Difracción, Speckle y Periodicidad en Coherencia de Señales Ecográficas

A. Arzúa, C. Negreira

Laboratorio de Acústica ultrasonora –I.Física-F. Ciencias-UDELAR

A.Arzúa, alicia@fisica.edu.uy, C. Negreira, carlosn@fisica.edu.uy, Phone +598 2 525 8624

Abstract

We analize the spatial coherence of echographic ultrasonic signals and its relation with the coherence of the scattering medium. In previous work we developed a (space-time domain) theory of coherence that support the spected results in the frame of the spatial compound experiment we carried out. In the present work we show the retro-propagated ultrasonic field coherence coefficient diagram from two type of media. One of them, a poliurethane sponge, is a highly randomly distribution of inhomogeneties. This kind of medium was choosen because it is responsable of the speckle observed in images. We show the coincidence of its measure coherence profile with the coherence profile of the propagation term, as it is predicted by the theoretical formula. The other distribution we consider is a plane array of paralel long cilinders, with period grater than the central wavelength of the indagated ultrasonic pulse. The correlation of a periodic distribution is also periodic with the same period. In turn, the ability to observe this periodicity depends on the step of scan and also on an appropiate selection of the adquisition surface.

Keywords: coherencia, ecografía, ultrasonido, procesamiento de señales

Introducción

La distribución espacial de estructuras reflectoras de ondas ultrasónicas ya sea en tejidos biológicos o en materiales compuestos de aplicación industrial, abarca el interés de varios investigadores. Un ejemplo de interés clínico lo constituye la distribución de colágeno en tejidos biológicos. Se encuentra que el colágeno es responsable de variaciones elásticas en tejidos biológicos [1], las variaciones de concentración de colágeno generan variaciones locales en la compresibilidad acústica dentro del tejido comportándose como fuentes de reflectividad acústica. También de interés clínico (en diagnóstico de carcinoma en mamas) es la distribución y tamaño de pequeños cristales de calcio (microcalcificaciones) que se forman en el organismo por diversos mecanismos [2]. Para una descripción apropiada de las observaciones en la imagen ecográfica (como puntos brillantes y oscuros en la formación de imagen en modo B-Scan, cuya distribución varía con el arreglo de transductores, su forma y tamaño) sirvió de sustento el desarrollo alcanzado en el área de la Optica. Es así que se trata al fenómeno de speckle observado en imaginería ultrasonora, adaptando el modelo de Goodman de la teoría óptica de speckle en láser [3] al caso de pulsos cortos (de banda espectral ancha) de ultrasonido [4]. También se desarrollan nuevos modelos estadísticos (de primer y de segundo orden) para las distribuciones de amplitud e intensidad de señales ecográficas asociadas a distintos tipos de distribución de inhomogeneidades [5], atendiendo en particular la distribución espacial de estructuras regulares [5, 6]. A su vez, los modelos de formación de señal ecográfica incluyen una función característica de la estructura espacial de inhomogeneidades del medio, responsable del surgimiento de ecos retrodifundidos [1,7:10]. Otro aporte sustantivo de la óptica fue brindarnos la historia de su controversial camino hacia una definición matemática del concepto de coherencia entre ondas de luz, además dejar plasmada la idea de que la distribución de coherencia espacial se propague. El teorema de Van Cittert-Zernike de la óptica, que explica la propagación de la coherencia desde una fuente espacialmente incoherente de luz (cuasi-monocromática), fue adaptado al marco experimental de los ultrasonidos, sonorizando una región de un medio incoherente donde se focaliza un arreglo de transductores [8] . En general para diferentes configuraciones experimentales y medios con distribución espacial genérica de su propiedad de reflectividad acústica, fueron deducidas relaciones matemáticas entre la correlación espacial del campo retrodifundido por la distribución reflectora con la correlación espacial de la función de reflectividad. Tales fórmulas dependen del sistema y método empleado para la formación de imagen ecográfica. Las teorías implicadas fueron desarrolladas tanto en el dominio espacio-frecuencial (abordada con un enfoque estadístico) [9], como en el dominio espacio-temporal [10].

