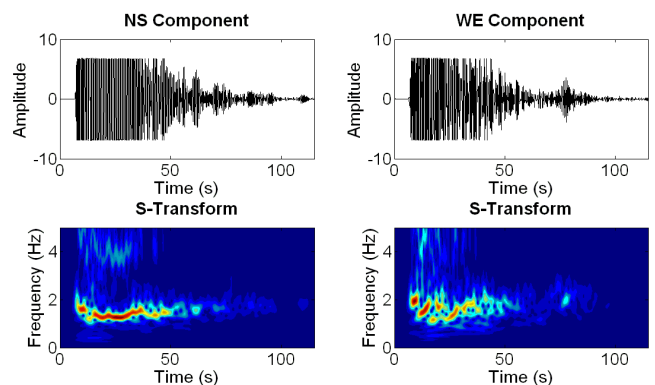


Figura 9. Acquisizioni velocimetriche effettuate all'interno dell'edificio di 4 piani (Bonefro).

L'attenzione è stata, quindi, posta sulla componente NS della registrazione del moto dell'edificio. Utilizzando l'analisi del segnale mediante la *S-Transform* è possibile riconoscere una frequenza di partenza della struttura, prima dell'evento sismico, pari a circa 1.9 Hz. Tale valore si riduce 1.2 Hz, in corrispondenza della massima eccitazione della struttura (massima escursione in campo plastico), per recuperare, nelle fasi finali della registrazione, fino a una frequenza di circa 1.8 Hz.

A questo punto la risposta del modo fondamentale dell'edificio è stata isolata mediante l'utilizzo del filtro a banda variabile. Il risultato delle operazioni di filtraggio è mostrato in Figura 10.

È interessante notare che grazie alla selezione dello spettro locale, il filtro a banda variabile è in grado di ricostruire la risposta dinamica della struttura con una componente di rumore del tutto

trascurabile, anche durante la fase non stazionaria.

Grazie alla notevole riduzione di frequenze spurie, questo strumento, una volta a disposizione le registrazioni a tutti i livelli della struttura, può consentire di isolare e studiare il comportamento dei singoli modi di vibrazione, nonché le loro variazioni nel tempo, come illustrato in (Ponzo *et al.*, 2011).

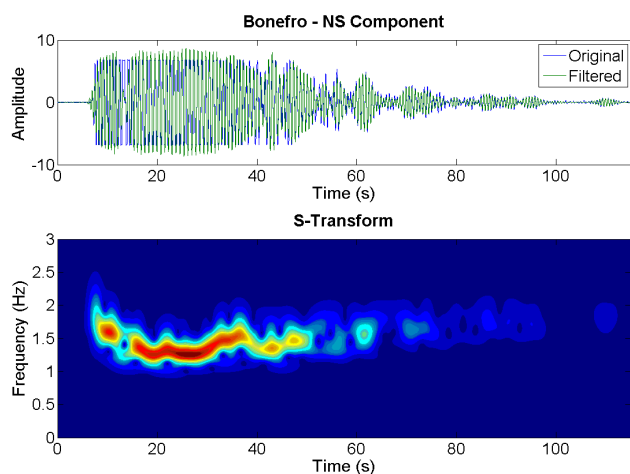


Figura 10. Comportamento non stazionario relativo al modo fondamentale della struttura

Infine, il filtro a banda variabile è stato applicato per estrarre informazioni relativamente alle frequenze relative ai segnali registrati al suolo durante il terremoto di Kobe (Giappone) del 2005. In particolare, il sito di Port Island ha evidenziato fenomeni di liquefazione e, quindi, notevoli variazioni di rigidità negli strati superficiali del terreno, che si traducono in variazioni significative delle frequenze fondamentali del terreno.

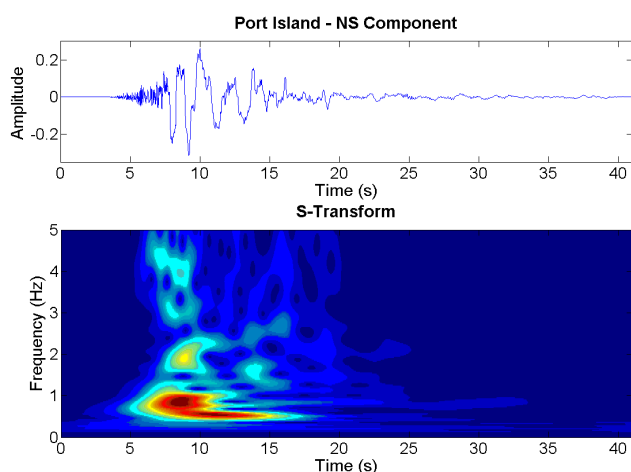


Figura 11. Componente NS del terremoto di Kobe

Il segnale registrato a differenti profondità durante il terremoto è stato studiato in maniera approfondita da Aguirre and Irikura (1997). La Figura 11 riporta la componente NS del moto del terreno in corrispondenza della superficie.

