

IMPLEMENTAZIONE DI TECNICHE DI TERMOGRAFIA ATTIVA IR-NDT SU COMPOSITI GRP MEDIANTE LA DEPOSIZIONE DI IMPULSI TERMICI DI LUNGA DURATA

G. Pitarresi^a, A. Licari^a

^a Università degli Studi di Palermo - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica e Meccanica (DICGIM), Viale delle Scienze (Ed. 8), 90128 Palermo - giuseppe.pitarresi@unipa.it

Sommario

Nel presente lavoro viene analizzata l'implementazione di tecniche attive di termografia ad infrarossi per analisi NDT su pannelli in composito. In particolare si propone l'uso di lampade alogene come sorgente di calore esterna, le quali richiedono tempi di accensione dell'ordine di diversi secondi al fine di depositare efficaci quantità di calore. Si discutono quindi le problematiche connesse all'implementazione di tecniche di *Transient Thermography* e di *Lock-In Thermography* in presenza di tempi lunghi di deposizione di calore. Viene implementata una tecnica di modulazione della deposizione di calore mediante treni di onde quadre di lunga durata (PMLT - Pulse Modulated Lock-In Thermography). Viene in particolare analizzata l'influenza del periodo dell'onda quadra, e del rapporto di acceso-spento del treno di onde quadre, attraverso l'analisi dell'andamento del contrasto di fase al variare della frequenza di correlazione (*lock-in frequency*).

Abstract

The present work describes some results based on the implementation of active IR Thermography techniques for the NDT of FRP composite panels. The use of halogen lamps is in particular implemented as main external heat source, which requires several seconds of switch-on time in order to deliver meaningful and effective heat quantities. The influence of such long heat deposition intervals is investigated on the possibility to implement *Transient Thermography* and *Lock-In Thermography* techniques. A technique is in particular presented which modulates the heat deposition signal into trains of square waves (PMLT - Pulse Modulated Lock-In Thermography). The influence of the period of the train waves and the on-off duration ratio is investigated by deriving curves of the phase contrast versus the lock-in correlation frequency.

Parole chiave: NDT, Infrared Thermography, Long Square Heating, Lock-In Correlation, Train Waves, GRP Laminates.

1. INTRODUZIONE

Le tecniche di Termografia ad Infrarossi per NDT (IRNDT) in genere utilizzano fonti di calore esterne (Termografia Attiva [1-3]), ed analizzano la risposta termica del componente nei transitori di raffreddamento (TT - Transient Thermography, quali ad esempio la Pulsed Thermography [1,4] e la Pulsed Phase Thermography [2]) o in regime stazionario, durante la deposizione di calore (es. LIT - Lock-In Thermography [5]). Come sorgenti di calore si utilizzano tradizionalmente lampade flash per le tecniche TT, capaci di depositare in poche frazioni di secondo elevate quantità di calore, e lampade a bassa potenza, con emissione modulata secondo un segnale sinusoidale, per tecniche di LIT.

Un requisito essenziale in diverse tecniche quantitative di Transient Thermography è che il calore depositato all'istante di spegnimento della lampada non abbia generato un contrasto termico tra zone difettate e sane. In altri termini l'onda termica depositata sulla superficie del componente genera una trasmissione di calore all'interno i cui effetti in termini di "defect signature" si producono quando viene raggiunto il sito all'interno del materiale dove è presente il difetto, a causa della sua influenza nel perturbare la successiva trasmissione del calore. Diversi studi hanno messo in evidenza come sia essenziale monitorare la temperatura anche negli istanti precedenti al raggiungimento del sito del difetto da parte del fronte di calore. Sia le tecniche PT che PPT sono particolarmente sensibili a tal riguardo. Per le tecniche PT infatti la velocità di raffreddamento in una zona della superficie è strettamente legata alla quantità di calore ricevuta da quella zona. Una deposizione di calore non uniforme è in genere la condizione usuale quando si usano lampade come fonti esterne di calore. Per cui la definizione di criteri quantitativi che correlino le caratteristiche del difetto con i parametri di contrasto termico è molto influenzata sia dalla scelta della zona sana presa a riferimento, che dal possibile pre-riscaldamento che una zona difettata può originare già in fase di deposizione del calore. In [7] ad esempio è mostrato come la presenza di un contrasto termico all'inizio del transitorio di raffreddamento rende le caratteristiche del contrasto termico (valore di massimo e tempo di osservazione del massimo contrasto) particolarmente sensibili alla scelta della temperatura di riferimento (relativa al materiale non difettato). Tecniche che fanno a meno della individuazione di zone sane di riferimento, quali la Thermographic Signal Reconstruction (TSR) [8] o la Differential Absolute Contrast (DAC) [9], entrambe basate su una ricostruzione sintetica dei parametri di trasmissione del calore del materiale integro, hanno come requisito essenziale l'assenza di un pre-riscaldamento della zona difettata durante la deposizione dell'impulso termico. Un recente criterio di scelta di una idonea zona sana è stato proposto sotto il nome di Source Distribution Image (SDI) [4], ma anche tale tecnica ha come requisito essenziale che la zona difettata non si sia ancora palesata al termine della deposizione di calore. Per quanto riguarda la PPT, anche in questo caso la correlazione tra curva di contrasto di fase e caratteristiche del difetto non è più possibile quando si determina un precoce contrasto termico nella zona difettata durante la deposizione di calore. L'impiego di lampade alogene a bassa potenza comporta la necessità di impiego di lunghi tempi di accensione (Long Square Heating [10]), al fine di depositare quantità di calore sufficienti a raggiungere difetti a profondità significative. Per le ragioni esposte in precedenza, nelle tecniche di tipo TT è consuetudine l'uso di costose lampade flash, e di un accurato controllo dei parametri di intensità e durata dell'impulso termico generato.

