

SAFAP 2018

SICUREZZA E AFFIDABILITA' DELLE ATTREZZATURE A PRESSIONE

La gestione del rischio dalla costruzione all'esercizio a 130 anni dalla prima legge sulla sicurezza delle caldaie a vapore

INAIL

Bologna - 28 e 29 novembre 2018

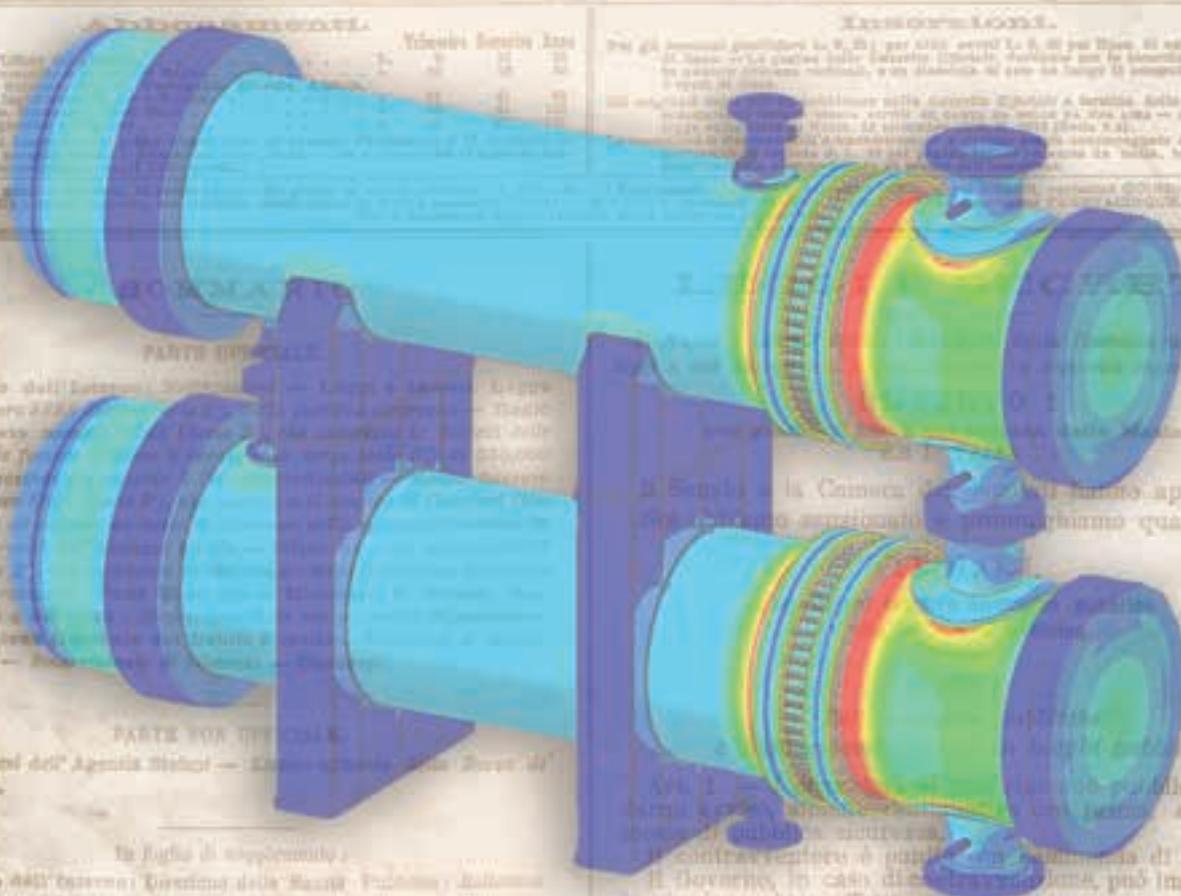
GAZZETTA UFFICIALE

DEL REGNO D'ITALIA

ANNO 1888

ROMA — SABATO 29 GENNAIO

N.° NUM. 22



PARTE UFFICIALE

MINISTERO DELL'INTERNO

Processing innovativo per la localizzazione delle sorgenti di Emissioni Acustiche

L. De Marchi^{1,4}, N. Testoni², M.M. Malatesta¹, G. Augugliaro³

¹ Dipartimento dell'Ingegneria Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi", DEI, Università di Bologna

² Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, DICAM, Università di Bologna

³ Inail - Dit

⁴ Centro di ricerca sui sistemi elettronici per l'ingegneria dell'informazione e delle telecomunicazioni "Ercole De Castro", ARCES

Sommario

Questo lavoro tratta lo sviluppo e l'implementazione di una tecnica di processamento delle Emissioni Acustiche (EA) per la localizzazione della sorgente in guide d'onda. L'algoritmo sfrutta l'informazione delle curve di dispersione, calcolate ad-hoc per il componente in oggetto, per compensare i segnali registrati dall'effetto della dispersione. I segnali compensati risultano stazionari su un nuovo dominio che dipende in modo lineare dalla distanza di propagazione delle EA. La cross-correlazione di segnali compensati consente di individuare la posizione della sorgente prescindendo da una prova di calibrazione e dall'implementazione di complicate procedure di inversione.

