ID 4322

CONFORMADO DE SEÑALES BASADO EN EL ANÁLISIS DEL COARRAY PARA LA REDUCCIÓN DE ARTEFACTOS EN IMAGEN ULTRASÓNICA.

Óscar Martínez-Graullera, Virginia Yagüe-Jiménez, Alberto Ibáñez Rodríguez,

Montserrat Parrilla Romero

Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información "Leonardo Torres Quevedo", Consejo Superior de Investigaciones Científicas. oscar.martinez@csic.es

Resumen

La respuesta de un material o componente a la propagación de un frente ultrasónico a través del mismo permite obtener una medida indirecta de sus características estructurales. El análisis más característico se realiza a través de la generación de imágenes ultrasónicas que permiten la correcta localización y dimensionamiento de los defectos internos del componente bajo inspección. No obstante, la propagación de ultrasonidos por el material genera, debido a la difracción, un gran número de artefactos que distorsionan la imagen y exigen del operador un alto nivel de experiencia para la correcta interpretación de la misma.

Este trabajo desarrolla una solución para reducir el impacto de estas aberraciones. Para ello toma como base el análisis de la redundancia en el coarray y la reinterpretación de los procesos de conformación de haz como la búsqueda de un sesgo sobre una distribución espacial asociada.

Con objeto de mostrar la bondad de la técnica se examina una probeta de aluminio característica para END con una hilera de dobles taladros. La técnica propuesta muestra que respecto a la imagen convencional es capaz de atenuar tanto lóbulos secundarios como de reducir el nivel de ruido de la imagen.

Introducción

La imagen ultrasónica se compone a partir de una estima de la reflectividad de la escena obtenida de los ecos recibidos de las ondas propagadas por el material. En sistemas de phased arrays de N elementos esta estima se obtiene a partir de la suma de las N señales recibidas organizadas según una ley de focalización que permite centrar el punto de interés sobre determinada zona de la imagen. Coordinando esta ley tanto en emisión y recepción conseguimos que si existe un reflector sobre su posición esta suma sea coherente. En el caso de usar técnicas de apertura sintética, donde todas las señales se obtienen de forma desagregada, componiendo un conjunto de N^2 señales Full Matrix Capture (FMC), es posible ajustar esta ley de focalización sobre todos los puntos de la imagen siguiendo un algoritmo conocido como Total Focusing Method (TFM). Obteniendo así la reflectividad

de la imagen completa. A la técnica de ordenación y suma se la conoce popularmente como conformador Delay and Sum (DAS) [1, 2].

El DAS es un conformador basado en la media y aunque tiene un comportamiento muy robusto, no es capaz de filtrar los efectos de la difracción u otros tipos de aberraciones característicos de la imagen ultrasónica. Estas aberraciones son causadas por la propagación de frentes de onda que se encuentran fuera de foco y que no están presentes en todo el conjunto de señales del punto considerado. Esta situación es semejante a un problema multicamino, característico de radiocomunicaciones, donde sobre la señal además de la comunicación directa existen réplicas de misma, decaladas en el tiempo respecto a esta, que enmascaran la señal de interés [3, 4]. El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta que permita atenuar el efecto de estas aberraciones y al mismo tiempo obtener un ajuste más preciso de la estima de reflectividad. Para ello, se analiza el proceso de conformación del FMC y define la estima de la reflectividad como la obtención de una componente de continua común a todas las señales del conjunto.

En este sentido definimos al FMC como:

$$FMC(\vec{x}) : \left\{ s_{ij}(\tau), \tau = \frac{x - x_i}{c} + \frac{x - x_i}{c} \quad \forall i = 1...N, j = 1...N \right\} \tag{1}$$

donde, x es el punto del espacio donde se quiere medir la reflectividad, $s_{ij}(t)$ es la señal correspondiente a emitir el elemento i y recibir el j, y τ es el tiempo de que corresponde a la propagación de la señal desde el emisor al receptor pasando por el punto en cuestión. Además, según la hipótesis establecida las señales quedan compuestas como:

$$s_{ij}(\tau) = m + n_{ij}(\tau) \tag{2}$$

donde, m es el valor de continua que estamos buscando y $n_{ij}(\tau)$ es un término que engloba todo aquello que consideramos ruido. Incluyendo además del propio ruido térmico, otro ruido de naturaleza ultrasónica que constituyen mayoritariamente los lóbulos secundarios. Esto son frentes de propagación no coherentes sobre el punto bajo análisis.

Sobre esta base formulamos el DAS como:

$$DAS = \left| \sum_i^N \sum_j^N s_{ij}(\tau) \right| = \left| N^2 m + \sum_i^N \sum_j^N n_{ij}(\tau) \right| \tag{3}$$

Cuando $n_{ij}(\tau)$ está formado por ruido térmico el segundo término tiende a cero y m adquiere relevancia. Pero cuando este término contiene elementos de otros frentes de onda, o de distintos instantes de un mismo frente, este término puede alcanzar valores grandes componiendo lóbulos secundarios u otros artefactos que ocultan el valor real de m. Nuestro objetivo es reducir ese segundo término mediante la atenuación del efecto de lóbulos

secundarios en la imagen y conseguir una reducción de artefactos. Se espera lograr así una mejorara del contraste en la imagen.

