

## **INFLUENCIA DE ALGUNOS PARÁMETROS DEL PROCESAMIENTO TIEMPO-ESCALA SOBRE LA REDUCCIÓN DE RUIDO EN END POR ULTRASONIDOS**

REFERENCIA PACS: 43.35 - Zc

J.C. Lázaro<sup>1</sup>; J.L. San Emeterio<sup>2</sup>; A. Ramos<sup>2</sup>; J.L. Fernández Marrón<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Informática y Automática. UNED  
C/ Senda del Rey, 9. 28040 Madrid, España  
Tel. 91.398.71.63 - Fax. 91.398.66.97  
e-correo: jclo@dia.uned.es

<sup>2</sup> Instituto de Acústica. CSIC  
C/ Serrano, 144. 28006 Madrid, España

### **ABSTRACT**

The wavelet transform is used for the reduction of coherent noise, of the type induced in NDT ultrasonic inspections of specimens with coarse granular microstructure. Some influences of processing parameters, such as the mother wavelet, type of thresholding and threshold selection rules are evaluated using synthetic noise registers generated with different values of the signal to noise input ratio.

### **RESUMEN**

En este trabajo se utiliza la Transformada Wavelet para la reducción de ruido coherente, del tipo generado en las inspecciones no destructivas (END) por ultrasonidos de materiales con microestructura granular. Se evalúa la influencia de algunos parámetros de procesado, como el tipo de ondícula madre, el tipo de umbralización y las reglas de selección de umbrales, utilizando registros sintéticos de ruido generados con diferentes valores de la relación señal ruido de entrada.

### **INTRODUCCIÓN**

La búsqueda y dimensionado de defectos internos mediante la técnica de pulso-eco, normalmente empleada en la Evaluación No Destructiva de materiales por ultrasonidos, se ve dificultada en materiales de estructura granular o multilaminar. Esto es debido a la aparición de ruido coherente [Healey, 97], generado por la interferencia de múltiples reflexiones en la estructura del material, superpuestas con el eco proveniente del defecto. Existen distintas técnicas específicas para la reducción de este tipo de ruido, como el procesamiento SSP [Bilgutay, 88] o las transformadas Tiempo-Frecuencia [Hammond, 96] entre las que destaca la distribución de Wigner-Ville. Más recientemente se han comenzado a aplicar, con esta finalidad, técnicas Tiempo-Escala basadas en el análisis por ondículas mediante la transformada Wavelet [Abbate, 97]. Este tipo de transformada ofrece una gran flexibilidad con un amplio abanico de posibilidades a la hora de seleccionar las opciones de análisis, lo que a su vez hace más complicada la elección de los parámetros más apropiados para cada aplicación.

En este trabajo se consideran distintos tipos de ondículas madre así como algunos de los métodos de umbralización más habituales dentro del campo del procesamiento de señales mediante transformadas Tiempo-Escala. Se estudia, de forma comparativa, la influencia de estos parámetros en los resultados del procesamiento de trazas ultrasónicas contaminadas con ruido coherente típicamente inducido por materiales de naturaleza granular.

Para realizar el estudio se ha tomado una colección de registros de ruido sintético generado de la forma que se describe más adelante y se les ha añadido una señal ultrasónica

limpia procedente de un reflector perfecto. A todas estas trazas se les ha aplicado el mismo tratamiento con distintos parámetros y se ha calculado la mejora en la relación Señal-Ruido obtenida con las distintas combinaciones de ellos ( tipo de ondícula y algoritmo de umbralización ).

## ASPECTOS GENERALES DEL PROCESAMIENTO POR WAVELETS

La idea fundamental del procesamiento mediante Transformada Wavelet, no difiere conceptualmente de otros tipos de procesamiento más clásicos como los basados en la transformada de Fourier o el filtrado pasobanda y otros más recientes como SSP y la distribución de Wigner-Ville. Consiste en obtener una representación de la señal en un dominio en el que podamos separar con más facilidad las características esenciales de la señal que deseamos desenmascarar, de las características propias de este enmascaramiento (ruido). La señal de partida se adquiere de los sistemas de inspección ultrasónica, como una señal en el dominio del tiempo, donde no es fácil discernir entre la señal buscada (eco reflejado por un posible defecto) y el ruido. Esto es más complejo cuando parte del ruido contaminante es coherente como sucede en los materiales de naturaleza granular donde gran parte del ruido está generado por la propia estructura del material que genera una considerable cantidad de pequeños ecos no deseados debidos a los distintos dispersores granulares. En estos casos, la banda del ruido se solapa en buena medida con la banda de la señal buscada y los tratamientos clásicos de reducción de ruido, como el filtrado pasobanda o el promediado temporal, resultan ineficaces.