Per quanto riguarda tecniche in regime stazionario, a volte identificate come tecniche di Modulated Thermography, la principale differenza consiste nel monitorare la risposta termica del componente a regime, durante la deposizione sul componente di onde termiche di ampiezza modulata ciclicamente. In questo caso è possibile usare comuni lampade alogene per la deposizione di calore su intervalli di tempo lunghi. La tradizionale implementazione della tecnica LIT prevede la modulazione sinusoidale della potenza della lampada, ed un algoritmo di correlazione lock-in particolarmente semplice è utilizzato per la determinazione dello sfasamento tra segnale inviato e risposta del materiale [5]. La modulazione del segnale secondo una onda sinusoidale costituisce tuttavia una complicazione ed una limitazione al contempo. La complicazione consiste nella necessità di disporre di dispositivi di modulazione e controllo della potenza di alimentazione della lampada. La limitazione risiede nel fatto che la frequenza di modulazione del calore inviato al componente potrebbe essere non ottimale per difetti di data profondità e materiali con determinate proprietà termiche. In genere non è semplice determinare in via preventiva la frequenza ottimale, né spesso è possibile avere un solo valore di tale frequenza per i vari tipi di difetto presenti. Quindi è necessario eseguire diverse prove al variare della frequenza di modulazione della sorgente di calore, rendendo l'approccio con la LIT alquanto oneroso.

Nel presente lavoro si propone in particolare un set-up sperimentale a basso costo per l'implementazione di una tecnica di Modulated Thermography recentemente proposta [11]. La differenza principale con la LIT consiste nell'inviare sul componente una serie di impulsi termici di lunga durata, opportunamente modulati. In particolare la serie di lunghi impulsi può essere considerata come un treno di onde quadre di bassa intensità. L'approccio proposto presenta quindi due vantaggi rispetto alle tecniche classiche precedentemente richiamate:

- le basse frequenze di modulazione ed i tempi di deposizione di calore relativamente lunghi consentono l'uso di comuni e poco potenti lampade alogene dai costi molto contenuti;
- lo spettro di frequenze dell'onda quadra ha un contenuto armonico esteso ad un ampio range di frequenze. Utilizzando un opportuno algoritmo di lock-in selettivo, capace di filtrare e correlare il segnale misurato per diversi valori di frequenza, si ottengono diverse mappe di fase, ognuna riferita ad un diverso valore di frequenza. Tutto ciò con un unico esperimento, contrariamente al caso della classica LIT.

Il lavoro presenta anche uno studio dell'influenza del rapporto di tempo di acceso-spento del periodo di onda quadra del treno d'onde, noto come *duty cycle*. Al variare di tale parametro infatti è possibile modificare il valore delle frequenze fondamentali sulle quali è concentrata la potenza termica depositata. Un algoritmo di Lock-In è implementato in ambiente Matlab® ed utilizzato per ricavare la mappa dell'angolo di fase tra zona sana e zona difettata al variare della frequenza di correlazione.

Il lavoro quindi descrive l'analisi sperimentale condotta su un pannello in GRP di grosso spessore, contenente delaminazioni simulate artificialmente e poste a diversa profondità. Treni di onde quadre con diverso *duty cycle* sono stati riprodotti e l'analisi condotta ha permesso di ricavare curve del contrasto di fase in funzione della frequenza di lock-in, dalle quali si ricavano diverse informazioni interessanti sulle potenzialità della tecnica proposta.

2. DESCRIZIONE DELL'ANALISI TERMOGRAFICA IMPLEMENTATA: PULSE-MODULATED LOCK-IN THERMOGRAPHY (PMLT)

L'analisi termografica implementata in questo lavoro segue il tipico schema della Lock-In Thermography, ma anziché inviare sul componente un'onda termica modulate secondo una sinusoidale, vengono generati treni di onde quadre con andamento periodico. Da qui il nome proposto per tale approccio di Pulse Modulated Lock-In Thermography, nel seguito riferito PMLT [11].

Le due caratteristiche principali dell'approccio proposto riguardano la capacità di inviare in contemporanea sul componente onde di calore a diversa frequenza (corrispondenti al contenuto armonico del treno di onde), e l'implementazione di un algoritmo di lock-in, applicato in fase di post-processamento dei dati misurati, ed in grado di ricavare in modo selettivo lo sfasamento tra le armoniche del segnale inviato e misurato per un ampio range di frequenze. I sottoparagrafi seguenti descriveranno in modo più approfondito questi due aspetti fondamentali della tecnica.

2.1. Influenza del *duty cycle* e di altri parametri operativi per la PMLT

La modulazione del calore generato dalle lampade alogene mediante un treno di onde quadre consente di depositare sul componente una serie di onde sinusoidali di diversa ampiezza e frequenza. Al fine di evidenziare le caratteristiche del contenuto in frequenza del calore che raggiunge il componente, è utile impiegare la Trasformata Discreta di Fourier (DFT) su un treno d'onde quadre con caratteristiche opportunamente normalizzate al fine di generalizzare i risultati dell'analisi. In particolare è utile ricavare lo spettro di potenza di un treno d'onde, al fine di capire come si distribuisce la potenza sullo spettro armonico. Tale analisi è di seguito condotta mediante l'ausilio della funzione *fft* di Matlab®. La tabella 1 riporta la definizione dei principali parametri di modulazione del treno d'onde. Tra questi si evidenzia in particolare la definizione del *duty cycle*, *dc*, definita come il rapporto (a volte espresso in percentuale) tra la durata di segnale non nullo e la durata del periodo in un treno d'onde. Quindi se *dc*=50% ciò significa che la durata di segnale nullo è uguale alla durata di segnale non nullo per un numero intero di periodi di un treno d'onde.