ISBN: 9974-0-0337-7

En el siguiente trabajo presentado mostraremos diferentes aspectos resultantes de esta teoría [10] en un experimento de composición espacial, haciendo un barrido espacial con un transductor mono-elemento. El experimento de composición espacial consiste en adquirir señales ecográficas del medio de análisis, en cada posición del transductor, y procesar las señales por correlaciones temporales y espacial para obtener un coeficiente de correlación medio de ondas arribadas a una superficie de barrido. La coherencia es interpretada a través de un coeficiente de correlación adimensionado al cual llamaremos coeficiente de coherencia.

Mostramos resultados de experiencias de laboratorio con un medio de propiedades de reflectividad incoherente y también con una distribución plana periódica. También medimos la forma del perfil de correlación espacial del campo del transductor utilizado, en planos a diferentes alejamientos del mismo. Esta medida es útil a la hora de decidir si un medio puede calificarse como de reflectividad incoherente (con correlación espacial nula excepto para dislocamiento espacial nulo), puesto que, según predice la teoría, el perfil de coherencia del campo reflejado en un medio de respuesta incoherente se asemeja a la correlación del campo de difracción reflejado por un dispersor puntual a la misma profundidad.

Destacamos que en la forma del perfil espacial de la coherencia, influyen: el fenómeno de difracción, el paso de barrido y la superficie de referencia para el barrido.

Metodología experimental

Utilizaremos un método de composición espacial para la obtención de señales ecográficas y su procesamiento.

Los experimentos fueron realizados posicionando los medios de análisis dentro de una cuba con agua a temperatura ambiente. Utilizamos un transductor plano, mono-elemento, de frecuencia central 3.5 MHz (2 MHz de ancho de banda). El movimiento del transductor es comandado por motores paso a paso. En la implementación del método elegimos una única dirección de barrido sobre la cual desplazamos al transductor enfrentado al medio. En cada posición de barrido, trabajando en modo ecográfico, se adquiere una señal retrodifundida por el medio, la cual se almacena para procesar.

Teoría y procesamiento

La demostración de los resultados de la teoría que mostraremos fueron publicados en trabajos anteriores [10].

Siendo $P(\vec{s},t)$ la señal temporal adquirida por el transductor ubicado con su centro en la posición $\vec{s}$ cuando está el medio presente, $\chi(\vec{r},t)$ la función de respuesta de un dispersor del medio y $D(\vec{r},t)$ una función característica de la difracción del pulso del transductor reflejado en el punto $\vec{r}$ en su propagación ida y vuelta, junto a la respuesta acustoeléctrica del transductor, la función de correlación del campo retrodifundido para un retardo espacial $\vec{d}$ constante, entre posiciones de adquisición, está dada por la expresión simbolizada

$$C_{PP}(\vec{d},0) = \left[C_{\chi\chi} *_e *_t C_{DD}\right](\vec{d},0) \qquad (1)$$

donde los símbolos $*_e$ y $*_t$ refieren a productos de convolución en las variables espacial y temporal respectivamente, y donde para una función $X(\vec{r},t)$ su correlación espacio-temporal está dada por:

$$C_{XX}(\vec{s},\tau) = \int\int X(\vec{\eta},t)X(\vec{\eta}+\vec{s},t+\tau)d\vec{\eta}dt$$

en la que las integrales están definidas sobre los dominios de variación de las respectivas variables. El perfil de gráfico de correlación del campo retrodifundido tendrá un ancho que depende del ancho de correlación de la función D y del ancho de correlación del medio χ. En particular en ancho de C_{DD} está asociado a la forma del campo difractado en la región donde se encuentra el medio. De la expresión de (1) puede verse que el campo retrodifundido por un medio de reflectividad incoherente (o no correlacionado) tiene un ancho de correlación mínimo dado por el tamaño de correlación del campo de difracción.

Para el procesamiento por composición espacial en la práctica, en una ventana de *Nt* datos $P_j(t_n)$ de la j-ésima señal digitalizada, calculamos la correlación temporal a retardo temporal nulo

$$r_{j,k} = \sum_{n=1}^{Nt} P_j(t_n)P_k(t_n) \qquad (2)$$

y definimos un coeficiente de coherencia adimensionado que implementamos según la fórmula:

$$c(i) = \frac{\sum_{j=1}^{N-i} r_{j,\,j+i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N-i} r_{j,j} \sum_{j=1}^{N-i} r_{j+i,\,j+i}}} \qquad (3)$$

Experiencias

Realizamos experiencias de composición espacial en tres medios. Estudiamos una esponja de poliuretano, un arreglo plano de alambres paralelos y un único alambre. Utilizamos un transductor plano circular de 7 mm de radio, de frecuencia central 3.5 MHz (2 MHz de ancho de banda). La excitación fue con un semiciclo de onda cuadrada, resultando un pulso de emisión de aproximadamente 1.2 us. La frecuencia de muestreo de señales es de 40 MHz.