Se han empleado diversas técnicas para la reducción de este tipo de ruido en aplicaciones de END por ultrasonidos, entre las que cabe destacar el SSP y la transformada de Wigner-Ville. Habitualmente, las técnicas de eliminación de ruido, pretenden generar algún tipo de diversidad que pueda ser utilizada para distinguir entre la señal y el ruido. En el SSP, a partir de una señal se obtienen un conjunto de señales descorrelacionadas entre sí y que contendrán distintas proporciones de ruido. La distribución Wigner-Ville transforma la señal temporal original en una señal en el dominio Tiempo-Frecuencia. Por otra parte, la Transformada Wavelet convierte la señal original en una señal en el dominio Tiempo-Escala y presenta la ventaja de realizar un análisis basado en funciones de soporte compacto tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia (wavelet madre). De esta forma se consigue una buena localización temporal y frecuencial simultáneamente. Esta característica resulta de especial interés en aplicaciones de END por ultrasonidos ya que, la naturaleza impulsional de este tipo de señales unido al ancho de banda finito de los transductores, hacen que aquellas presenten una localización temporal y frecuencial.

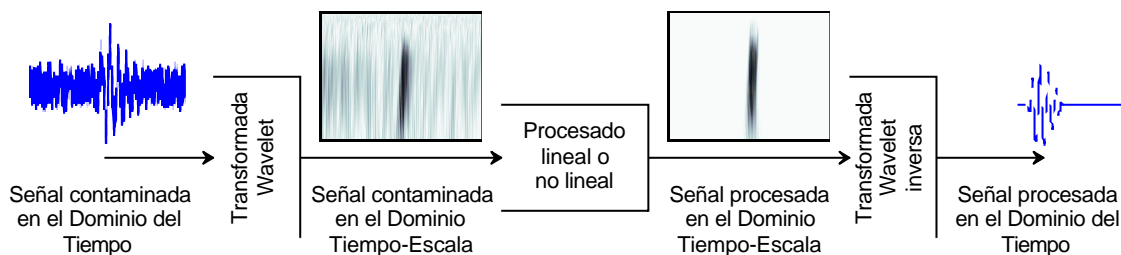


Figura 1. Esquema general del procesamiento por Transformada Wavelet para la reducción de ruido

El esquema de funcionamiento de un procesamiento por Transformada Wavelet, para la reducción de ruido, se muestra en la figura 1. A la señal original en el dominio del tiempo se le aplica la transformada Wavelet para obtener una representación bidimensional en el dominio conjunto Tiempo-Escala. En este dominio se realiza un procesamiento orientado a realzar los coeficientes que representan la señal y atenuar o eliminar completamente los correspondientes al ruido. Este tratamiento se puede hacer mediante umbralización y/o podado de los coeficientes en los distintos niveles. Existen múltiples formas de realizar esta umbralización, algunas de las cuales están ampliamente recogidas en la literatura específica [Donoho, 93], [Donoho, 95], [Moulin, 94]. Esta umbralización, puede ser dura, blanda o mixta, con un valor de umbral único para todos los niveles (escalas) o dependiente del nivel de descomposición, con distintos criterios para escoger un determinado valor de umbral, etc.

