

ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA DE RUIDO GRANULAR ULTRASÓNICO PARA EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE MATERIALES

PACS: 43.35.Zc

J.V. Fuente²; L. Vergara¹; J. Gosálbez¹; R. Miralles¹

1 Departamento de Comunicaciones
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n.
46071 Valencia

E-mail: jorgocas@com.upv.es; lvergara@com.upv.es; rmiralle@com.upv.es

2 AIDICO, Asociación para la Investigación de las Industrias de la Construcción
Avda. Benjamín Franklin, 17.
46980 Paterna. Valencia
E-mail: jvfuente@aidico.es

ABSTRACT

Ultrasonic backscattering noise appears in a large number of nondestructive testing applications, in the general area of tissue or materials characterization. We consider in this contributions the time-frequency analysis of backscattering noise with aim of obtaining depth profiles of some parameters related to the attenuation. The proposed analysis may have general applicability in the characterization of materials or tissues having depth dependent properties. For example, it may be useful for measuring the penetration of repairing substances in deteriorated building elements. Also it may be of interest to obtain signatures of the material for classification purposes.

RESUMEN

El ruido granular ultrasónico aparece en multitud de aplicaciones no destructivas, en general, en el campo de la caracterización de materiales y tejidos. En el presente trabajo empleamos el análisis tiempo-frecuencia del ruido granular generado con el objetivo de obtener perfiles con la profundidad de ciertos parámetros relacionados con la atenuación. El análisis propuesto puede ser de aplicabilidad a la caracterización de materiales o tejidos que posean propiedades que varían con la profundidad. Por ejemplo, puede ser útil para la medida de la penetración de sustancias reparadoras en elementos constructivos. También puede ser de interés para obtener *firmas* del material para su clasificación.

INTRODUCCIÓN

La inspección de materiales mediante ultrasonidos se realiza fundamentalmente utilizando las técnicas de transmisión-recepción y de pulso/eco. Esta contribución se centra en la técnica de pulso/eco donde la señal recuperada está compuesta por la superposición retrasada de versiones modificadas de la energía enviada por el transductor en forma de pulsos.

Este nivel de energía recibido en el transductor se conoce como ruido estructural o granular y es consecuencia directa de la dispersión reflejada cuando el pulso enviado incide sobre un conjunto de reflectores, con un tamaño comparable al de su longitud de onda. Por tanto, el ruido granular es debido a la dispersión reflejada (backscattering).

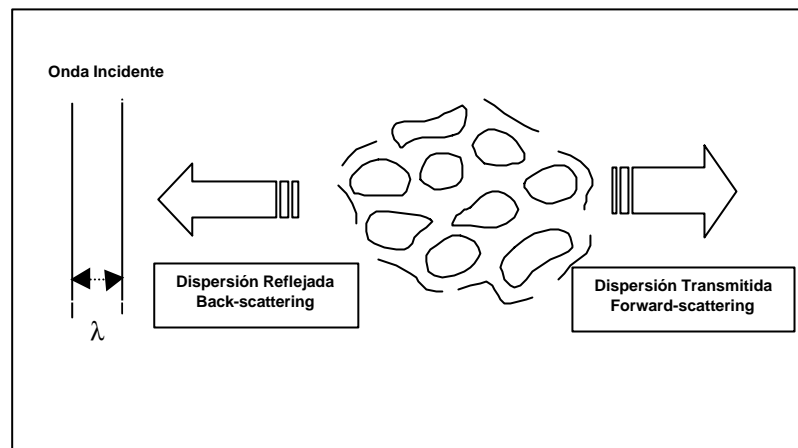


Figura 1. Tipos de dispersión asociadas a la propagación de un frente de ondas de longitud de onda λ .

La propagación ultrasónica se puede interpretar como una combinación de fenómenos de atenuación y dispersión en un medio homogéneo o no homogéneo, en el caso más general.

Cuando un pulso ultrasónico incide en un material o tejido sufre unas variaciones relacionadas con las propiedades de la muestra. A partir de esta consideración podemos extraer cierta información que permita la caracterización de los materiales o tejido bajo inspección.

La atenuación experimentada por dicho pulso al propagarse por el material, y su dependencia con la frecuencia, resulta de especial interés para la caracterización de materiales no homogéneos. La atenuación afecta de distinta manera a las frecuencias del espectro de excitación.

Por lo tanto, necesitamos un procedimiento para recoger información del pulso a diferentes profundidades cuando éste se propague por el material. Esta información está contenida en el ruido granular.

La naturaleza aleatoria del ruido granular lleva asociada una varianza en las realizaciones ultrasónicas, con lo que se hace necesario un promediado adecuado para estimar la variación del pulso.

