

SEGNALI CODIFICATI IN AMBITO ULTRASONORO E ACUSTICO: APPLICAZIONE DELLA COMPRESSIONE D'IMPULSO ALLA DIAGNOSTICA NON DISTRUTTIVA E ALLA CARATTERIZZAZIONE DI SISTEMI

Pietro Burrascano¹, Marco Ricci¹, Luca Senni¹, Luigi Battaglini¹, Sergio Callegari², Gianluca Setti²

¹ Dip Ingegneria, Polo Scientifico Didattico di Terni –Univ. degli Studi di Perugia - Strada di Pentima 4, Terni 05100

² Dipartimento di Ingegneria (ENDIF) Università di Ferrara - Via Saragat, 1 I-44100 FERRARA

Parole chiave: Segnali codificati, ultrasuoni, NDT, sistemi non lineari

I segnali codificati tipo “chirp” sono utilizzati in svariati ambiti applicativi e di ricerca in quanto le loro proprietà li rendono interessanti ed estremamente versatili.

In questa Memoria si presenta una rassegna sintetica delle varie applicazioni di questi segnali che l'Unità sta sviluppando sia dal punto di vista teorico che sperimentale, in collaborazione anche con altre sedi e colleghi di differenti settori Scientifico Disciplinari nate nell'ambito del Progetto PRIN2009 “Diagnostica non distruttiva ad ultrasuoni tramite sequenze pseudo-ortogonali per imaging e classificazione automatica di prodotti industriali”.

Il segnale Chirp gode di numerose proprietà che lo rendono adatto a molteplici applicazioni. Fra queste la possibilità di essere utilizzato per “compressione d'impulso” cioè nella procedura per la misura della risposta impulsiva di Sistemi Lineari Tempo Invarianti basata sul definire una coppia di segnali $s(t), \Psi(t)$ tali che $s(t) \otimes \Psi(t) = \hat{\delta}(t) \approx \delta(t)$. Tale teoria è strettamente legata a quella del “matched filter”, cioè il filtro di risposta $\Psi(t)$ tale che:

$$y(t) \otimes \Psi(t) = h(t) \otimes s(t) \otimes \Psi(t) \approx h(t) \otimes \delta(t) = h(t) \quad (2)$$

Il maggiore vantaggio nell'utilizzare la tecnica di compressione dell'impulso consiste nel poter usare per la misura della $h(t)$, segnali $s(t)$ differenti dal singolo impulso ed in particolare segnali a banda larga e ad elevato contenuto energetico, in modo da massimizzare il rapporto segnale-rumore della misura.

Un esempio classico di utilizzo del segnale Chirp per tecniche di compressione dell'impulso si ha dall'ambito acustico quando si voglia assicurare un uguale contributo energetico per ogni ottava. In questo caso, il chirp lineare produce un “addensamento” dell'energia alle ottave superiori che deve essere compensato in fase di elaborazione. Questa compensazione può però non essere sufficiente se alle ottave basse l'energia immessa è troppo poca in confronto al rumore.

Un altro esempio di applicazione è rappresentata dalle correnti indotte (vedi Memoria: *Tecniche Di Imaging Magnetiche ed a Correnti Indotte Per La Diagnostica Non Distruttiva*, P. Burrascano, M. Ricci, L. Senni, L. Battaglini). In questo caso, per migliorare la capacità di ispezione, può essere utile ottimizzare il segnale per garantire una sensibilità uniforme lungo tutto lo spessore d'ispezione. Si può dimostrare che la legge che regola la frequenza istantanea in tal caso non è esponenziale, ma è bensì del tipo $f_i(t) \propto \frac{1}{(z_0 - \Delta z t)^2}$ dove $[z_0, z_0 + \Delta z]$ è il

range di profondità di ispezione. In questo contesto stiamo applicando Chirp Esponenziali alla caratterizzazione acustica di materiali durante la fase di processo per ottimizzarne la progettazione e composizione, mentre per le correnti indotte, stiamo realizzando in collaborazione con colleghi dell'Università di Cassino, un set-up sperimentale basato sull'utilizzo dell'eccitazione Chirp Non-Lineare per i test non distruttivi a correnti indotte. Infine, partendo dal singolo segnale Chirp Lineare o Non-Lineare, ci siamo chiesti se fosse possibile da un lato estendere l'uso di tali segnali in sistemi Multi-Input Multi-Output, dall'altro se la procedura di compressione di impulso potesse essere utilizzata anche per la caratterizzazione di sistemi non lineari.