In figura 1 è analizzato il contenuto armonico di un numero intero di periodi, *np*, all'interno della finestra temporale *T*, sia per un segnale puramente sinusoidale, che per treni di onde quadre. Rispetto all'onda sinusoidale, dove gran parte della potenza termica è concentrata su una unica armonica, le onde quadre hanno diversi picchi di potenza. Tali picchi si trovano a frequenze più basse della frequenza della sinusoidale se le onde quadre hanno una frequenza portante minore. Al diminuire della frequenza portante del treno d'onde quadre aumenta il numero di picchi di potenza ma diminuisce la potenza (ovvero l'ampiezza delle armoniche secondarie). Quindi, se la frequenza portante del treno d'onde quadre è più bassa della frequenza della sinusoidale di riferimento, si hanno

diverse armoniche a bassa frequenza depositate sul componente. In generale materiali polimerici richiedono modulazioni di calore a bassissima frequenza, ed inoltre la generazione di onde quadre molto lente non richiede complicati sistemi di controllo. Ad esempio di ciò, in questo lavoro la modulazione del treno d'onde si è ottenuta schermando periodicamente e manualmente la lampada alogena impiegata.

Tabella 1: Definizione dei principali parametri d'influenza nella Trasformata Discreta di Fourier di un treno d'onde.

<i>Parametri</i>		<i>Relazioni</i>	<i>simulati</i>	<i>sperimentali</i>
$f(t)$	Segnale generato nel dominio del tempo	/		
T	Finestra di osservazione e campionamento	$T=N \cdot T_s$	1, 2	300 s
np	Numero di onde quadre comprese in T	/	1, 2,4,5	5
I	Ampiezza dell'onda quadra	/	1	
N	Numero di campioni	/	1000	240
i	Indice di campionamento	$i=1, \dots, N+1$		
T_s	Intervallo di campionamento	$T_s=T/N$		1.25 s
t	Variabile tempo	$(i-1) \cdot T_s$		
f_s	Frequenza di campionamento	$1/T_s$		0.8 Hz
Δf	Frequenza fondamentale	$1/T=1/(NT_s)$		0.00333 Hz
f_c	Frequenza portante	np/T		0.0167 Hz
f_N	Frequenza di Nyquist	$1/(2T_s)$		0.4 Hz
w_p	Pulsazione fondamentale	$np \cdot (2\pi/T) = 2\pi \cdot f_c$		$w_I = 0.105 \text{ rad/s}$
k	Indice delle frequenze portanti secondarie	/		
w_k	Pulsazione delle portanti secondary per duty 50%	$w_{k-1} + 2 \cdot w_p$		
F	segnale di riferimento in fase	$\text{Sin}(w \cdot t)$		
G	segnale di riferimento in quadratura	$\text{Cos}(w \cdot t)$		

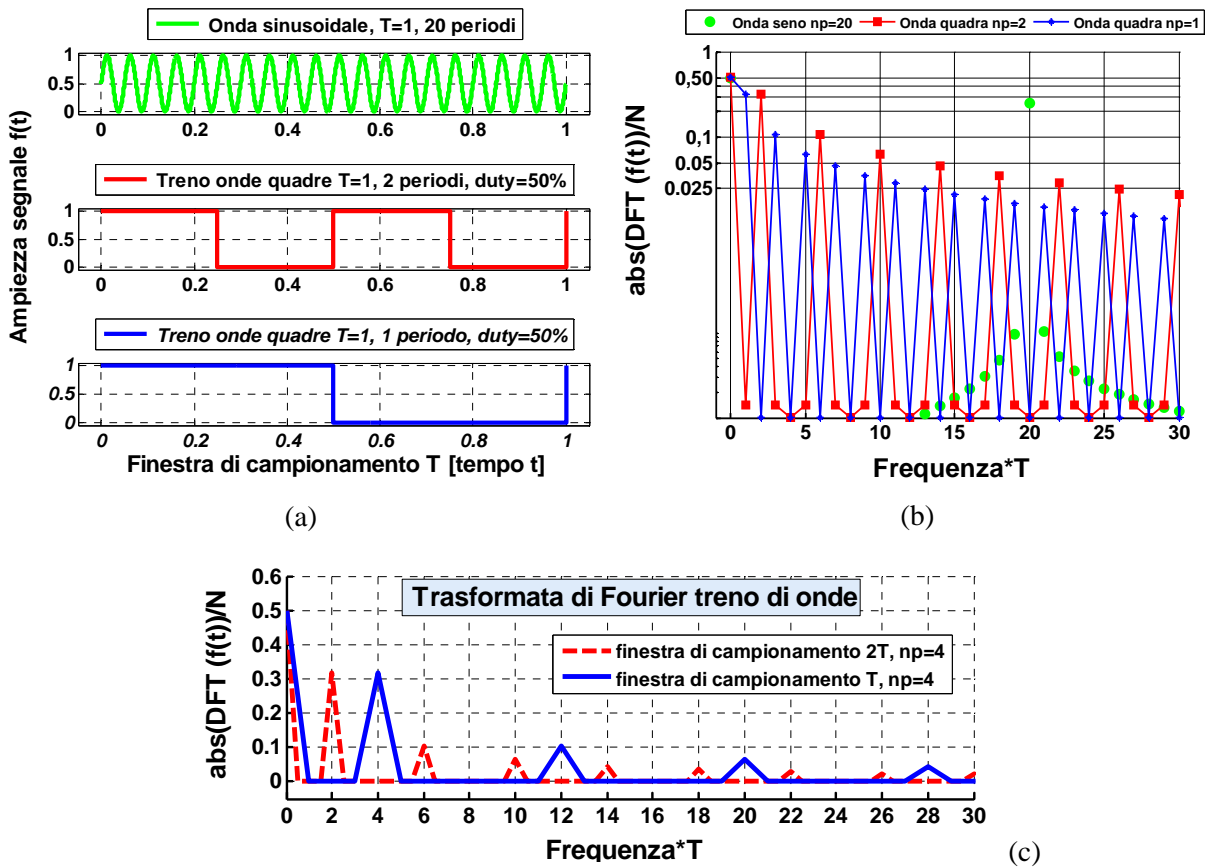


Figura 1: Analisi del contenuto in frequenza mediante Trasformata Discreta di Fourier DFT di treni d'onda quadra al variare di alcuni parametri di riferimento.