**SIMULADOR DE RUIDO DE GRANO**

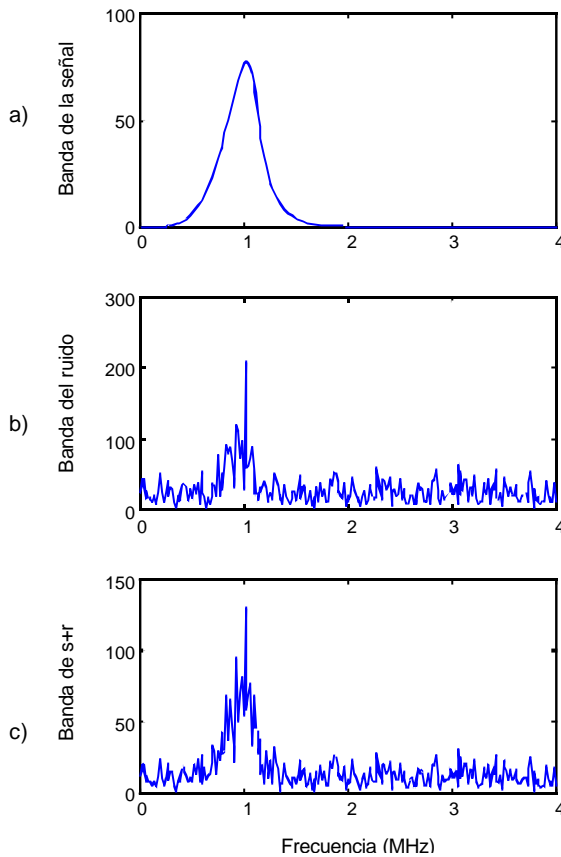


Figura 2. Bandas espectrales de la señal (a), del ruido (b) y de la mezcla de ambas (c).

Se suelen utilizar simuladores que generan registros sintéticos de ruido, para evaluar la eficiencia de distintos algoritmos de procesado, tanto en la caracterización de materiales/tejidos mediante estimación de parámetros de los ecos de "backscattering", como en la reducción de los niveles de ruido coherente [Bilgutay, 89], [Cohen, 92] y [Gustafsson, 97]. Estos simuladores utilizan distintas aproximaciones, que con frecuencia suponen que la señal procedente del material a inspeccionar es estacionaria, lo que en estas aplicaciones no sucede. Es frecuente adoptar una distribución estadística del tipo "suma de fasores aleatorios", considerando una distribución uniforme para la fase y una distribución tipo Rayleigh para la amplitud. Por otra parte, el pulso ultrasónico emitido se suele modelar como un coseno modulado por una envolvente, generalmente Gaussiana.

Para evaluar las técnicas tiempo-escala utilizadas en este trabajo, hemos desarrollado un simulador de ruido de grano en el que los registros sintéticos de ruido han sido elaborados tomando en consideración las características espectrales del sistema de transducción ultrasónico [Ramos, 97]. La señal generada por este simulador  $y(t)$ , es la suma

directa del eco procedente del defecto a detectar  $s(t)$ , y del ruido de grano  $r(t)$ , resultante de la composición de los múltiples pequeños ecos procedentes de los reflectores-dispersores internos presentes en el material.

$$y(t) = [A d(t - t_D) + n(t)] * h(t) \tag{1}$$

El defecto queda modelado como una reflexión perfecta, mediante la función  $d(t)$ , siendo  $A$  un factor de escala que nos va a determinar su amplitud, y mediante ella la relación señal/ruido. La función  $h(t)$  es la respuesta impulsiva en emisión/recepción del proceso de transducción piezoeléctrica, evaluada para una configuración de referencia [Lázaro, 99]. El asterisco indica la operación de convolución en el dominio del tiempo, y  $n(t)$ , que correspondería a la distribución y reflectividad de los dispersores (granos), queda modelada como un variable aleatoria gaussiana. En un contexto más amplio sería interesante incluir otras distribuciones estadísticas como las consideradas en [Vergara, 91].

Al ruido coherente generado de esta manera se le ha añadido un ruido blanco aditivo en una proporción de dos a uno lo que proporciona un registro de ruido más cercano al presente en una situación real donde las fuentes de ruido son múltiples y de distinta naturaleza.