Per quanto riguarda la prima tematica, sono state sviluppate diverse procedure per generare una famiglia di segnali “pseudo-ortogonali” a partire da un Chirp generico iniziale, con la caratteristica di minimizzare la cross-correlazione tra i vari membri della famiglia, in analogia con quanto succede ad esempio per i codici binari di

Gold o di Kasami [6-7].

Per quanto riguarda invece l'utilizzo delle tecniche di compressione d'impulso per lo studio di sistemi non-lineari, stiamo applicando il Chirp Esponenziale alla caratterizzazione di sistemi non lineari descrivibili secondo la Serie di Volterra. Le peculiari proprietà del Chirp Esponenziale fanno sì che con una sola misurazione, a seguito della procedura di compressione d'impulso, le varie $h_n(t)$ associate alle varie armoniche vengano separate nel tempo e dunque possano essere ricostruite simultaneamente. Dato che il modello di Volterra è largamente diffuso sia in ambito acustico che elettrico ed elettronico, la procedura di misura basata sul Chirp Esponenziale risulta uno strumento assai potente.

Pubblicazioni

1. Hutchins, D., Burrascano, P., Davis, L., Laureti, S., & Ricci, M. . Coded waveforms for optimised air-coupled ultrasonic nondestructive evaluation. *Ultrasonics*. 2014 S0041-624X-00062-6. (2014)
2. Ricci, M., Senni, L., Burrascano, P., Borgna, R., Neri, S., & Calderini, M. Pulse-compression ultrasonic technique for the inspection of forged steel with high attenuation. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 54(2), 91-95 (2012).
3. Ricci, Marco, Luca Senni, and Pietro Burrascano. "Exploiting Pseudorandom Sequences to Enhance Noise Immunity for Air-Coupled Ultrasonic Nondestructive Testing." *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 61 (11) 2905-2915 (2012).
4. P. Burrascano, M. Ricci, L. Battaglini, L. Senni: "Nonlinear Convolution and Fourier Series Coefficients Estimate", 2014 2nd IEEE ChinaSIP, China Summit & International Conference on Signal and Information Processing, Xi'an, China from 9th to 13th, July 2014
5. Caporale, S., Callegari, S., Ricci, M., & Burrascano, P. (2013, July). Constant envelope pseudo orthogonal excitations for ultrasound testing. In *Digital Signal Processing (DSP), 2013 18th International Conference on* (pp. 1-8). IEEE.
6. Battaglini, L., Ricci, M., & Senni, L. (2013, July). Frequency modulated continuous wave ultrasonic radar. In *Digital Signal Processing (DSP), 2013 18th International Conference on* (pp. 1-8). IEEE.
7. Callegari, Sergio, Marco Ricci, Salvatore Caporale, Marcello Monticelli, Massimiliano Erolì, Luca Senni, Riccardo Rovatti, Gianluca Setti, and Pietro Burrascano. "From chirps to random-FM excitations in pulse compression ultrasound systems." In *Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International*, pp. 471-474. IEEE, 2012.
8. Ricci, Marco, Sergio Callegari, Salvatore Caporale, Marcello Monticelli, Luigi Battaglini, Massimiliano Erolì, Luca Senni, Riccardo Rovatti, Gianluca Setti, and Pietro Burrascano. "Exploiting non-linear chirp and sparse deconvolution to enhance the performance of pulse-compression ultrasonic NDT." In *Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International*, pp. 1489-1492. IEEE, 2012.

Bibliografia

1. G L Turin, 'An introduction to matched filters', IRE Trans of Information Theory, pp 311-329, (1960).
2. M Pollakowski and H Ermert, 'Chirp signal matching and signal power optimisation in pulse-echo mode ultrasonic non-destructive testing', IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 41, (5), pp 655-659, (1994).
3. A W Rihaczek, Principles of High-Resolution Radar, Norwood, MA: Artech House, (1996).
4. T. H. Gan, D. A. Hutchins, D. R. Billson, and D. W. Schindel, "The use of broadband acoustic transducers and pulse-compression techniques for air-coupled ultrasonic imaging," *Ultrasonics* 39, (3), 181–194 (2001).
5. T Misaridis and J A Jensen, 'Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part I: Basic concepts and expected benefits', IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 52, (2), pp 177-191, 2005; and 'Part II: Design and performance for medical imaging applications', pp 192-207, (2005).
6. A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique," in *Proc. AES 108th Conv.*, Paris, France, Feb. 2000.
7. A. Novák, L. Simon, F. Kadlec, and P. Lotton, "Nonlinear System Identification Using Exponential Swept-Sine Signal", *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement* 59, (8), 2220-2229 (2010).