L'algoritmo è stato validato su misure sperimentali ottenute registrando mediante l'impiego di due sensori le EA dovute alla rottura di una mina calibrata lungo una barra di alluminio. I risultati ottenuti per diverse posizioni e per diversi valori del rapporto segnale su rumore, mostrano le potenzialità e la stabilità dell'algoritmo proposto rispetto alla classica localizzazione lineare implementata nelle apparecchiature commerciali per EA.

1. Introduzione

Il monitoraggio di strutture mediante la metodica delle EA presenta diversi vantaggi che, anche grazie all'avanzare delle tecnologie impiegate, stanno acquisendo un consenso crescente. Le moderne apparecchiature commerciali per EA permettono un affidabile rilevamento della comparsa di danni ed il loro monitoraggio nel corso del tempo [1]. Al fine di poter agire in modo mirato contro l'insorgenza di danni strutturali è di fondamentale importanza anche poter localizzare con precisione l'evento acustico rilevato. A tal fine in letteratura sono stati proposti diversi approcci che si basano ad esempio su metodi geometrici [2] e su algoritmi basati su reti neurali artificiali [3], tra gli altri. La scelta del giusto metodo da utilizzare all'interno di un sistema di EA deve essere ponderata al fine di ottimizzare la duttilità e le prestazioni del sistema stesso, con il giusto rapporto tra la precisione ed il costo computazionale dell'algoritmo. Per questi motivi spesso in attrezzature commerciali sono integrati algoritmi di tipo geometrico che nonostante la leggerezza computazionale che li contraddistingue riescono ad avere precisioni soddisfacenti. Questi algoritmi, tuttavia, basano il loro principio operativo sulla isotropia del materiale e sulla velocità di propagazione dell'onda supposta costante lungo tutto il percorso tra la sorgente ed i sensori (propagazione non dispersiva), cosa che generalmente non accade quando l'onda meccanica si propaga in una guida d'onda (propagazione dispersiva).

In questo lavoro verrà presentata un'innovativa tecnica di processamento del segnale per la localizzazione di EA basata sulla compensazione della dispersione dell'onda guidata.

Attraverso la conoscenza della curva di dispersione dell'onda meccanica ed usando un operatore matematico chiamato Warped Frequency Transform (WFT) è possibile rimuovere dai ritardi di gruppo dei segnali acquisiti la dipendenza dalla distanza percorsa. Effettuando successivamente la cross-correlazione su tali segnali trasformati, relativi a sensori differenti, è possibile ottenere una stima della differenza delle distanze percorse dall'onda guidata e quindi della posizione della sorgente [4]. La procedura descritta è compatibile con l'implementazione in sistemi "embedded" in quanto il suo costo computazionale è paragonabile a quello di una Fast Fourier Transform (FFT).

Al fine di valutare le potenzialità dell'algorithmo proposto sono stati realizzati più setup sperimentali per la localizzazione di sorgenti acustiche lungo una barra monodimensionale in alluminio. I segnali acustici dopo essere stati acquisiti attraverso un sistema commerciale, l'AMSY-5 della VallenSysteme, sono stati processati sia dall'algorithmo di localizzazione integrato nello strumento sia dall'algorithmo proposto basato su WFT. I test comparativi hanno mostrato come quest'ultimo consenta un grado di accuratezza ed una stabilità nella localizzazione della sorgente migliore rispetto all'algorithmo di localizzazione integrato nello strumento.

Il lavoro è organizzato come segue: la compensazione della dispersione, gli strumenti matematici necessari per la sua comprensione e la localizzazione sono presentati nella sezione 2; nella sezione 3 sono presentati i setup sperimentali atti a validare l'algorithmo di localizzazione, messo a confronto con i moderni sistemi di acquisizione commerciali; la sezione 4 conclude il lavoro presentandone le sue conclusioni.

2. Compensazione della dispersione

2.1 Warped Frequency Transform (WFT)

Sia dato un segnale $s(t)$ dispersivo, rappresentativo della propagazione di un'onda meccanica in una guida d'onda, e si indichi con $S(f) = \mathbf{F}\{s(t)\}$ la sua rappresentazione in frequenza con \mathbf{F} operatore della trasformata di Fourier. L'operatore di warping in frequenza \mathbf{W}_w trasforma l'asse delle ascisse mediante un'adeguata funzione $w(f)$, chiamata *warping map*[5], come:

$$s_w(t) \doteq \mathbf{W}_w\{s(t)\} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}\{s_w(t)\} = \sqrt{\dot{w}(f)}S(w(f)) \quad (2)$$

dove $s_w(t)$ è il segnale a cui è stato applicato l'operatore warping, e $\dot{w}(f)$ rappresenta la derivata prima di $w(f)$. La trasformata di un segnale reale è a sua volta un segnale reale se $w(f)$ è una funzione dispari, se vale cioè la relazione $w(f) = -w(-f)$. Inoltre, al fine di preservare l'invertibilità della funzione, $w(f)$ deve mappare l'asse delle frequenze su se stessa, devono cioè valere:

$$\dot{w}(f) > 0 \quad a. e. \Rightarrow \exists w^{-1}, \quad w^{-1}[w(f)] = f. \quad (3)$$

È stato mostrato in [6] che la WFT discreta può essere facilmente calcolata con gli algoritmi e le interpolazioni della Fast Fourier Transform, con un costo computazionale ridotto. In questa trattazione $w(f)$ è definita attraverso il suo funzionale inverso, definito come:

$$K \frac{dw^{-1}(f)}{df} = \frac{1}{c_g(f)} \quad (4)$$

dove $c_g(f)$ è la curva della velocità di gruppo nominale dell'onda guidata che si va a considerare, e K è un parametro di normalizzazione scelto in modo tale da avere $w^{-1}(0.5) = w(0.5) = 0.5$.