In fig. 1c si mostra inoltre che se un treno d'onde con uguale numero di periodi np ed ampiezza, viene depositato su tempi più lunghi (es. $2T$ anziché T), le frequenze delle armoniche si abbassano, ovvero più lungo è il periodo dell'onda quadra e più il contenuto in frequenza si concentra sulla parte bassa dello spettro.

In figura 2 è riportato lo spettro di Fourier relativo all'applicazione della trasformata discreta di Fourier su treni di onde quadre con ciclo di duty rispettivamente del 25%, 50% e 75%. In generale si osserva che cicli di duty diversi da 50% introducono ulteriori frequenze portanti nella parte bassa dello spettro, a scapito della potenza. Si osserva che le frequenze portanti di cicli di duty di 25% e 75% hanno la stessa potenza. Per cui il maggior calore depositato con il ciclo di duty 75% è tutto concentrato nel valor medio del segnale (a frequenza nulla, ovvero sull'origine dello spettro).

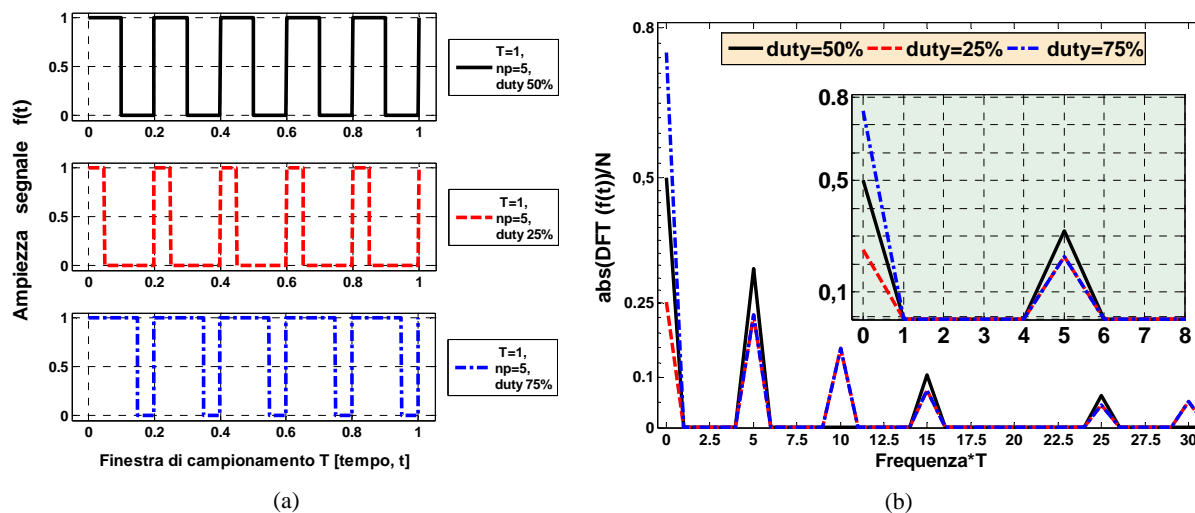


Figura 2: Analisi del contenuto in frequenza tramite DFT di treni d'onda aventi diverso duty cycle.

2.2. Implementazione dell'algoritmo di Lock-In

Al fine di poter determinare lo sfasamento tra l'armonica del segnale misurato ed il segnale modulato della sorgente termica, la LIT tradizionalmente utilizza un algoritmo molto semplice, introdotto da Busse et al [5], noto anche come *Four-point correlation method* (FPCM) [12]. Tale metodo tuttavia è poco efficace nell'eseguire la correlazione lock-in tra una frequenza di riferimento ed un segnale con contenuto armonico più complesso quale un treno d'onde, ma anche un segnale corrotto da elevati livelli di rumore. Recentemente diversi algoritmi di lock-in sono stati proposti, basati sul principio degli amplificatori Lock-In [12-15] (già utilizzati per il filtraggio dei dati nella Thermoelastic Stress Analysis [14]), e sull'analisi e filtraggio nel campo delle frequenze mediante la trasformata di Fourier [12,13]. In particolare in questo lavoro viene proposto un algoritmo di digital lock-in correlation o anche lock-in a banda stretta. L'algoritmo è implementato in Matlab® e utilizzato in fase di post-processamento (*off line*) del segnale termico misurato in un dato intervallo di tempo. In figura 3 è riportato uno schema del processo di correlazione lock-in cui è sottoposto il segnale termografico.

Si osserva che la correlazione del segnale misurato è effettuata due volte, una volta con una funzione seno e l'altra con la funzione coseno. Le funzioni di correlazione, o segnali di riferimento F e G , hanno un ben preciso valore di frequenza, detta frequenza di lock-in. Un filtro passa basso basato sull'analisi dello spettro di Fourier mediante la DFT, è applicato sul segnale mixato con i due segnali di riferimento. Si verifica quindi che il filtraggio del segnale $F*S$ restituisce la componente in fase dell'armonica del segnale S alla frequenza di correlazione, ed il segnale di riferimento F , esprimibile come $X=A\cos\phi$. A sua volta il filtraggio di $G*S$ da la componente in quadratura tra l'armonica di S alla frequenza di correlazione ed il segnale di riferimento F , esprimibile come $Y=A\sin\phi$. Per cui ricavati X ed Y si ricava lo sfasamento $\phi=\text{atan}(Y/X)$. Un vantaggio offerto dallo schema di correlazione lock-in illustrato è quello di poter effettuare la correlazione per diversi valori di frequenza. Infatti basta modificare il valore di frequenza del segnale di riferimento. Ad ogni valore

scelto di frequenza di correlazione l'algoritmo quindi restituisce lo sfasamento tra segnale F e l'armonica del segnale misurato S relativa alla specifica frequenza di correlazione. In tal modo l'algoritmo, eseguendo la correlazione per ogni punto del termogramma, in modo automatico, restituisce le mappe di fase associate ai termogrammi campionati, iterativamente per diversi valori di frequenza.