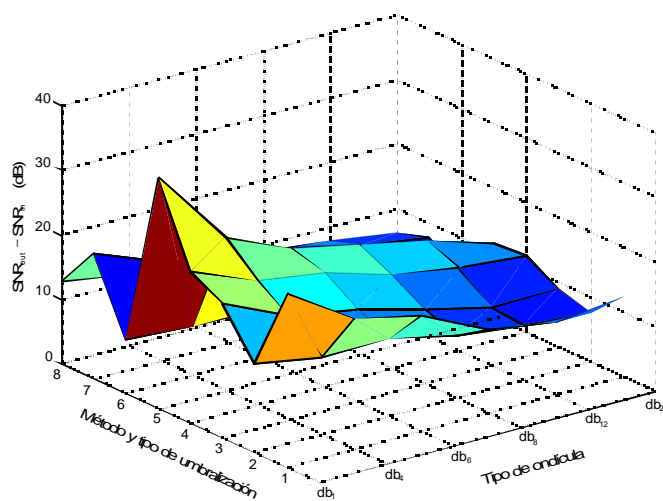
La figura 2 muestra un ejemplo de las bandas frecuenciales de la señal ultrasónica generada por un reflector perfecto (a) (la cual se ha empleado usando la expresión (1) para generar el ruido coherente); la banda del ruido coherente más ruido blanco (b); y finalmente la banda de la señal resultante de sumar las dos anteriores con una relación de amplitudes máximas de 1.2 (c).

**DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS REALIZADO**

Se ha estudiado la influencia de varios parámetros de procesado en la mejora de la relación Señal-Ruido en múltiples trazas ultrasónicas generadas sintéticamente. A cada una de estas trazas se ha aplicado un tratamiento de reducción de ruido con distintos valores de algunos

parámetros fundamentales y se ha calculado la mejora obtenida en cada caso. Los parámetros estudiados han sido: la relación señal-ruido de entrada, el tipo de ondícula o wavelet madre, el tipo de umbralización (dura o blanda), el algoritmo de umbralización y el método de aplicación de umbral. Por razones de espacio no se comentarán todas las posibilidades, por lo que algunos de los parámetros se mantendrán fijos. Los parámetros fijos en este caso son: la relación Señal-Ruido de entrada que se ha establecido en 1.2 respecto a las amplitudes máximas de señal-ruido, el método de aplicación de umbral, que se ha escogido de tipo multinivel y el número de niveles de descomposición que se ha fijado en 12. Esta elección viene condicionada en parte por el hecho de tratarse de un ruido fuertemente coloreado, ya que un método multinivel permite aplicar distintos umbrales en los distintos niveles (escalas) de descomposición. En cuanto al tipo de wavelet madre, la presente comunicación se restringe únicamente a la familia de Daubechies [Daubechies, 92], dentro de la cual se han escogido las siguientes:  $db_1$  (o de Haar),  $db_4$ ,  $db_6$ ,  $db_8$ ,  $db_{12}$  y  $db_{20}$ .

Para obtener una cierta validez estadística en los resultados, el tratamiento se ha aplicado a 300 trazas de ruido distintas y se presentan aquí los valores medios de la mejora de la relación Señal-Ruido con cada uno de los métodos.



Métodos de umbralización:

En los procesamientos etiquetados en la figura con 1, 2, 3 y 4 se ha empleado umbralización blanda y en el resto (5, 6, 7 y 8) dura.

- 1 y 5 emplean umbralización fija
- 2 y 6 emplean SURE (Stein's Unbiased Risk Estimate) riguroso.
- 3 y 7 SURE heurístico.
- 4 y 8 método MiniMax

Figura 3. Mejora de la relación Señal-Ruido con distintos métodos y distintas wavelet madre.

Por tratarse de registros sintéticos de ruido a los que se ha añadido un señal  $s(t)$ , de duración  $t_s$ , en un instante  $t_D$  con una amplitud  $A$ , queda establecida una relación señal ruido inicial entre amplitudes máximas de señal y ruido, y conocemos además la zona en la que esperamos encontrar la señal a detectar en la traza procesada. Por ello, es posible utilizar la siguiente medida de las relaciones señal-ruido en potencia de la traza inicial  $y(t)$ ,  $SNR_{in}$ , y de la traza procesada  $y'(t)$ ,  $SNR_{out}$ :