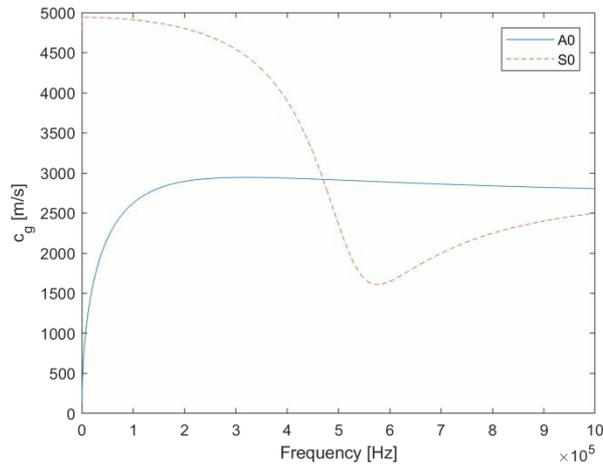


Figura 1. Curve di dispersione $c_g(f)$ per i modi fondamentali (A0 e S0) delle onde di Lamb in una piastra di alluminio di spessore 2mm.

In modo analogo a quanto descritto è possibile definire la *warping map* inversa $w^{-1}(f)$ mettendo in evidenza la velocità di fase $c_{ph}(f)$ o il numero d'onda $k(f)$ dell'onda guidata come:

$$Kw^{-1}(f) = \frac{f}{c_{ph}(f)} = \frac{k(f)}{2\pi} \quad (5).$$

La figura 1 presenta le curve di dispersione in termini di velocità di gruppo per le onde di Lamb che si propagano in una piastra di alluminio di 2 mm di spessore, calcolate considerando i seguenti parametri meccanici del materiale:

- Modulo di Young $E = 69 \text{ GPa}$
- Coefficiente di Poisson $\nu = 0.33$
- Densità $\rho = 2700 \text{ kg m}^{-3}$

Le curve sono state ottenute tramite la formulazione semi-analitica a elementi finiti (SAFE) proposta in [7].

2.2 Compensazione della dispersione attraverso la WFT

Si supponga dapprima che l'istante di generazione dell'evento acustico sia noto, come può avvenire ad esempio per le tecniche di monitoraggio attive. Sia $s_0(t, D)$ la forma d'onda nel dominio del tempo di un'onda guidata non smorzata registrata ad una distanza D dal punto di eccitazione. Tale segnale può essere modellato come un sistema dispersivo la cui risposta nel dominio delle frequenze risulta:

$$S_0(f, D) = S_0(f, 0)e^{-j2\pi \int \tau(f, D) df} \quad (6)$$

in cui $S_0(f, 0)$ è la trasformata di Fourier dell'impulso di eccitazione nel punto di attuazione a $D = 0$. $\tau(f, D)$ è il ritardo di gruppo delle componenti dell'onda alla frequenza f (è assunto che il trasduttore sia ideale e che ecciti solo il modo guidato di interesse) definito come $\tau(f, D) = D/c_g(f)$. Prendendo a riferimento la relazione (4) si può riscrivere $S_0(f, D)$ come:

$$S_0(f, D) = S_0(f, 0)e^{-j2\pi D \int \frac{1}{c_g(f)} df} = S_0(f, 0)e^{-j2\pi w^{-1}(f)KD} \quad (7)$$

dove si evidenzia che la distorsione causata dalla dispersione risulta descritta dall'elemento di fase non lineare [8].

Nelle tecniche di monitoraggio passivo però l'istante temporale di generazione dell'emissione acustica è sconosciuto. Si supponga quindi che l'evento di EA sia generato all'istante generico t_1 , la trasformata di Fourier dell'impulso di eccitazione è ora data da:

$$S_1(f, 0) = S_0(f, 0)e^{-j2\pi f t_1} \quad (8)$$

Dall'equazione (7) e dalla (8) è possibile scrivere la forma d'onda $s_1(t, D)$ acquisita ad una distanza percorsa D dal punto di generazione nel dominio delle frequenze come:

$$S_1(f, D) = S_0(f, 0)e^{-j2\pi f t_1} e^{-j2\pi w^{-1}(f)KD} \quad (9)$$

Si consideri ora che l'onda dispersiva generata $s(t)$ sia acquisita tramite due differenti sensori (sensore 1 e sensore 2) dopo aver viaggiato lungo due diverse distanze di propagazione, rispettivamente distanza D_1 e D_2 . Le WFT dei segnali acquisiti alle due diverse distanze $s(t, D_1)$ e $s(t, D_2)$ sono date da:

$$\mathbf{FW}_W\{s(t, D_1)\} = \sqrt{w(f)} S_0(w(f), 0) e^{-j2\pi w(f)t_1} e^{-j2\pi f K D_1} \quad (10)$$

$$\mathbf{FW}_W\{s(t, D_2)\} = \sqrt{w(f)} S_0(w(f), 0) e^{-j2\pi w(f)t_1} e^{-j2\pi f K D_2} \quad (11)$$