Un ulteriore vantaggio dell'algoritmo di lock-in proposto rispetto al tradizionale FPCM, è l'intrinseca capacità di filtrare disturbi derivati da rumore ad alta frequenza presenti nel segnale misurato. Ciò grazie ai filtri passa basso dell'algoritmo di correlazioni lock-in, in grado di agire selettivamente solo su una data armonica del segnale.

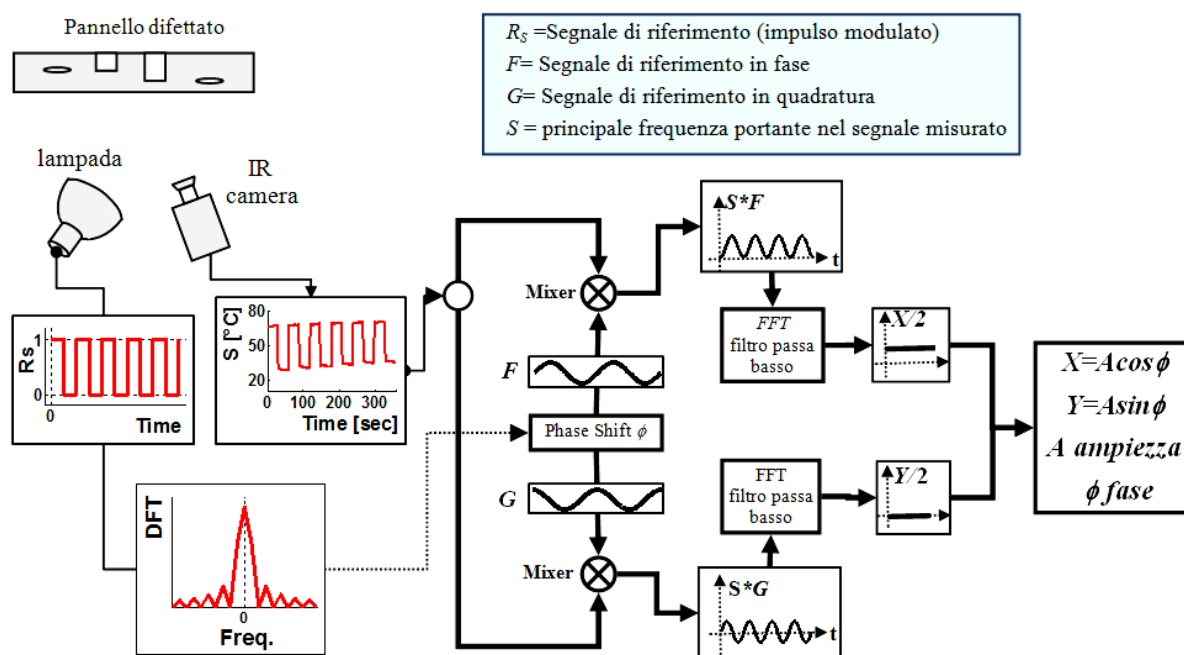


Figura 3: Schema di lock-in correlation implementato per il post-processamento dei termogrammi.

3. INDAGINE SPERIMENTALE

Una implementazione sperimentale della tecnica PMLT presentata in precedenza è commentata nei prossimi paragrafi. Si è in particolare utilizzata una attrezzatura dai costi molto contenuti, sia relativamente alle sorgenti di calore che alle prestazioni della termocamera ad infrarossi impiegata. Il provino analizzato è un pannello in GRP con caratteristiche, relativamente alla manifattura, ai materiali ed alle proprietà finali, tipiche di laminati compositi per applicazioni strutturali in campo nautico [7].

3.1. Descrizione dell'attrezzatura sperimentale e del provino analizzato

Il provino analizzato è un pannello in vetroresina (GRP) con lay-up di tipo *cross-ply* simmetrico: $[(0,90)_7]_s$ composto da 28 lamine, e di spessore complessivo 12 mm. Il pannello è stato realizzato mediante laminazione a mano (*hand lay-up*) utilizzando una resina poliestere curate a temperatura ambiente. La percentuale in volume di fibra misurata sul manufatto finale è di circa il 35 %. Una finitura superficiale opaca è stata ottenuta laminando il pannello sopra un foglio di *peel-ply* rimosso dopo la cura. I difetti consistono in delaminazioni interlaminari artificiali simulate inserendo in fase di laminazione, a diverse profondità, inserti di forma rettangolare ripiegati in due, di fogli sottili di Teflon (difetti D1-4 in fig. 4a). Il foglio di teflon utilizzato ha spessore 0.04 mm e l'inserto è ripiegato in due per creare una intercapedine di vuoto. Un secondo tipo di difetto introdotto consiste in fori ciechi con fondo piano (difetti D5-7 in fig. 4a, vedi anche tabella 2).

La termocamera ad infrarossi impiegata per acquisire il segnale termografico a campo intero è la Varioscan 3022 della Jenoptik GmbH, equipaggiata con singolo sensore MCT, raffreddato termoelettricamente, avente una risoluzione NETD pari a 0.12 K. Il sensore scansiona la superficie acquisendo 360×240 pixels, in modalità raster e con *frame rate* di circa 1 Hz [14]. I termogrammi sono stati esportati in ambiente matlab come file ascii attraverso il comando *export sequence* del software di post-processamento IRBIS® 3 Plus . Il setup termografico realizzato è del tipo a riflessione (sorgente termica e termocamera poste sullo stesso lato rispetto al provino, fig. 4b). La sorgente di calore consiste in una lampada alogena a basso costo, di potenza pari a 1500 Watt.