En [1] y [3] los autores consideran la medida de la atenuación en el dominio temporal dejando de lado la dependencia de este parámetro con la frecuencia. La dependencia de la atenuación con la frecuencia se considera en [4] aunque de manera muy simplificada, donde se supone una dependencia lineal del coeficiente de atenuación con la frecuencia.

Un método clásico de abordar el análisis de la dependencia con la frecuencia de la atenuación es la medida, a lo largo del registro ultrasónico, es la medida de la frecuencia representativa a lo largo del espectro del ruido granular. La frecuencia centroide, instantánea, la correspondiente a la máxima energía y la frecuencia de resonancia muestran cierta variación con la profundidad debido a la dependencia con la frecuencia de la atenuación. En ciertos casos [5] y [8], asumiendo una dependencia lineal con la frecuencia y un pulso gaussiano, se pueden obtener relaciones explícitas entre la evolución de la atenuación y la frecuencia significativa.

En otros casos, [9] y [10], hay experiencia en los que se muestran correlaciones entre la frecuencia centroide y las propiedades como el tamaño de grano del material. En estas aplicaciones se trabaja con la medida de la atenuación en la envolvente. Se indica también, que con medios altamente atenuantes tenemos que reducir mucho el tamaño de ventana a emplear para el suavizado.

Una manera de abordar la extracción de información acerca de la microestructura del material podría representar el estudio de la deformación de un pulso de frecuencia ultrasónica enviado a un material y la evolución de esa deformación a lo largo de la propagación del mismo con el material. Esta vía de estudio resulta de especial similitud a la que presentamos y que conforma otro trabajo enviado a este congreso [11].

En el presente trabajo se presenta algunas contribuciones al problema de la estima de la atenuación mediante un análisis tiempo-frecuencia del ruido ultrasónico. La primera contribución es principalmente teórica; en general un análisis riguroso del efecto de la dispersión reflejada en los granos del material en el dominio tiempo-frecuencia es difícil debido a la naturaleza variante del modelo utilizado. En esta sección también se presentan los resultados del desarrollo analítico que permitan entender exactamente la manera de abordar el problema.

Se propone un esquema general para la estima de la atenuación con dos principales novedades en comparación con los trabajos relacionados vistos con anterioridad. La primera novedad es que la estimación de parámetros puede ser extendida al caso general en el que la dependencia con la frecuencia no sea lineal, la segunda es que el esquema propuesto es válido para estimar las variaciones de los parámetros relacionados con la atenuación con la profundidad que pueden ser interesante para detectar y caracterizar cambios en las propiedades del material. Esto, también puede tener una aplicación para la obtención de firmas del material con el fin de obtener criterios para su clasificación.

Por último, se presentan ejemplos de estos análisis con señales ultrasónicas reales tomadas en probetas de pasta de cemento.

MODELO TIEMPO-FRECUENCIA

Sea un pulso ultrasónico para una profundidad z , donde w_0 es la frecuencia central del pulso.

$$p(t, z) = e(t, z) \cdot \exp(jw_0 t)$$

El ruido granular que registramos cuando hacemos pasar por un material, modelado con posterioridad, adopta la expresión siguiente:

$$r(t, z) = \sum_{n=1}^{N(z)} A_n \cdot p(t - t_n, z) \quad (1)$$

La contribución a la señal de una rebanada de material centrada a una profundidad z y con una anchura D donde

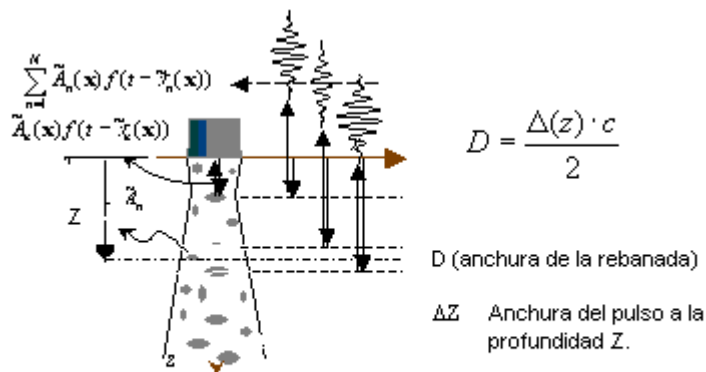


Figura 2. Modelo de generación de la señal ultrasónica

donde $\Delta(z)$ es la duración del pulso a la profundidad z , c la velocidad de fase del pulso enviado, $N(z)$ es el número de dispersores, o pequeño reflectores, que contribuyen a $r_c(t,z)$ en la rebanada de material. Los coeficientes de este modelo para la señal, $\{A_n\}$ se modelan como variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (v.a.i.i.d.) que representan la amplitud reflejada por cada dispersor y $\{\tau_n\}$ representan el retraso temporal de cada eco reflejado y también se modelan como v.a.i.i.d. Además, cabe destacar que $\{A_n\}$ y $\{\tau_n\}$ son variables independientes entre sí. Suponemos, además, una distribución uniforme de $\{\tau_n\}$ en el intervalo $2z/c \pm 2 \cdot \Delta z/c$, por medio a su vez, de una distribución uniforme de los dispersores.