$$SNR_{in} = 10 \log \left[ \frac{\sum_{t \in I} (y(t)^2) / NPS}{\sum_{t \notin I} (y(t)^2) / NPR} \right] \quad SNR_{out} = 10 \log \left[ \frac{\sum_{t \in I} (y'(t)^2) / NPS}{\sum_{t \notin I} (y'(t)^2) / NPR} \right] \quad (2)$$

siendo  $I$  el intervalo  $[t_D, t_D + t_s]$  con NPS puntos; el resto de la traza contiene NPR puntos.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La figura 3 muestra de forma resumida la influencia que presentan dos de los parámetros bajo estudio sobre la mejora en la relación Señal-Ruido. Los parámetros escogidos en esta representación, son el tipo de ondícula y el método y tipo de umbralización. La relación Señal-Ruido de entrada se mantiene fija a 1.2 entre las amplitudes máximas. Cada punto de la gráfica

representa el valor medio de la mejora de la relación Señal-Ruido en un conjunto de 300 trazas procesadas. Esta mejora se representa en decibelios como  $SNR_{out} - SNR_{in}$ .

De esta gráfica pueden extraerse varias conclusiones inmediatas como que la mejora es siempre positiva llegando en algunos casos a ser superior a los 35 dB. En el peor de los casos la mejora es de unos 5 dB. También se observa que la mejora es mayor con las ondículas de menor orden que con las de mayor orden y que el método de umbralización fija dura muestra mejores prestaciones para todas las wavelet madre de la familia de Daubechies que son las que se consideran en esta gráfica. No obstante, esto solo es válido para las ondículas de esta familia; para ondículas de otras familias, se ha observado que el comportamiento de los distintos métodos es distinto. Además, las ondículas de órdenes bajos, tienen como inconveniente una señal recuperada con más distorsión, mientras que las de órdenes altos la recuperan con un mayor nivel de detalle. Esto es consecuencia de la aparición de lóbulos superiores en la banda de las ondículas de órdenes bajos, lo cual no sucede con las de órdenes altos.

En esta figura se ha representado la mejora en la relación Señal-Ruido, antes y después del procesamiento. Sin embargo, en las aplicaciones de END por ultrasonidos, donde un objetivo primordial es la detección de defectos, hay que tener en cuenta la posible detección de falsos ecos que no se correspondan con una falla real. Este problema es importante a la hora de valorar los distintos métodos de umbralización, ya que los que emplean umbralización dura presentan en muchos casos una mejora mayor a costa de introducir un mayor número de falsos ecos. Los métodos de umbralización blanda son más conservadores en este aspecto pero por contra introducen una mayor distorsión en la señal reconstruida.

Para concluir, se muestra en la figura 4 un ejemplo de los múltiples que se han tratado. El procesamiento empleado para obtener la señal 'limpia' es el de umbralización fija dura con una wavelet madre de tipo  $db_4$ . Para esta traza de ejemplo, tenemos  $SNR_{in}=3.8\text{dB}$  y  $SNR_{out}=27.4\text{dB}$ , por lo que la mejora obtenida con el procesamiento es de 23.6dB.