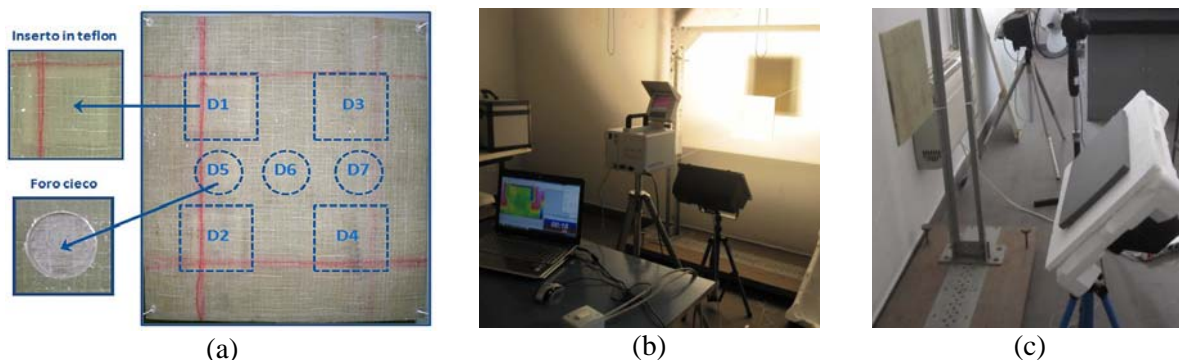


Figura 4: a) figura del pannello analizzato e posizione dei difetti; b) foto durante prova con lampada accesa; c) foto del pannello e della lampada schermata.

Tabella 2: caratteristiche dei difetti artificiali introdotti nel pannello in GRP.

	Inserto di teflon "folded"		"back hole"
dimensioni	60x50 mm ²		Ø 30 mm
difetto	profondità	difetto	profondità
D1 –D2	¼ dello spessore (3mm)	D5	¼ spessore (3mm)
D3 –D4	½ dello spessore (6 mm)	D6	½ spessore (6mm)
		D7	¾ spessore (9mm)

3.2. Descrizione delle prove sperimentali eseguite

Si sono eseguite tre prove, con la lampada alogena posta frontalmente al pannello ad una distanza di circa 1.25 m (vedi fig. 4b,c). L'accensione e spegnimento è comandato manualmente. Un pannello schermante è posto di fronte alla lampada nella fase immediatamente successiva ad ogni spegnimento per evitare che il calore residuo della lampada continui a depositarsi sul pannello (vedi fig. 4c). Ogni prova è durata 5 minuti, con la deposizione di cinque periodi di durata 60 sec. Il duty cycle delle tre prove è rispettivamente del 25%, 50% e 75%. In figura 5 si riportano gli andamenti della temperatura rispetto al tempo, misurata su un punto del pannello, per le tre prove.

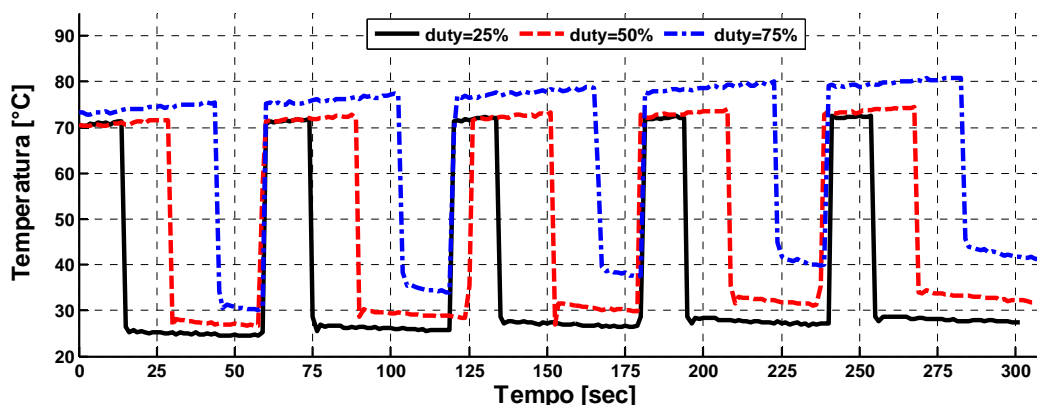


Figura 5: Misura della temperatura rispetto al tempo su un punto del pannello durante le tre prove eseguite.

3.3. Analisi dei risultati

Per data frequenza di lock-in, e quindi stabilita la frequenza dei segnali di correlazione F e G (vedi schema di fig. 3), si ricava lo sfasamento ϕ per ogni punto acquisito e quindi si ottiene la relativa mappa di fase. Con riferimento alle prove implementate in questo lavoro si è trovato che il miglior contrasto tra zona sana e zone in corrispondenza dei difetti si ottiene con valori di frequenza di lock-in molto bassi, più bassi della frequenza portante dei treni di onde quadre modulati. In particolare le mappe di fase per le tre prove a diverso duty e per una frequenza di lock-in pari a circa 33 mHz sono riportate in figura 6.