Resultados: esponja poliuretano

En la Figura 1 se muestra la imagen en escala de intensidad de grises de un conjunto de señales ecográficas obtenidas por barrido espacial de una esponja de poliuretano.

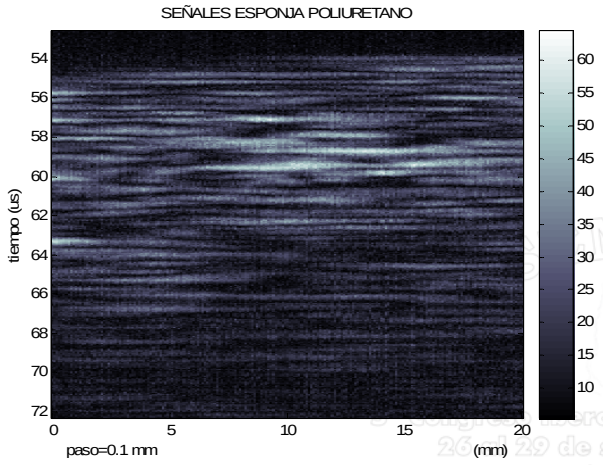

Figure 1. Señales pulso-eco de barrido espacial de una esponja de poliuretano, espesor 1.5 cm, colocada a 42 mm del transductor. Transductor plano frecuencia central 3.5 MHz.

Se intentó realizar el barrido sobre una dirección aproximadamente paralela a la superficie de la esponja (aunque el paralelismo no es perfecto), ubicada ésta aproximadamente a 42 mm de la cara del transductor. La superficie de la esponja es de 20cm * 20 cm. El tamaño del medio es mayor que la longitud barrida, por lo cual en todas las posiciones la sombra del transductor quedó contenida en el medio. El paso de barrido espacial fue de 0.1 mm

El procesamiento aparece en la Figura 2.

El gráfico superior de la Figura 2 corresponde a la potencia de las señales de esponja, el eje horizontal representa el desplazamiento espacial. El gráfico inferior corresponde al coeficiente de coherencia obtenido del procesamiento por composición espacial en función del dislocamiento (o retardo espacial). El ancho de este perfil de coherencia, medido a altura mitad, es de 3.6 mm. En la discusión compararemos este tamaño con un gráfico estimativo del término de difracción que aparece en la fórmula (1).

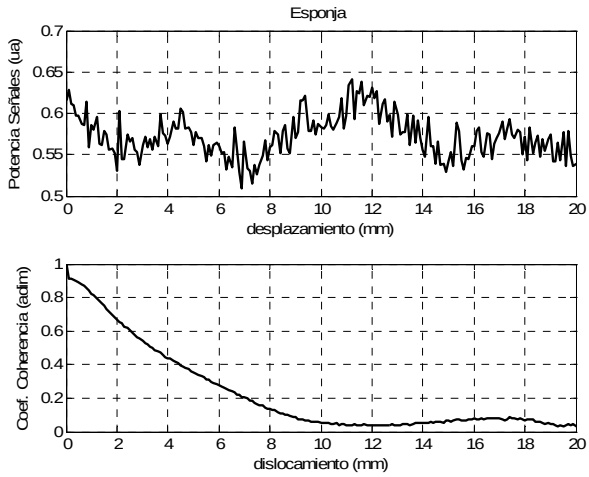

Figure 2. Procesamiento de señales ecográficas de esponja de poliuretano. Arriba: Potencia de cada señal vs. Desplazamiento del transductor. Abajo: Coeficiente de coherencia espacial vs dislocamiento espacial. El ancho medio del perfil de coherencia es de 3.6 mm.