Reducción de artefactos en la imagen

Para reducir estos artefactos consideramos el concepto array disperso. Los arrays lineales dispersos son arrays lineales donde con el fin de reducir la complejidad del sistema se han eliminado una serie de elementos. Estos arrays ofrecen sobre los lóbulos secundarios una estima de la reflectividad de la escena distinta de la que ofrece el array completo original [5]. Respecto a este, se pretende mantener ciertas características de su funcionamiento, especialmente la resolución lateral, a costa de sacrificar cierto rango dinámico. Lo interesante es que fuera del reflector generan patrones de interferencias diferentes entre sí.

La figura 1 corresponde a la envolvente de un a-scan de un reflector situado a 26mm de profundidad obtenida del TFM de un array lineal de 64 elementos (SNR por canal de 20dB). Para cada punto hemos calculado de forma aleatoria 100K arrays dispersos y sus valores se distribuyen entre las dos superficies de color separadas por el valor del DAS.

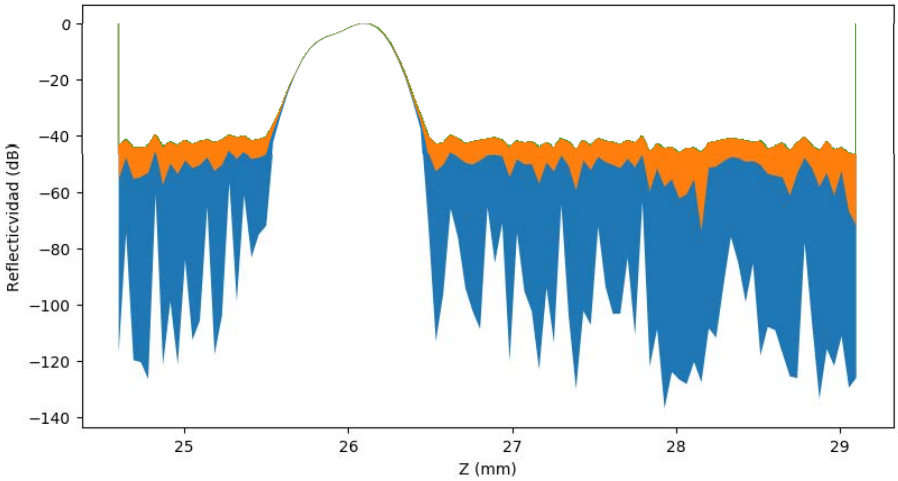

Figura 1. Distribución de valores de obtenidos a partir de un array de 64 elementos aplicando el TFM sobre el eje Z y un reflector a 26mm. Para cada punto de la línea se han calculado 100K arrays dispersos. La línea de separación muestra el valor del DAS para el array pleno.

Tomando un criterio agresivo, si de un punto tenemos un conjunto de posibles estimas de reflectividad podemos considerar que la más baja ofrece el resultado más seguro. Si sobre este punto ($m=0$) sólo tenemos ruido y/o un frente de onda introducido por un número reducido de señales, nuestro sistema tenderá a reducir el valor de reflectividad del punto respecto al DAS. Si lo que tenemos es un reflector ($m>0$) presente en la mayoría de las señales procesadas el valor obtenido será una estima inferior de m, pero siempre representativa de su valor. En la figura 1, sobre el blanco todos los arrays toman un valor semejante. Mientras que fuera del blanco pueden alcanzar una gran disparidad de valores.

Para hallar esta estima podemos implementar un proceso de optimización orientado a minimizar el valor del conformador. No obstante, este proceso es costoso, precisa criterios de parada que son dependientes del escenario y la imagen que se genera es susceptible de presentar ruido de alta frecuencia (ver el corte de la línea de mínimos en la figura 1).

Alternativamente a esta solución, dado que el eco además de presentarse sobre el punto de origen (y donde todas las señales lo sitúan y conforman) va a aparecer en otras posiciones de la imagen a modo de réplicas (desarrolladas esta vez por pocas señales), podemos analizar el proceso como un problema multicamino. Como tal, las estimas representadas por las amplitudes del conjunto de conformadores dispersos siguen una distribución de Rice. Caracterizando esta distribución podemos controlar el proceso de minimización del mapa de reflectividad mucho más eficientemente y suave.

Generación del espacio muestral

El tamaño de la apertura dispersa, aunque no debería ser inferior del 50%, es hasta cierto punto arbitrario. No obstante, con el objetivo de poder atacar el primer lóbulo secundario e intentar mejorar la resolución lateral se ha tomado un tamaño de ⅔ de la apertura.