La ecuación en el dominio del tiempo de la señal recuperada es,

$$r_c(t, z) = \sum_{n=1}^{N(z)} A_n \cdot e_z(t - \tau_n) \cdot \exp(-j\omega_0 \tau_n)$$

para el pulso demodulado.

El modelo para la modificación del pulso en el dominio transformado $E_z(w)$ es,

$$E_z(w) = U(w) \cdot F(w) \cdot e^{-\alpha(w,z) \cdot 2 \cdot z} \quad (2)$$

donde respecto del pulso enviado $U(w)$ se producen los efectos de $F(w)$ que modela la respuesta al pulso del reflector, y los efectos de atenuación modelados por la exponencial y donde el coeficiente de atenuación $\alpha(w,z)$ controla la dependencia de la atenuación con la frecuencia. En este punto se deja abierta la posibilidad el cambio de este coeficiente con la profundidad, de ahora en adelante se representará para cada z de la forma $\alpha_z(w)$.

La ecuación que describe el proceso en el dominio de la frecuencia es,

$$E \left[\left| R_c(w, z) \right|^2 \right] = |U(w)|^2 \cdot |F(w)|^2 \cdot \exp(-\alpha_z(w) \cdot 4 \cdot z) \cdot \left\{ E \left[A^2 \right] \cdot N(z) + E^2[A] \cdot \sin^2 \left(\frac{w + \omega_0}{2p} \cdot \Delta z \right) \cdot \left(N^2(z) - N(z) \right) \right\} = S(w, z)$$

Donde $E[.]$ es el valor medio y se calcula debido a la naturaleza aleatoria de las realizaciones reflejada en $\{A_n\}$ y $\{\tau_n\}$. $R_c(w,z)$ es la transformada de Fourier de la envolvente compleja de la señal recibida de una rebanada centrada en z .

Si asumimos estacionaridad y ergodicidad a lo largo de la duración de una ventana que se desplaza por las muestras de la señal recibida, podemos calcular distribuciones tiempo-frecuencia cuadráticas $S(w,z)$ (por ejemplo espectrogramas) que permitan estimar parámetros dependientes de la atenuación de la señal recibida.

Tomando logaritmos neperianos (log) en la expresión anterior se puede llegar a una expresión donde se puede estimar el coeficiente de atenuación $\alpha_z(w)$ a través de las estimas del espectrograma $S(w,z)$ de la señal recibida.

$$\log(S(w, z)) = -\alpha_z(w) \cdot 4 \cdot z + L(w, z) \quad (3)$$

donde en la función $L(w,z)$ se han englobado los términos que no dependen de la atenuación.

ESQUEMA PROPUESTO

En la figura 3 se representa el esquema o pauta general de actuación para el anterior desarrollo analítico anterior con el fin de obtener perfiles de profundidad de parámetros relacionados con la atenuación (atenuación media, parámetros que modelan $\alpha_z(w), \dots$).

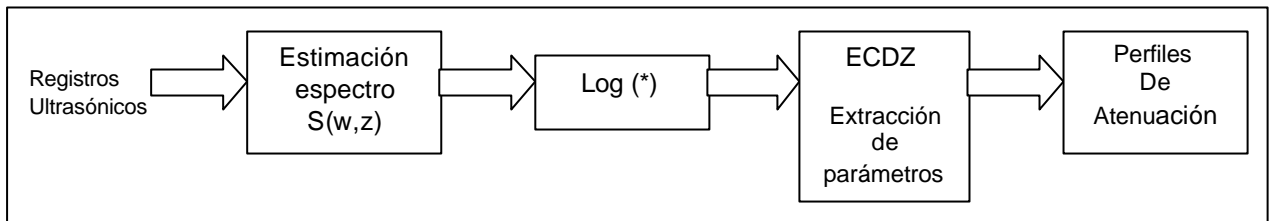


Figura 3 Esquema propuesto.

El bloque fundamental es el relativo a la extracción de parámetros que puede resultar muy diferente según la situación concreta a estudiar dependiendo de la hipótesis hecha en (3).

Una posibilidad es suponer no dependiente de z la respuesta global de los reflectores sin contar únicamente con la atenuación, $L(w,z) = L(w)$. Derivando nuestro estimador $\log(S(w,z))$ en el dominio de z obtendremos perfiles de $\alpha_z(w)$.