Resultados: plano de cilindros periódicos

En la Figura 3 aparece la imagen en escala de grises de la amplitud de señales ecográficas de una distribución plana de cilindros largos de 0.6 mm de diámetro y dispuestos paralelos entre si con separación de 1.5 mm. En el desplazamiento del transductor se intento mantener su cara paralela al plano de los cilindros, a una distancia fija del mismo. La dirección del barrido es transversal al eje axial de los cilindros y el paso 0.1 mm.

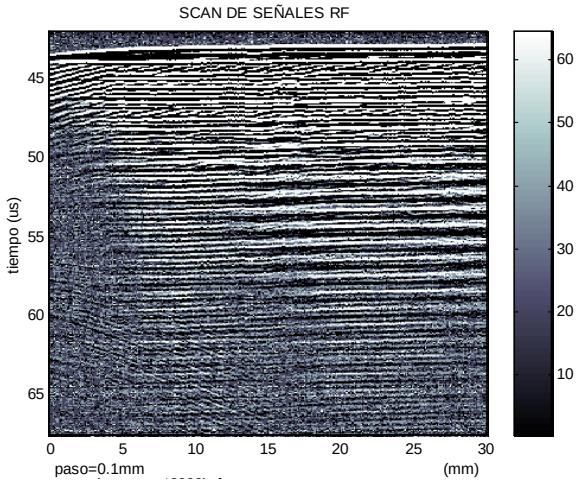

Figura 3. Imagen en escala de grises de un conjunto de señales ecográficas obtenidas por barrido espacial paralelo al plano de una distribución de cilindros de cobre (diámetro 0.6 mm), en dirección transversal al eje axial de los cilindros. La separación entre cilindros es de 1.5 mm. El barrido comienza con la cara del transductor parcialmente fuera de la distribución y puede notarse su efecto en la parte izquierda de la imagen (el borde del transductor comienza entrando en la sombra geométrica de la distribución).

En las primeras adquisiciones la cara del transductor no está contenida totalmente en la

sombra geométrica de la distribución, esto puede observarse en la parte izquierda de la imagen. De los 30 mm totales del barrido, solo 22 mm son ocupados por cilindros, (el transductor tiene un diámetro interno de 14 mm y un diámetro externo de 16 mm.)

El procesamiento de las señales de cilindros se muestra en la Figura 4. Correspondiendo el gráfico superior a la potencia media de tales señales en función del desplazamiento espacial y el gráfico de abajo al coeficiente de coherencia espacial respectivo en función del dislocamiento.

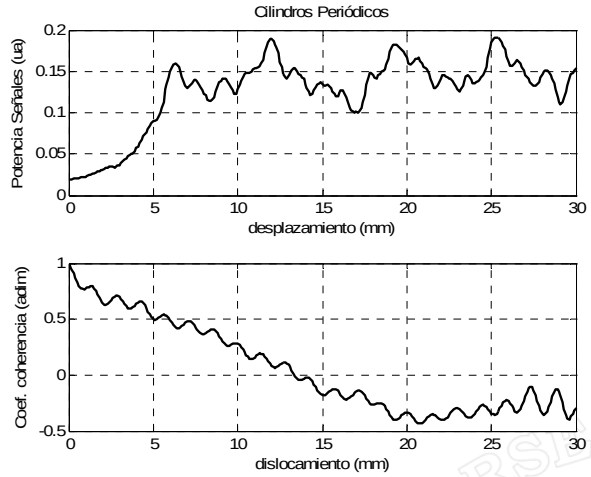

Figure 4. Procesamiento de señales ecográficas de cilindros periódicos, ubicados a 35 mm del transductor. Arriba: Potencia de cada señal vs. Desplazamiento del transductor. Abajo: Coeficiente de coherencia espacial vs dislocamiento espacial.

En el gráfico de coherencia de la Figura 4 aparecen oscilaciones acordes a la periodicidad del medio, con un error (visual) de medio ciclo en 15 mm, lo cual correspondería a un error del 4.7 % si no existiera error en la periodicidad debido a la construcción de la red. Debemos destacar que realizando la experiencia con un paso de barrido mayor a 0.6 mm las oscilaciones fueron poco detectables visualmente. O sea, al aumentar el paso de dislocamiento en la correlación, los detalles de estructura fina se pierden. Una observación a destacar está en los valores negativos del coeficiente de coherencia, no esperados para un barrido perfectamente paralelo al soporte plano del medio. Otra observación visual es un decaimiento con las oscilaciones en torno a una pendiente casi constante hasta los 21 mm (aproximadamente). Esto debe compararse con el tamaño neto barrido conteniendo al medio (22 mm).