Analizzando la *S-Transform* del segnale risulta evidente che la maggior parte dell'energia è concentrata in corrispondenza di un singolo modo di vibrazione che subisce una forte variazione dopo solo un ciclo.

A seguito del cambiamento di frequenza, determinato dalla liquefazione del sottosuolo, non si osserva nessun recupero di rigidità, almeno nel breve periodo di tempo osservato.

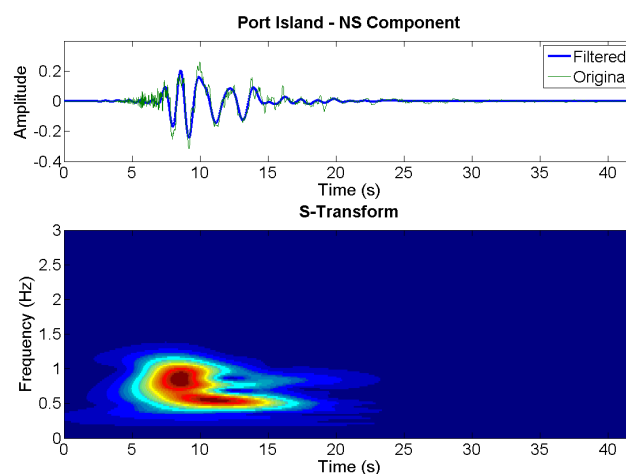


Figura 12. Applicazione del filtro a banda variabile alla componente NS del terremoto di Kobe

Informazioni più dettagliate sulle caratteristiche del primo modo di vibrazione del terreno sono state recuperate cercando di eliminare dalla registrazione tutto il rumore nonché la risposta relativa ai modi superiori e alle frequenze dovute all'interazione con strutture limitrofe. La *S-Transform* del segnale filtrato e il confronto tra i due segnali prima e dopo l'applicazione del filtro a banda variabile è mostrata in Figura 12.

#### 4 CONCLUSIONI

L'analisi dei segnali e la caratterizzazione dinamica dei sistemi strutturali richiede, in generale, una costante ricerca di strumenti matematici appropriati per superare gli ostacoli legati alla corretta valutazione delle caratteristiche dinamiche durante le fasi di risposta non stazionaria.

Il presente lavoro mostra come le tecniche classiche basate sulla Trasformata di Fourier, efficaci nel caso di segnali stazionari, forniscano invece risultati non immediatamente utilizzabili o non corretti nel caso in cui la risposta dei sistemi evolva nel tempo per effetto della non linearità intrinseca nei sistemi stessi. Va evidenziato che la non linearità nella risposta del sistema non è necessariamente legata esclusivamente al

progredire di un stato di danneggiamento, ma può essere determinata anche da una variazione dell'input o anche da fenomeni di interazione tra struttura e terreno o fra strutture adiacenti (Ditommaso *et al.*, 2010b).

Nel 1996 Stockwell ha introdotto un nuovo e potente strumento per l'analisi dei segnali denominato *S-Transform*. Se confrontato con le tecniche classiche per l'analisi tempo-frequenza dei segnali, questo tipo di trasformata mostra una migliore risoluzione oltre ad offrire ulteriori fondamentali proprietà quali la linearità e l'invertibilità. Utilizzando queste proprietà è stato possibile sviluppare un filtro la cui banda può variare sia nel dominio del tempo che in quello delle frequenze, risultando molto utile per studiare segnali di tipo non stazionario. Tali strumenti diventano indispensabili per isolare la risposta di singoli modi di vibrazione di edifici, o del suolo, variabili nel tempo, come ad esempio nel caso in cui le caratteristiche dinamiche evolvono nel tempo a seguito di eventi sismici.

La capacità di investigare la risposta di sistemi dinamici le cui caratteristiche sono variabili nel tempo apre nuovi scenari, come quello che consente di affrontare lo studio dell'evoluzione del danneggiamento di strutture esistenti. Infatti, la possibilità di isolare singole forme modali e da queste estrarre le curvature e le relative variazioni nel tempo può costituire un potente strumento di monitoraggio strutturale, essendo tali parametri strettamente connessi al danno strutturale (Pandey *et al.*, 1991).

## RINGRAZIAMENTI

IL presente studio è stato parzialmente finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile Italiana nell'ambito del progetto DPC-RELUIS 2010-2013 (Task 3.1).