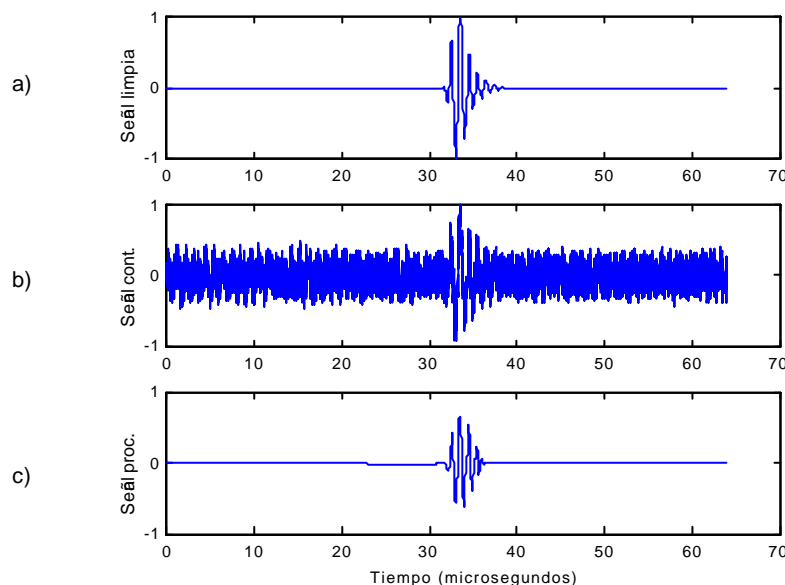


Figura 4. a) Señal ultrasónica sin ruido, procedente de un reflector perfecto. b) Señal contaminada con ruido coherente generado en la forma descrita en el apartado correspondiente y con una relación de 1.2 entre las amplitudes máximas de la señal y del ruido. c) Señal procesada empleando umbralización fija dura y una ondícula de tipo  $db_4$ . Las bandas de las señales a) y b) se muestran en la figura 2.

### Agradecimiento

Este trabajo se ha realizado con financiación del proyecto CICYT Ref. TAP1999-0864

## REFERENCIAS

- [Abbate, 97] A. Abbate, J. Koay, J. Frankel, S.C. Schroeder, P. Das, "Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor", *IEEE Trans. on UFFC*, Vol 44(1), pp. 14-25 (1997).
- [Bilgutay, 88] N.M. Bilgutay, J. Saniie, U. Bencharit, "Spectral and Spatial Processing techniques for improved Ultrasonic imaging of materials", en *Signal Processing and Pattern Recognition in NDE of Materials*. Ed. C.H. Chen Springer-Verlag, pp.71-85 (1988).
- [Bilgutay, 89] N.M. Bilgutay, X. Li, J. Saniie, "Spectral analysis of randomly distributed scatterers for ultrasonic grain size estimation", *Ultrasonics*, Vol. 27, pp. 19-25, (1989).
- [Cohen, 92] F.S. Cohen "Modeling of ultrasound speckle with applications in flaw detection in metals", *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol 40, Nº 3, pp. 624-632, (1992).
- [Daubechies, 92] I. Daubechies. "Ten lectures on wavelets", SIAM Philadelphia (1992)
- [Donoho, 93] D. L. Donoho, "Nonlinear Wavelet methods for recovery of signals, densities, and spectra from indirect and noisy data", *Proc. of Symposia in Applied Mathematics*, Vol. 47, pp. 173-205 (1993).
- [Donoho, 95] D. L. Donoho, "De-Noising by Soft-Thresholding". *IEEE Transaction on Information Theory*, Vol. 41, pp. 613-627, (1995).
- [Gustafsson, 97] M.G. Gustafsson, T. Stepinski, "Studies of split spectrum processing, optimal detection, and maximum likelihood amplitude estimation using a simple clutter model", *Ultrasonics*, Vol 35, pp. 31-52, (1997).
- [Hammond, 96] J.K. Hammond, P.R. White, "The analysis of non-stationary signals using time-frequency methods", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 190, Nº 3, pp. 419-447 (1996).
- [Healey, 97] Andrew J. Healy, Sidney Leeman and Mark Betts. "A method for imaging the spatial coherence of pulsed ultrasound fields". *Acoustical Imaging*, Vol 23. Editado por Lees and Ferrari. Plenum Press, New York (1997), pp. 67-74
- [Lázaro, 99] J.C. Lázaro, J.L. San Emeterio, A. Ramos, P.T. Sanz, "Utilización de transformadas tiempo-escala para supresión de ruido coherente en END por ultrasonidos". *Ponencias END, Asociación Española de END*, pp. 363-371 (1999).
- [Moulin, 94] Pierre Moulin, "Wavelet thresholding techniques for power spectrum estimation", *IEEE Trans. on signal Processing*. Vol. 42, Nº 11, Nov. (1994), pp. 3126-3135.
- [Ramos, 97] A. Ramos, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, "Electrical matching effects on the piezoelectric transduction performance of a through transmission pulsed process", *Ferroelectrics*, Vol 202, pp. 71-80, (1997).
- [Vergara, 91] L. Vergara, J.M. Paez, "Backscattering grain noise modelling in ultrasonic non destructive testing", *Waves in Random Media*, Vol I, pp. 81-92, (1991).