Le due espressioni sono equivalenti a meno del ritardo di fase nell'ultimo esponenziale che dipende linearmente dalla distanza. Ciò si traduce semplicemente in una traslazione sull'asse delle ascisse tra i segnali $s_w(t, D_1) = W_W\{s(t, D_1)\}$ e $s_w(t, D_2) = W_W\{s(t, D_2)\}$. In aggiunta si osserva che tali segnali hanno una modulazione di frequenza costante dovuta al termine $e^{-j2\pi w(f)t_1}$. Questa proprietà può essere sfruttata utilizzando tecniche di correlazione tra i segnali, in quanto nel dominio delle frequenze la cross-correlazione di due segnali a cui è stato applicato l'operatore warping è data da

$$\mathbf{FW}_W\{s(t, D_1)\} \cdot (\mathbf{FW}_W)^*\{s(t, D_2)\} = w(f) |S_0(w(f), 0)|^2 e^{-j2\pi f K (D_1 - D_2)} \quad (12)$$

In questo modo il valore dell'ascissa in cui l'involuppo della cross-correlazione dei due segnali $s_w(t, D_1)$ e $s_w(t, D_2)$ è massimo può essere associato immediatamente alla differenza delle distanze di propagazione dei due segnali dispersivi,

$$\Delta_{1,2} = D_1 - D_2 \quad (13)$$

Tramite questo stimatore è immediato calcolare la posizione della sorgente di EA in un sistema monodimensionale, come ad esempio lungo una barra di alluminio. Note infatti le coordinate dei suddetti sensori (x_i , $i = 1, 2$) può essere applicata la semplice relazione:

$$\Delta_{1,2} = |x_1 - x_p| - |x_2 - x_p| \quad (14)$$

che permette di stimare la posizione x_p della sorgente di EA lungo la guida d'onda ispezionata.

In figura 2, ad esempio, è possibile osservare due segnali acquisiti lungo la barra di alluminio a seguito della rottura di una mina (Hsu-Nielsen test). I sensori 1 e 2 distano rispettivamente 100 cm e 80 cm dalla sorgente. Nel pannello in basso di figura 2 è rappresentata la cross correlazione nel dominio *warped* dei due segnali, l'involuppo della stessa effettuato mediante la trasformata di Hilbert, la distanza reale $\Delta_{1,2}$, differenza delle distanze D_1 e D_2 di propagazione, e la sua stima tramite algoritmo proposto presa come il massimo della trasformata di Hilbert.

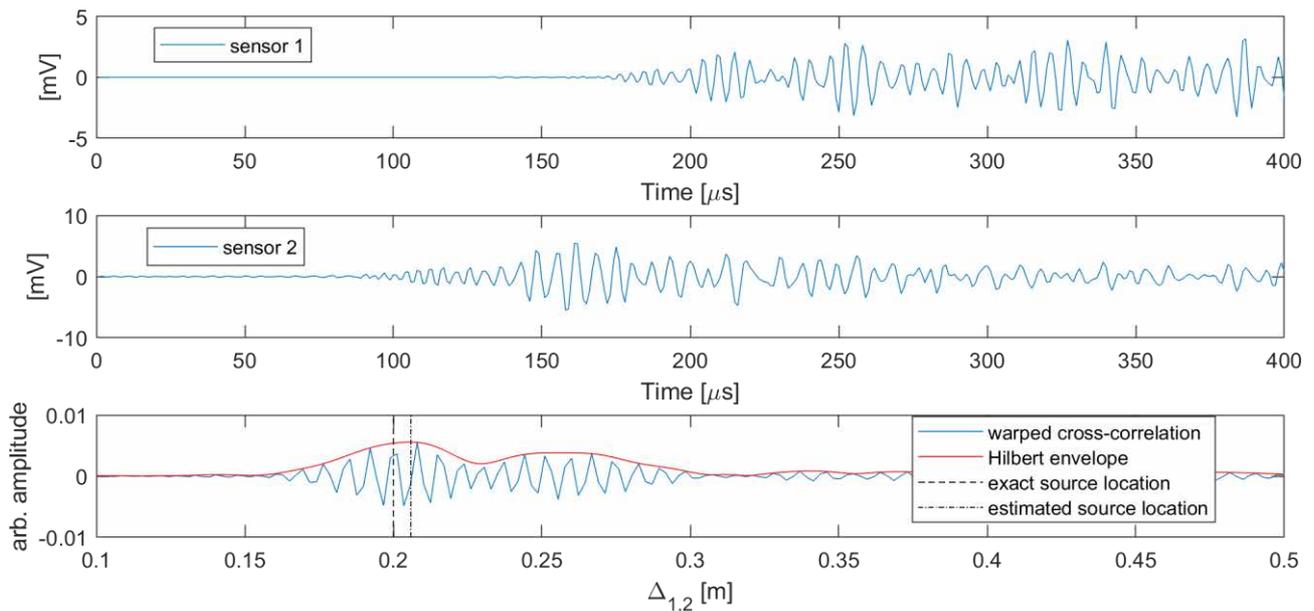


Figura 2. Segnali acquisiti ai sensori 1 e 2 nel dominio del tempo. Cross correlazione di tali segnali a cui è stato applicato l'operatore di warping e trasformata di Hilbert della cross-correlazione.