Resultados: Un único cilindro

Para tener una idea de los efectos de propagación en los perfiles de coherencia presentamos en la siguiente figura un estudio de las señales ecográficas del barrido espacial en dirección transversal a un único cilindro de diámetro 0.6 mm. Se adquirieron señales de barrido colocando el cilindro a dos alejamientos del transductor: 35 mm y 75 mm. En los dos gráficos superiores de la Figura 5 se graficó la potencia media de las señales del barrido correspondientes a ambos alejamientos, mientras en los gráficos inferiores de la misma figura se representan los respectivos coeficientes de coherencia. El diámetro del transductor es de 14 mm. El ancho a la base del perfil de coherencia es de 10 mm aproximadamente, su ancho medio es menor para el campo lejano.

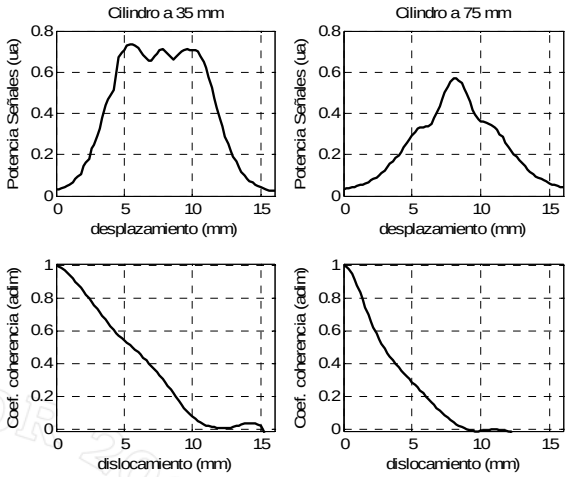

Figura 5. Procesamiento de señales de barrido transversal a un cilindro de cobre de diámetro 0.6 mm. Los gráficos de la izquierda corresponden a la potencia media y al coeficiente de coherencia espacial correspondiente para el cilindro alejado a 35 mm de la cara del transductor. Los gráficos de la derecha corresponden a idénticos procesamientos para el mismo cilindro ubicado a 75 mm de la cara del transductor. Puede observarse la diferencia entre el ancho medio de los correspondientes perfiles de coherencia.

Discusión

En los gráficos de coeficiente de coherencia para la esponja se midió un ancho de 3.6 mm a altura mitad. La esponja está ubicada con su primera superficie a un alejamiento medio de 42 mm (aproximado) del transductor con un espesor (en profundidad). Consideramos dos alejamientos desde el transductor supuestos en el intervalo ocupado por el espesor de la esponja, estos son: 45 mm y 55 mm. Diagramamos el perfil de coherencia dado por un elemento de pequeña talla medida en la dirección de barrido (un cilindro de 0.6 mm de diámetro), esto se realiza para ambas distancias. Este experimento pretende reproducir el ancho de coherencia asociado al campo difractado al mismo alejamiento (en promedio) en que se encuentra la esponja. En la Figura 6 se muestran los resultados del procesamiento por composición espacial.

ISBN: 9974-0-0337-7

Los anchos de coherencia medidos son: 3.2 mm para un alejamiento de 45 mm del cilindro respecto del transductor y 3.4 mm para un alejamiento de 55 mm de relativo al mismo. Comparando ahora estos anchos con el correspondiente medido para la coherencia propagada desde la esponja (3.6 mm) difieren en pocas décimas de mm entre si. Concluimos entonces que la correlación de la esponja es propia de un medio incoherente (por aportar ancho ínfimo al resultado), ya que el ancho mínimo predecible por la teoría es debido a la propagación. Matemáticamente, este ancho mínimo ocurre cuando la correlación de reflectividad del medio da el resultado (ideal de) una delta de Dirac.