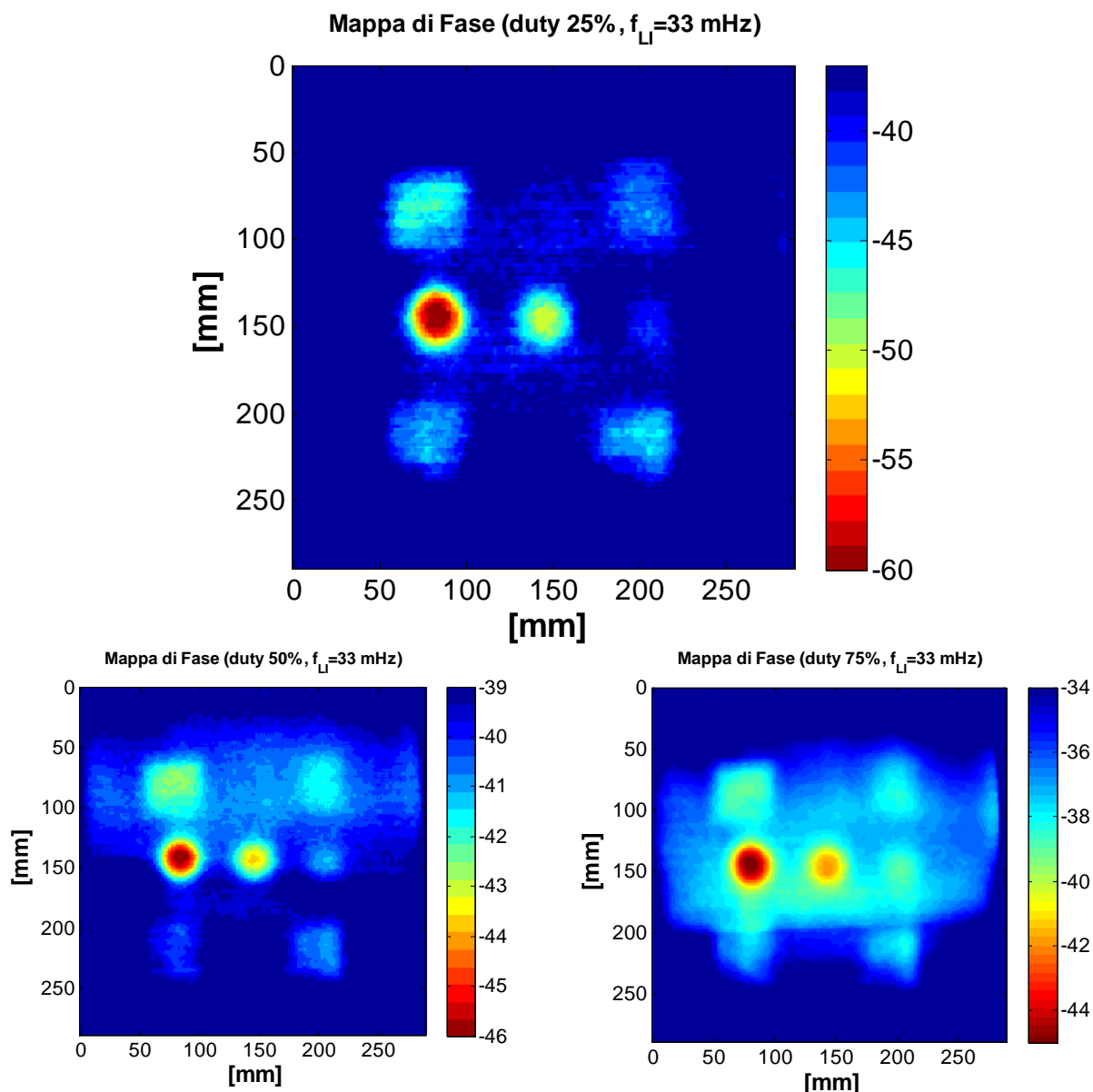


Figura 6: mappe di fase (scala in gradi) ricavate per le tre prove a diverso duty cycle, con frequenza di correlazione impiegata pari a 33 mHz.

Delle tre mappe ricavate, quella con duty pari al 25% ha offerto il valore più elevato di contrasto per tutti e sette i difetti presenti. In tutte e tre le prove i sette difetti sono visibili e ben contrastati rispetto alla restante zona integra del pannello. Anche il difetto D7 di tipo *back hole*, ad una profondità di ben 9 mm, risulta generare un discreto contrasto di fase. Nelle prove con duty del 50% e 75% si è determinato un leggero contrasto di fase tra zona centrale integra e le zone laterali integre, che disturba e rende la valutazione quantitativa del contrasto di fase sui difetti dipendente dalla scelta della zona integra. Probabilmente tale disturbo è generato dalla più lenta dissipazione del calore

ricevuto nelle zone centrali rispetto a quelle laterali, oltre che da una deposizione non uniforme di calore da parte della lampada. In figura 7 si mostra l'andamento del valore assoluto del contrasto di fase per i difetti di tipo *back hole* e per la prova con duty del 25%.

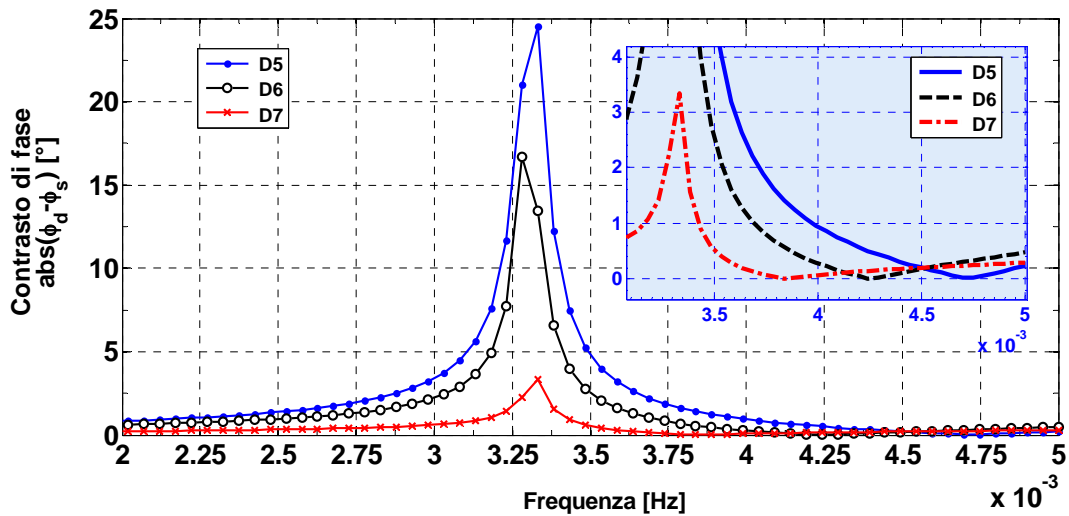


Figura 7: Andamento del valore assoluto del contrasto di fase in funzione della frequenza di correlazione lock-in, in un range sino a $F_{LI}=5$ mHz, per i tre difetti *back hole*: D5, D6 e D7.