3. Validazione sperimentale

Al fine di validare le prestazioni dell'algoritmo proposto sono stati preparati quattro setup sperimentali per la generazione e l'acquisizione di EA lungo una barra di alluminio mediante, rispettivamente, la rottura di mine calibrate (*pencil break*) e l'apparecchiatura commerciale AMSY-5 della VallenSysteme. La rottura di una mina di matita calibrata è una tecnica largamente utilizzata per la generazione di EA e prende il nome di Hsu-Nielson Test. Il segnale emesso dalla rottura della mina è infatti paragonabile per intensità e caratteristiche ad eventi acustici generati da micro fratture all'interno del materiale. Inoltre, come dimostrato in [9], è possibile affermare entro un certo grado di approssimazione che l'Hsu-Nielson Test è ripetibile e riproducibile.

La barra di alluminio di dimensioni 4x0.2x200 cm è stata sensorizzata mediante due sensori commerciali anch'essi della VallenSysteme, i VS150-R, posti in prossimità delle zone di estremità della barra stessa.

I segnali acquisiti dallo strumento sono stati prima processati attraverso l'algoritmo di localizzazione dell'AMSY-5 e successivamente estratti per essere processati con l'algoritmo di warping proposto in questo lavoro.

3.1 Setup#1 & setup#2

Nel setup#1 i due sensori sono stati fissati alla barra di alluminio mediante nastro adesivo, senza l'utilizzo di gel di accoppiamento acustico, e posizionati in modo simmetrico a ± 98 cm dal centro del provino. Nel setup#2 i sensori sono stati fissati al provino nelle stesse posizioni del setup#1 tramite gel di accoppiamento al fine di valutare la robustezza dei due algoritmi di localizzazione in diverse condizioni di accoppiamento acustico. In figura 3 è possibile osservare la barra di alluminio e la sensorizzazione nei due casi descritti. Per sfruttare la simmetria di un provino come quello preso in esame sono stati effettuati dieci *pencil breaks* (PB) a dieci centimetri di distanza l'uno dall'altro lungo metà provino, partendo dal centro e spostandosi verso il bordo.

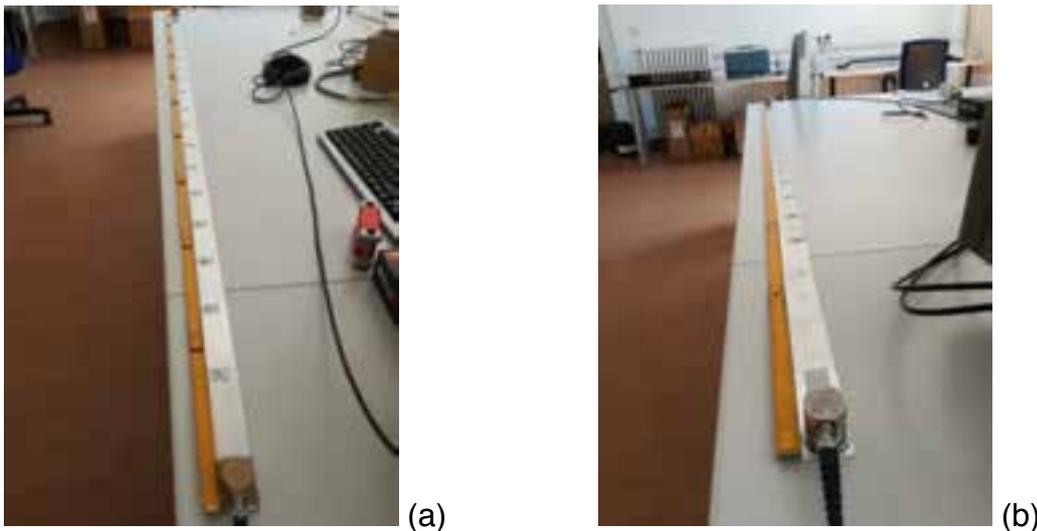


Figura 3. A sinistra (a) il provino di alluminio con i sensori fissati con nastro adesivo, a destra (b) il provino con i sensori fissati con il gel di accoppiamento acustico.

Questo tipo di stimolazione è stata ripetuta per entrambi i setup sperimentali, con e senza gel di accoppiamento. A fine test, il sistema di acquisizione restituisce un data set delle varie forme d'onda acquisite considerando un campionamento alla frequenza di 5MHz con finestre da 2048 campioni ciascuna. Tale data set è stato utilizzato per testare sia l'algoritmo di localizzazione integrato nello strumento sia quello presentato in questo lavoro. In particolare l'algoritmo di localizzazione dell'AMSY-5 scelto per la misura è di tipo *linear (rod)* che assume la propagazione di un'onda acustica non dispersiva lungo un dominio unidimensionale isotropo ed indisturbato (il cammino deve cioè essere privo di ostacoli). L'algoritmo ha bisogno della posizione dei sensori, del set di forme d'onda acquisite e della velocità v di propagazione dell'onda nel materiale ottenuta durante la fase di calibrazione del sistema. Date queste informazioni e misurata la differenza temporale Δt degli arrivi degli hit sui due sensori relativi allo stesso evento di EA, l'algoritmo *linear* calcola la differenza in distanza percorsa come:

$$X = \Delta t * v \quad (15)$$

La stima della posizione della sorgente acustica sarà quindi ottenuta come la distanza X dal punto medio tra i sensori. Per questo motivo più è precisa la calibrazione più sarà precisa la velocità v stimata e quindi migliore sarà la qualità della misura. Tramite questo approccio si ottiene una stima del posizionamento della sorgente di EA senza considerare fenomeni quali la dispersione del segnale lungo il percorso di propagazione e la multi-modalità delle onde guidate [10].