Otra posibilidad será obtener un ajuste polinómico en frecuencia (frecuencia angular w) de $\alpha_z(w)$ para la extracción de los coeficientes que mejor se ajusten al sistema de ecuaciones para estimar la mejor dependencia del coeficiente de atenuación con la frecuencia w .

APLICACIÓN

Para comprobar la aplicabilidad de la estimación de la atenuación de una material según el esquema para obtener perfiles con la profundidad, se tomaron dos probetas de pasta de cemento CEMII 42.5 con distintas relaciones agua/cemento (a/c) 30% y 45% realizándose 10 registros ultrasónicos en cada una de ellas en régimen de pulso/eco. La frecuencia nominal del transductor es de 10 MHz.

Se utilizó el espectrograma para estimar el $\log(S(w,z))$ con un promediado de 10 adquisiciones. El bloque ECDZ consiste en un diferenciador en el dominio de z y sorteamos la dependencia con w estimando la *atenuación media* en la banda de 15-17 MHz de la señal recibida. El motivo de haber elegido estas altas frecuencias se justifica por el hecho de que justo en ese rango el comportamiento de la atenuación con la frecuencia es donde es muy diferente para los dos tipos de relaciones agua/cemento, o lo que es lo mismo, distinta porosidad.

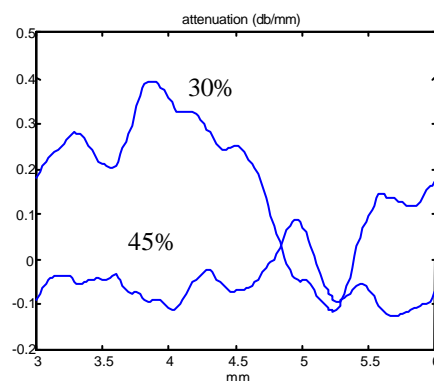


Figura 4. Perfiles de atenuación para dos probetas de pasta de cemento.

En la figura 4 se muestra los perfiles de la atenuación media para cada tipo de pasta. El perfil de atenuación para 45% denota una atenuación menor y más constante que en el caso de 30% donde se observa una atenuación mayor desde la profundidad inicial en la primera parte de registro hasta que el ruido granular desaparece a los 5 mm.

AGRADECIMENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Administración Española en el marco del proyecto CICYT DPI2000-0619.

REFERENCIAS

1. Sanjie J., Bilgutay, N.M., Wang T. Signal Processing of Ultrasonic Backscattered Echoes for Evaluating the Microstructure of Materials, Signal Processing and Pattern Recognition in Nondestructive Evaluation of Materials, Ed Chen CH., Springer-Verlag Berlin 1988, pp 87-100.
2. He, P., Greenleaf, J.F., Attenuation estimation on phantoms: stability test, Ultrason. Imaging, 8,1-10 (1986)
3. jang, H.S, Song, T.K., Park, S.B., Ultrasound attenuation estimation in soft tissue using entropy difference of pulsed echoes between two adjacent envelope segments, Ultrasound. Imaging, 10, 248-264 (1988).
4. Rasmussen , K.B., Maximun likelihood estimation of the attenuated ultrasound pulse, IEEE Trans. On Signal Processing, 42, 220-222 (1994).
5. Kuc, R.,Estimating acoustic attenuation from reflected ultrasound signals; comparison of spectral-shift and spectral difference approaches, IEEE Trans. On ASSP , 32, 1-6 (1984)
6. Kuc, R., Processing of diagnostic ultrasound signals, IEEE ASSP Magazine, 19-26 (Jan 1984)
7. Baldeweck, T., Laugier, A., Herment, A., Berger, G., Application of autoregressive spectral analysis for ultrasound attenuation estimation: interest in highly attenuating medium, IEEE Trans. On UFFC, 42, 99-109 (1995)
8. Girault JM, Ossant F., Ouahabi A., Kouamé D., Patat F., Time varying autoregressive spectral estimation for ultrasound attenuation in tissue characterization , IEEE Trans on UFFC, 45, 650-658 (1998)
9. Sanjie J., Wang T., Bilgutay N.M., Analysis of homomorphic processing for ultrasonic for ultrasonic grain signals, IEEE Trans on UFFC, 36, 365-375 (1989)
10. Wang T., Sanjie J., Analysis of low-order autoregressive models for ultrasonic grain noise characterization, IEEE Trans on UFFC, 38,116-124 (1991)
11. Gosálbez J.; Miralles R.; Fuente J.V., Vergara L. , Estudio comparativo de métodos de estimación del pulso ultrasónico en análisis no destructivos de materiales. (2001)