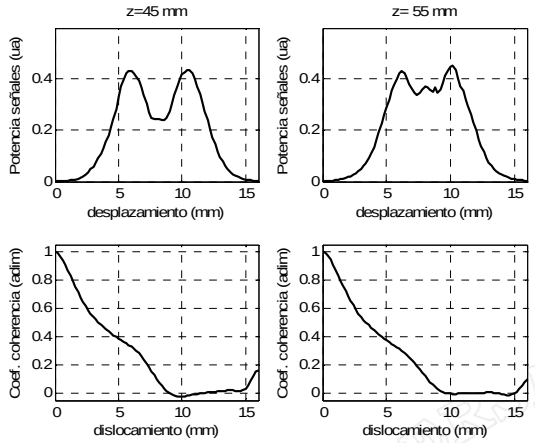

Figura 6 . Coherencia transversal a un cilindro de diámetro 0.6 mm. Estimación del mínimo ancho de coherencia esperado para un medio ubicado a distancias entre 45 y 55 mm del transductor. Nótese que en este rango de alejamientos la forma del perfil de coherencia no varía notoriamente, el valor 0.5 del coeficiente corresponde a un ancho de 3.4 mm para alejamiento z=45 mm y de 3.2 mm para z=55 mm.

Yendo al caso del experimento con cilindros periódicos es de esperar que el efecto del ancho del diagrama de propagación genere una pérdida de resolución en las oscilaciones. Esta afirmación es consecuente con el producto de convolución que aparece en la fórmula (1). En la Figura 3 pueden resaltarse dos características que tendrán incidencia en el aspecto del gráfico de coherencia.

Una característica es debida a la difracción y aparece visible sobre el lado izquierdo de la imagen, donde el transductor no ha ingresado por completo a la región estacionaria de la distribución. El efecto de borde resaltado en la figura es típico de la propagación y por lo tanto aparece también debido a todos los reflectores del medio haciendo que las ondas provenientes de emisores a una misma profundidad alejada del transductor se comporten bien correlacionadas. Aunque como se observa en la Figura 3 al comienzo de la imagen se ve el efecto de ondas cilíndricas que no interfieren con pares simétricos, aún se observa periodicidad en el gráfico de coeficiente de coherencia espacial.

El efecto de borde queda bien manifiesto en la coherencia propagada asociada a medios altamente coherentes cuyas dimensiones son menores que el tamaño de la superficie (o longitud) barrida, generando valores de correlación que decaen para dislocamientos mayores que la dimensión espacial del medio.

Otra es la reflexión especular, corresponde a la parte de señal asociada a la primera reflexión del eco incidente en todos los cilindros presentes. Esa debería ser, sobre la superficie de adquisición, una componente coherente para retardo temporal nulo, o sea, si el barrido del transductor fuera realizado en un plano estrictamente paralelo al plano de los cilindros. Si en el cálculo del coeficiente de coherencia espacial son tenidas en cuenta solo correlaciones temporales a retardo temporal nulo, entonces, por idénticos que sean los pulsos, pequeños desfasajes pueden generar disminución del coeficiente de correlación, pudiendo arrojar un valor negativo del coeficiente. Para construir el gráfico de coherencia de la siguiente Figura 7, hicimos un procesamiento previo al conjunto de señales, haciendo coincidir los primeros máximos entre todas las señales, y seleccionando una ventana temporal desde tal coincidencia. En ésta se observa que los coeficientes de coherencia ya no toman valores negativos, los cuales pudimos corroborar se debían al desfasaje entre los pulsos por la falta de paralelismo entre los planos del medio y de barrido del transductor. Es así que entendemos el por qué es necesario definir una superficie de referencia cuando se analiza la coherencia espacial.

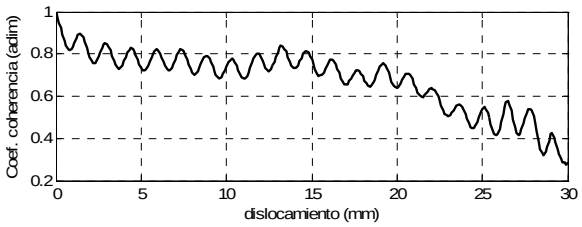

Figura 7. Coeficiente de coherencia de señales ecográficas de distribución de cilindros periódicos, luego de hacer coincidir el primer máximo entre todas las señales y quitar primera parte de reflexión coherente de las señales. Notar la diferencia de amplitudes extremas de oscilación, con la de la figura 4.