La tecnica di elaborazione del segnale per la localizzazione di EA basata su WFT, al contrario, utilizza un modello di propagazione a guida d'onda in cui vengono considerati i fenomeni nominati precedentemente, cioè la dispersione e la multi-modalità delle onde guidate, rendendo la localizzazione più raffinata e meno dipendente dal posizionamento dei sensori e dalla qualità del loro fissaggio.

In tabella 1 è possibile osservare i moduli degli errori assoluti in centimetri tra la sorgente reale e quella stimata nei due setup sperimentali relativi ai due algoritmi, il *linear* dell'AMSY-5 e quello basato su WFT.

Nel setup #1, cioè con i sensori fissati al provino con nastro adesivo, si può osservare che la condizione migliore per l'algoritmo *linear* è quella in cui la sorgente acustica è posizionata alla stessa distanza rispetto ai due sensori. In questa situazione infatti errori di localizzazione dovuti alla arbitrarietà della velocità v sono minimizzati. Per lo stesso motivo l'errore dell'AMSY-5 ha un andamento lineare, aumentando progressivamente con

l'aumentare della distanza del *pencil break* dal centro del provino. L'algoritmo di localizzazione basato su WFT in questo caso risulta essere più preciso in tutte le dieci misurazioni, con errori spesso minori del centimetro. Nel PB#10 si ha la maggiore riduzione dell'errore rispetto all'AMSY-5, con un miglioramento di 12.72 cm.

#PB [posizione reale [cm] ¹]	Errore AMSY-5 setup#1 [cm]	Errore WFT-algorithm setup#1 [cm]	Errore AMSY-5 setup#2 [cm]	Errore WFT-algorithm setup#2 [cm]
#1 [0]	2.26	0.11	0.43	0.23
#2 [10]	3.96	0.28	0.25	0.08
#3 [20]	5.00	2.02	1.32	0.28
#4 [30]	5.88	0.94	0.81	1.82
#5 [40]	6.75	0.20	0.14	0.78
#6 [50]	8.79	2.00	1.35	1.31
#7 [60]	8.05	1.09	1.46	1.61
#8 [70]	9.89	2.80	1.04	1.91
#9 [80]	12.07	2.19	2.00	1.30
#10 [90]	12.82	0.10	2.43	2.54

Tabella 1. Errore assoluto in cm dell'algoritmo *linear* presente nel sistema AMSY-5 e dell'algoritmo proposto basato su WFT nei setup#1 e setup#2.

Nel setup#2 in cui i sensori sono stati fissati al provino mediante gel di accoppiamento, i risultati della localizzazione dell'AMSY-5 sono molto diversi rispetto al caso precedente. In particolare il buon accoppiamento acustico tra sensori e provino facilita la fase di calibrazione restituendo una stima di v più precisa, e quindi ad una localizzazione migliore. Anche in questo caso si può osservare come l'errore sia maggiore a grandi distanze, sebbene in maniera meno evidente rispetto al setup#1. Gli errori di localizzazione dell'algoritmo basato su WFT rimangono invece in linea con il caso precedente, dimostrando di essere indipendenti dalla qualità dell'accoppiamento del sensore alla struttura.

3.2 Setup#3 & setup#4

Nel terzo setup sperimentale i due sensori, sensore 1 e sensore 2, sono stati fissati alla struttura con nastro adesivo, senza l'utilizzo di gel di accoppiamento, rispettivamente a 5 cm e 15 cm dai bordi del provino. Nel setup#4 i sensori sono stati posizionati in modo analogo al setup#3, ma fissati al provino mediante gel di accoppiamento. In figura 4 è possibile osservare la sensorizzazione della barra di alluminio nei due differenti casi. La scelta di posizionare i sensori in modo asimmetrico lontani dai bordi è stata effettuata per diversi motivi. Per prima cosa con questa configurazione vengono accentuati i fenomeni causati dai cammini riflessi come gli echi, essendo i sensori lontani dai bordi. Data inoltre l'asimmetria del posizionamento dei sensori, tali fenomeni non avranno lo stesso peso specifico nei segnali acquisiti dai due sensori. Lo scopo della misurazione è infatti quello di investigare le prestazioni dei due algoritmi anche in condizioni meno favorevoli. In particolare sono stati effettuati otto *pencil breaks* ogni 20 cm lungo tutto il provino partendo dal sensore 1 verso il sensore 2.

¹ I valori tra parentesi quadre nella prima colonna della tabella sono da intendersi in un sistema di riferimento in cui lo zero è al centro del provino.