## REFERENCES

- Aguirre, J., and K. Irikura (1997). Nonlinearity, Liquefaction, and Velocity Variation of Soft Soil Layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, No. 5, pp. 1244-1258, October 1997.
- Askari, R., and H. R. Siahkoobi (2007). Ground roll attenuation using the S and x-f-k transforms. *Geophys. Prospect.*, Vol. 55, pp. 1-10.
- Computers & Structures, Inc., "SAP2000 – Integrated Software for Structural Analysis & Design, Technical Reference Manual".
- Ditommaso, R., M. Mucciarelli, M. R. Gallipoli and F. C. Ponzio (2010a). Effect of a single vibrating building on free-field ground motion: numerical and experimental evidences. *Bulletin of Earthquake Engineering*. DOI: 10.1007/s10518-009-9134-5.
- Ditommaso, R., S. Parolai, M. Mucciarelli, S. Eggert, M. Sobiesiak and J. Zschau (2010b). Monitoring the response and the back-radiated energy of a building subjected to ambient vibration and impulsive action: the Falkenhof Tower (Potsdam, Germany). *Bulletin of Earthquake Engineering*. DOI: 10.1007/s10518-009-9151-4.
- Ditommaso R, Marco Mucciarelli, Felice C. Ponzio (2010c). S-Transform based filter applied to the analysis of non-linear dynamic behaviour of soil and buildings. 14th European Conference on Earthquake Engineering. Proceedings Volume. Ohrid, Republic of Macedonia. August 30 – September 03, 2010.
- Dolce M, Cardone D, Di Cesare A, Moroni C, Nicoletti M, Ponzio FC, Nigro D (2005). Dynamic tests on a 1:4 scaled R/C existing building: comparison of several isolation systems. 9th Assisi, Kobe
- Dolce M, Cardone D, Gallipoli M.R, Mucciarelli M, Nigro D, Ponzio F.C., Santarsiero G. (2006). Shape Memory Alloys Braces, in "Seismic upgrading of r.c. buildings by advanced techniques-the ILVA-IDEM research project" (pp. 325-359). ISBN: 88-7699-038-0. MONZA: Polimetrica International Scientific Publisher (ITALY). Federico Mazzolani Coordinator & ed.
- Donoho, D. (1995). De-noising by soft-thresholding. *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 41, pp. 613-627.
- Donoho, D., and I. M. Johnstone (1994). Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. *Biometrika*. Vol. 81, pp. 425-455.
- Douglas, A.. (1997). Bandpass filtering to reduce noise on seismograms: is there a better way?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, pp. 770-777.
- Gabor, D. (1946). Theory of communications. *J. Inst. Electr. Eng*, Vol. 93, pp. 429-457.
- Galiana-Merino, J. J., J. Rosa-Herranz, J. Giner, S. Molina, and F. Rotella (2003). De-noising of short period seismograms by wavelet packet transform. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, pp. 2554-2562.
- Gallipoli, M. R., M. Mucciarelli, F. Ponzio, M. Dolce, E. D'Alema, and M. Maistrello (2006). Buildings as a Seismic Source: Analysis of a Release Test at Bagnoli, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 6, pp. 2457-2464.
- Mallat, S. (1998). *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic, New York.
- Mucciarelli, M., A. Masi, M. R. Gallipoli, P. Harabaglia, M. Vona, F. Ponzio, and M. Dolce (2004). Analysis of RC Building Dynamic Response and Soil-Building Resonance Based on Data Recorded during a Damaging Earthquake (Molise, Italy, 2002). *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 5, pp. 1943-1953.
- Pandey, A. K., M. Biswas, M. M. Samman (1991). Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 145, Issue 2, pp. 321-332.
- Parolai, S. (2009). Denoising of Seismograms Using the S Transform. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 1, pp. 226-234.
- Pinnegar, C. R., and D. E. Eaton (2003). Application of the S-transform to prestack noise attenuation filtering. *J. Geophys. Res.*, Vol.108, no. B9, 2422, doi 10.1029/2002JB00002258.



- Ponzo F.C., Ditommaso R., Auletta G. (2011). Un approccio semplificato per la localizzazione del danno su strutture in cemento armato basato sulla Trasformata di Stockwell. *Atti del convegno ANIDIS 2011*, Bari, Settembre 18-22.
- Simon, C., S. Ventosa, M. Schimmel, A. Heldring, J. J. Dañobeitia, J. Gallart, and A. Manuel (2007). The S-Transform and its inverses: side effects of discretizing and filtering. *IEEE Trans. Signal Process.* , Vol. 55, pp. 4928–4937, doi 10.1109/TSP.2007.897893.
- Stockwell, R. G., L. Mansinha, and R. P. Lowe (1996). Localization of the complex spectrum: the S transform. *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 44, pp. 998–1001.
- Weaver, J. B., X. Yansun, D. M. Healy Jr, and L. D. Cromwell (1991). Filtering noise from images with wavelet transforms. *Magn. Reson. Med.* , Vol. 24, pp. 288–295.