Il contrasto è calcolato come differenza, in modulo, tra la fase in corrispondenza del difetto ϕ_d e la fase di una zona integra del pannello, ϕ_s . Si nota che l'andamento del contrasto di fase ha un picco ben pronunciato per un valore di frequenza di lock-in nell'intorno di 33 mHz. Tale frequenza si nota che è anche il valore della frequenza fondamentale della trasformata discreta di Fourier (vedi tabella 1), anche se tale osservazione è piuttosto casuale. Si osserva inoltre che tutti e tre i difetti *back hole* sembrano determinare il picco di contrasto di fase allo stesso valore di frequenza di lock-in. L'entità del contrasto invece è diversa e decrescente al crescere della profondità del difetto. Nel riquadro all'interno della figura 7 si riporta, ingrandita, la zona delle curve oltre il massimo contrasto. Si vede che i tre difetti sembrano avere una *blind frequency* (valore nullo di contrasto) decrescente al crescere della profondità del difetto. Tale osservazione richiama la nota relazione tra profondità dei difetti e *blind frequency* messa in evidenza nella tecnica PPT [2]. Le mappe di fase ottenute per valori più elevati di frequenza di correlazione, prossimi alla frequenza portante del treno d'onde, non hanno determinato un trend regolare del contrasto di fase. Probabilmente il tipo di materiale analizzato e la profondità dei difetti richiedono frequenze molto più basse della frequenza di modulazione scelta. Tuttavia l'aver modulato il calore inviato mediante onde quadre anziché onde puramente sinusoidali, come nella classica LIT, ha permesso di trovare un significativo contrasto di fase anche attraverso la correlazione lock-in con frequenze diverse dalla portante principale.

4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si è implementata una tecnica di IRNDT che consente l'uso di lampade alogene a basso costo per inviare calore modulato secondo treni di onde quadre di lunga durata sul componente da analizzare. Un particolare algoritmo basato sulla correlazione lock-in è in grado di determinare, in fase di post-processamento del segnale di temperatura campionato, mappe di sfasamento tra segnale inviato e misurato, al variare della frequenza di lock-in.

Dopo una iniziale discussione sull'influenza dei principali parametri di modulazione del treno d'onde, tra cui il duty cycle, il lavoro propone una implementazione della tecnica su un pannello in composito GRP di grosso spessore, su cui sono presenti delle delaminazioni artificiali prodotte con modalità ed a profondità differenti. L'implementazione sperimentale proposta impiega inoltre una attrezzatura termografica a basso costo, con basso frame rate e bassa risoluzione, e perciò dai costi

particolarmente contenuti. Anche l'algoritmo di lock-in proposto è di tipo non commerciale, implementato in ambiente Matlab.

I risultati dell'implementazione sperimentale mostrano chiaramente le potenzialità della tecnica, consentendo di determinare con un unico esperimento le frequenze di lock-in che risultano generare la mappa con il miglior contrasto di fase. Inoltre i risultati ottenuti hanno consentito di evidenziare difetti significativamente profondi (sino a 9 mm) con valori di contrasto elevati. Ulteriore lavoro è necessario per comprendere la correlazione di tipo quantitativo tra le caratteristiche delle curve di contrasto di fase al variare della frequenza di lock-in, e le caratteristiche dei difetti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] X. Maldague. *Theory and Practice of Infrared Technology for Non-Destructive Testing*. Wiley, New York, (2003).
- [2] C. Ibarra-Castanedo, *Quantitative subsurface defect evaluation by Pulsed Phase thermography: Depth Retrieval with the Phase*, PhD thesis. Faculté des sciences et de Génie Université Laval Québec, (2005).
- [3] C. Ibarra-Castanedo et al, "Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures", *Research in Nondestructive Evaluation*, 20, 1–31, (2009).
- [4] M. Susa, X. Maldague, I. Boras, "Improved method for absolute thermal contrast evaluation using Source Distribution Image (SDI)", *Infrared Physics & Technology*, 53-3, 197-203, (2010).
- [5] G. Busse, D.Wu, and W. Karpen, "Thermal Wave imaging with phase sensitive modulated thermography", *J. Appl. Phys.* **71**, 3962 (1992).
- [6] Manyong Choi, Kisoo Kang, Jeonghak Park, Wontae Kim, Koungsuk Kim, "Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography", *NDT&E International*, **41**, 119–124 (2008).
- [7] G. Pitarresi, F. Riforgiato, "Implementazione di tecniche ndt di termografia ad infrarossi su pannelli in composito grp per applicazioni nautiche", XXXIX Convegno Nazionale AIAS, Maratea, 7-10 settembre 2010.
- [8] S.M. Shepard, J. Hou, J.R. Lhota, J.M. Golden, "Automated processing of thermographic derivatives for quality assurance", *Optical Engineering* 46(5), 051008-1 (2007).
- [9] H.D. Benitez, H. Loaiza, E. Caicedo, C. Ibarra-Castanedo, A.H. Bendada, X. Maldague, "Defect characterization in infrared non-destructive testing with learning machines", *NDT&E International*, **42**, 630 (2009).
- [10] R.W. Arndt, "Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering", *Infrared Physics & Technology*, 53, 246–253 (2010).
- [11] G. Pitarresi, "Thermal NDE of thick GRP panels by means of a Pulse Modulated Lock-In Thermography technique", *EPJ Web of Conferences* 6, 38014 (2010).
- [12] Liu Junyan, Wang Yang, Dai Jingmin, "Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT", *Infrared Physics & Technology*, **53**, 348–357 (2010).
- [13] O. Breitenstein, W. Warta, M. Langenkamp, *Lock-in Thermography*, Springer, 2nd Ed (2010).
- [14] G. Pitarresi, L. D'acquisto, A.M. Siddiolo, "Thermoelastic stress analysis by means of an infrared scanner and a two-dimensional fast Fourier transform-based lock-in technique" *J. Strain Analysis* **43**, 493 (2008).
- [15] P. Clarkson, T. J. Esward, P. M. Harris, A. A. Smith, I.M. Smith, "Software simulation of a lock-in amplifier with application to the evaluation of uncertainties in real measuring systems", *Meas. Sci. Technol.*, **21**, 045106, (2010).