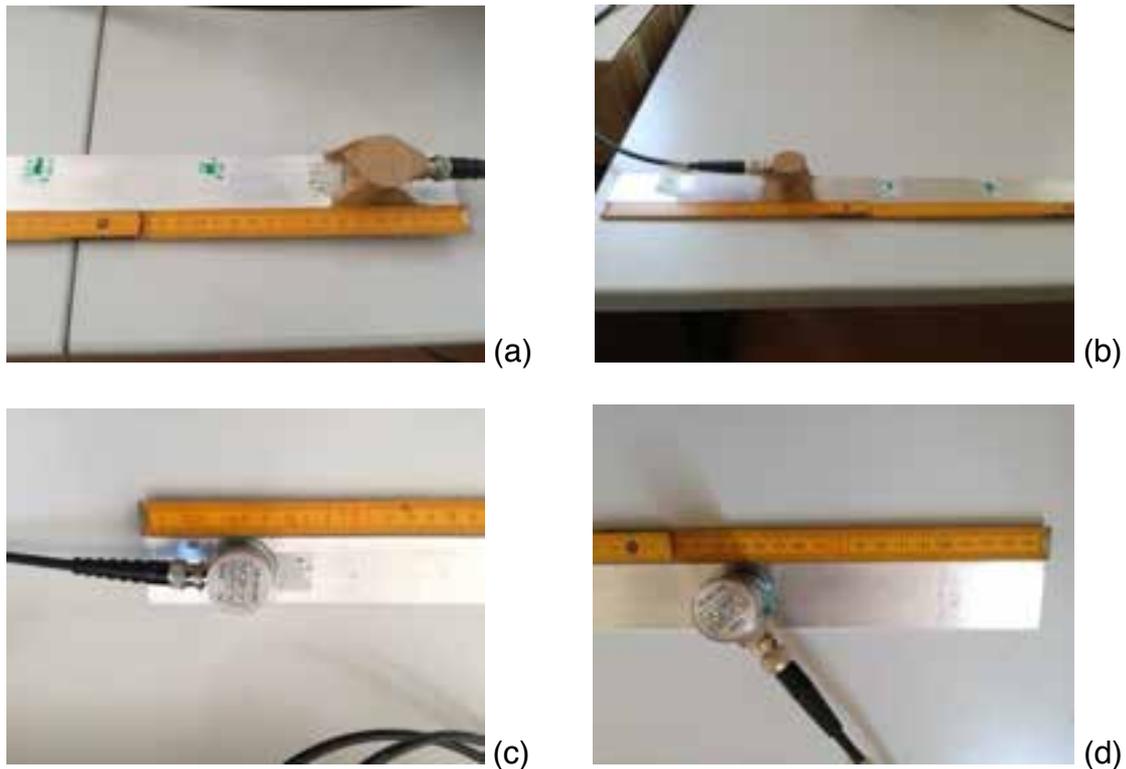


Figura 4. A sinistra (a,c) i sensori a 5 cm dal bordo fissati rispettivamente con nastro adesivo e gel, a destra (b,d) i sensori a 15 cm dal bordo fissati anche essi rispettivamente con nastro adesivo e gel.

Un ulteriore *pencil break* è stato effettuato al centro tra i due sensori. Queste stimolazioni sono state ripetute in modo analogo in entrambi i setup descritti. In tabella 2 è possibile osservare le coordinate dei punti in cui è stata generata la EA (Hsu-Nielsen test) e gli errori di localizzazione dei due algoritmi nei due setup considerati.

#PB [posizione reale [cm] ²]	Errore AMSY-5 setup#3 [cm]	Errore WFT-algorithm setup#3 [cm]	Errore AMSY-5 setup#4 [cm]	Errore WFT-algorithm setup#4 [cm]
#1 [20]	6.75	4.52	6.77	0.01
#2 [40]	8.08	2.7	5.65	4.15
#3 [60]	1.96	0.31	3.83	0.46
#4 [80]	6.73	0.59	3.26	0.46
#5 [90]	1.04	0.69	1.89	1.38
#6 [100]	5.55	1.17	0.22	2.53
#7 [120]	15.18	1.86	2.17	2.3
#8 [140]	15.41	4.99	3.64	4.36
#9 [160]	32.73	0.98	4.88	0.47

Tabella 2. Errore assoluto in cm dell'algoritmo dell'AMSY-5 e dell'algoritmo basato su WFT nel setup#3 e setup#4.

²I valori tra parentesi quadre nella prima colonna della tabella sono da intendersi in un sistema di riferimento in cui lo zero è nel punto in cui è posizionato il sensore 1.

Nel setup#3 si può osservare che l'errore di localizzazione dell'AMSY-5 cresce mano a mano che il PB si avvicina al sensore 2, cioè quello posto a 15 cm dal bordo, dimostrando i limiti dell'algoritmo *linear* (Vallen) nella gestione delle riflessioni e degli echi. Con il gel di accoppiamento lo strumento migliora in modo considerevole la misura, risultando meno sensibile a tali fenomeni.

L'algoritmo di localizzazione basato su WFT invece riesce in entrambi i setup a mantenere l'errore sempre al di sotto dei 5 cm, dimostrando di non risentire del tipo di fissaggio dei sensori e di essere più performante in condizioni non ideali.

Questo è ancora più evidente se si osservano le tabelle 3 e 4, in cui sono riassunti i risultati fin qui ottenuti. La tabella 3 confronta l'errore medio dei due algoritmi nel setup#1 e nel setup#2. Nell'ultima riga è evidenziata la variazione in percentuale dell'errore di ciascun algoritmo rispetto ai setup sperimentali. Analogamente la tabella 4 confronta l'errore medio dei due algoritmi nel setup#3 e nel setup#4 e le relative variazioni in percentuale.