Nótese que observando cuidadosamente, el dislocamiento correspondiente al décimo máximo entre las oscilaciones cae mas próximo a los 15 mm que en el gráfico de la figura 3, disminuyendo así el error de estimación del período (1.5 mm) de la distribución (el espaciado se ve mayor cuando los planos están inclinados).

A su vez (aunque no mostramos el resultado), pudimos observar que quitando el pulso especular

en las señales, las crestas de oscilación en la correlación se hacen mas pronunciadas.

Este pre-procesamiento no fue posible de realizar en las señales de esponja por no observarse tal coherencia (espacio-temporal) de especularidad en la superficie de adquisición.

Conclusión

Verificamos que el perfil de coherencia medido se afecta por la propagación, el campo difractado a un alejamiento dado del transductor cambia su distribución de intensidad debido a su apertura finita y con ello su perfil de coherencia. Esto lo hicimos midiendo la coherencia propagada transversal a un cilindro de pequeño diámetro (del orden de la longitud de onda media de emisión del transductor). El mínimo ancho de correlación medible está sujeto al tamaño y forma del transductor, al pulso que éste emita y la distancia que deba viajar el pulso para ser reflejado (ya que de estos parámetros dependerá la distribución de interferencias de las distintas componentes frecuenciales).

Dedujimos, a partir del ancho de correlación de las señales por él reflejadas y propagadas y de su comparación con el ancho de coherencia asociado a la propagación, que un medio, aunque extenso, es incoherente. Ese fue el resultado del experimento de composición espacial con una esponja de poliuretano.

Vimos que una estructura regular puede manifestar su regularidad en el coeficiente de coherencia espacial, esto dependerá de cuánto pueda afinarse el paso de barrido para resolver la estructura periódica. Aunque el tamaño medio del campo a la distancia en que se encuentra la red de cilindros es el orden del radio del transductor, las interferencias coherentes aportan oscilaciones a la correlación espacial.

Por otro lado constatamos que la medida de la reflectividad de un medio por el método de composición espacial depende de la superficie de referencia. La conclusión es que el perfil observado depende del soporte de coherencia propagado sobre la superficie de referencia donde de mueva al transductor.

Referencias

[1] L. Fellingham and F. Sommer, *Ultrasonic characterization of tissue structure in the in vivo human liver and spleen,* IEEE Trans. Sonic and Ultrasonic, Vol SU31, n.4 (1984), 418-428.

[2] M. Anderson, M. Soo, R. Bentley and G. Trahey, *The detection of breast microcalcifications with medical ultrasound,* J. Acoust. Soc. Am. Vol 101(1) (1999), pp 29-39.

[3] J. W. Goodman, *Statistical Optics in Laser Speckle Patterns. Laser Speckle and Related Fenomena, J. C. Dainty,* Ed. Berlin, N. Y. Springer Berlag, 1975, pp 9-75.

[4] C. B. Burckhardt, *Speckle in Ultrasound B-Mode Scans,* IEEE Trans. Sonic and Ultrasonic, Vol SU25, n.1, (1978), pp 1-6

[5] R. Wagner, M. Insana and D. Brown, *Statistical properties of radio- frequency and envelope-detected signals with applications to medical ultrasound,* J. Opt. Soc. Am., Vol A4(5) (1987), pp 910-922.

[6] K. Donohue, J. Bressler , T. Varghese and N. Bilgutay, *Spectral autocorrelation in ultrasonic pulse echo signal processing,* IEEE Trans. Ultras. Ferroel. And Freq. Control Vol 42(3) (1995), pp 451-463.

[7] J. Jensen, *A model for the propagation and scattering of ultrasound in tissue,* J. Accoust. Soc. Am., Vol 89 n.1 (1991), pp 1-6.

[8] R. Mallart and M. Fink, *The Van Cittert-Zernike theorem in pulse echo measurements,* J. Acoust. Soc. Am. Vol 90(5) (1991), pp 2718-2727

[9] A. Derode and M. Fink, *The notion of coherence in optics and its application to accoustics,* Eur.J. Physics, Vol 15 (1994) , pp 81-90.

[10] A. Arzúa and C. Negreira, *Detection of elements with coherent reflectivity inside a multiscatterers incoherent media,* Ultrasonics Vol 40 (2002), pp 997-1008

ISBN: 9974-0-0337-7