	Errore medio AMSY-5	Errore medio WFT
Setup#1 (nastro adesivo)	7.55 cm	1.17 cm
Setup#2 (coupling gel)	1.12 cm	1.19 cm
Variazione errore	-85%	+1.7%

Tabella 3. Errori assoluti medi degli algoritmi nel setup#1 e setup#2, con variazione dell'errore tra i due setup sperimentali

	Errore medio AMSY-5	Errore medio WFT
Setup#3 (nastro adesivo)	10.38 cm	1.98 cm
Setup#4 (coupling gel)	3.59 cm	1.79 cm
Variazione errore	-65%	-9.6%

Tabella 4. Errori assoluti medi degli algoritmi nel setup#3 e setup#4, con variazione dell'errore tra i due setup sperimentali

L'errore di localizzazione dell'algoritmo dell'AMSY-5 è abbattuto dell'85% passando dal setup#1 al setup#2, in cui è stato utilizzato il gel di accoppiamento. Analogamente si ha una diminuzione dell'errore del 65% passando dal setup#3 al setup#4. Al contrario l'algoritmo basato su WFT risulta essere molto più robusto sotto questi aspetti, variando solo dell'1.7% e del 9.6%. Questo risultato può avere una notevole importanza applicativa in grandi sistemi di monitoraggio con un gran numero di sensori. In tali situazioni infatti non è sempre facile verificare il perfetto accoppiamento dei singoli sensori alla struttura e l'aver un algoritmo di localizzazione il più possibile indipendente da questo fattore può quindi risultare determinante.

4. Conclusioni

In questo elaborato è stato presentato un algoritmo per la localizzazione di sorgenti di EA in guide d'onda monodimensionali. La metodologia proposta si differenzia dalle comuni tecniche presenti in letteratura in quanto sfrutta la natura dispersiva delle onde guidate per effettuare una compensazione della dispersione sui segnali acquisiti da sensori piezoelettrici passivi attraverso la Warped Frequency Transform. In particolare, i segnali compensati risultano stazionari su un nuovo dominio e semplicemente traslati gli uni rispetto agli altri sull'asse delle ascisse. Applicando la cross-correlazione di queste forme d'onda è possibile estrarre la differenza delle distanze di propagazione $\Delta_{1,2}$ dell'evento acustico ai due sensori, attraverso la quale è possibile localizzare la sorgente di EA.

L'algoritmo è stato successivamente testato sperimentalmente e confrontato con lo stimatore linear del sistema commerciale l'AMSY-5 della VallenSysteme. I risultati ottenuti mostrano come l'approccio proposto, computazionalmente non oneroso (paragonabile a quello di una FFT) seppure raffinato, consenta spesso di stimare la posizione delle EA con un'accuratezza migliore rispetto all'algoritmo linear del sistema Vallen. Considerare la natura dispersiva delle EA in guide d'onda, inoltre, così come pure la loro multi-modalità, consente di sviluppare una metodologia di localizzazione più robusta, che a sua volta consente ottimi gradi di precisione anche variando la posizione dei sensori lungo il provino e la qualità del loro accoppiamento acustico.

5. Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato da INAIL nell'ambito del bando BRIC/2016 ID=15, progetto SMARTBENCH.

6. Bibliografia

- [1] Gholizadeh S., Leman Z., Baharudin B.T.H.T. A review of the application of acoustic emission technique in engineering. *Struct. Engineer. and Mech.* 2015; 54: 1075-1095.
- [2] Salinas V., Vargas Y., Ruzzante J., Gaete L. Localization Algorithm for Acoustic Emission. *Phys. Procedia.* 2010; 3: 863-871.
- [3] Sengupta S., Datta A.K., Topdar P. Structural damage localisation by acoustic emission technique: A state of art review. *Latin Amer. Jour. of Solids and Struc.* 2015; 12: 1565-1582.
- [4] De Marchi L., Marzani A., Speciale N., Viola E. A passive monitoring technique based on dispersion compensation to locate impacts in plate-like structures. *Smart Mater.Struct.* 2011; 20: 035021(9pp).
- [5] De Marchi L., Marzani A., Caporale S., Speciale N. Ultrasonic guided-waves characterization with warped frequency transform. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2009; 56: 2232-2240.
- [6] Caporale S., De Marchi L., Speciale N. Fast Computation to Frequency Warping Transform. *IEEE Trans. Signal Process.* 2010; 58: 1110-1121.
- [7] Bartoli I., Marzani A., Lanza di Scalea F., Viola E. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section. *J. of Sound and Vib.* 2006; 295: 685-707.
- [8] Perelli A., De Marchi L., Marzani A., Speciale N. Acoustic emission localization in plates with dispersion and reverberations using sparse PZT sensors in passive mode. *Smart Mater.Struct.* 2012; 21: 025010(10pp).
- [9] Boczar T., Lorenc M. The repeatability and reproducibility of calibrating signals generated by Hsu-Nielson method. *J. Phys. IV France.* 2005; 129: 97-103.
- [10] Thenikl T., Altmann D., Vallen H. Quantifying location errors. Atti della Conferenza su *Acousting Emission Testing. Praga, Settembre 07-09, 2016.*