Para generar nuestro espacio muestral hemos trabajado con el FMC(x) teniendo en cuenta las relaciones existentes entre los datos ligadas con su posición espacial dentro del coarray [6]. Estas relaciones permiten agrupar las muestras en función al par emisor/receptor que las genera. Así, podemos ordenar el conjunto FMC(x) sobre el coarray reduciendo nuestro conjunto de datos de N^2 a $2N-1$. A partir del cual tomando un subconjunto C_i de N_x valores aleatorios ($N_x < 2N-1$) como los elementos contribuyentes a obtener la estima de la reflectividad en función de un coarray disperso.

$$DAS_{c_i} = \left| N_P^2 m + \sum_i^N \sum_j^N n_{ij}(\tau) \quad : i + j \in C_i \right| \tag{4}$$

Donde N_p es el número total de señales que intervienen en el sistema y que depende de las posiciones activas determinadas por C_i en el coarray.

Repitiendo este proceso un número adecuado de veces, normalizando al número N_p de señales que entran en cada ciclo, obtenemos un conjunto amplio de estimas a partir de las cuales se genera un espacio muestral lo suficientemente grande como para poder obtener una estima de los parámetros que definen la distribución de valores en el punto de interés.

En la figura 2 se muestra una situación análoga a la figura 1 pero sobre la línea de focal que corresponde al blanco (Z=26mm) entre -10º y +10º en elevación. Es sobre esta línea donde se sitúan los principales lóbulos secundarios. Sobre los puntos señalados se ha representado además la correspondiente distribución de valores. Estas distribuciones, en concordancia con el modelo de un sistema multipath, se corresponden con la distribución de Rice. Se muestra además que el DAS converge hacia la mediana de la distribución cuando esta se acerca al blanco.

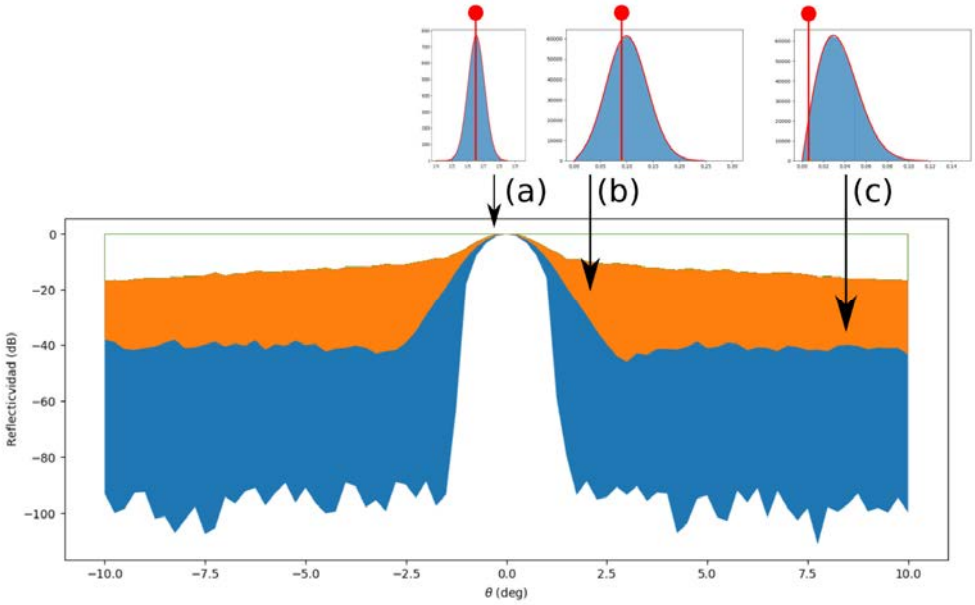

Figura 2. Distribución lateral de la franja sobre la que se distribuyen los valores de 100K arrays dispersos. Se han señalado tres puntos: (a) en el reflector (b) en la pendiente del haz principal (c) en un punto a 8 grados. El DAS está marcado en rojo.

La figura nos muestra por un lado como puede cambiar la distribución de reflectividades dependiendo de la configuración del array disperso; y por otro que es posible no sólo obtener más contraste sino también una mayor pendiente en torno al reflector y por tanto mayor definición en la imagen.

Distribución de Rice

La distribución Rice viene expresada como:

$$f(x|\nu,\sigma) = \frac{x}{\sigma^2}\exp\left(\frac{-(x^2+\nu^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{x\nu}{\sigma^2}\right) \tag{5}$$

donde, υ expresa la amplitud de pico de la señal dominante y σ^2 la varianza del ruido gaussiano que acompaña a la señal dominante. Esta expresión se utiliza habitualmente en comunicaciones para predecir el nivel de potencia recibida de una fuente directa, en condiciones donde existen variaciones de la misma causadas por componentes multitrayecto que se superponen a la señal dominante. En presencia de una señal dominante, esta expresión toma una forma que le acerca a una distribución Normal. En condiciones en que no existe una componente dominante esta expresión tiende a una distribución de Rayleigh (ver figura 2). En condiciones de puro ruido térmico la distribución tiende a una distribución normal con una media cercana a cero [3,4,7].

Conformador de Rice

Para desarrollar nuestra propuesta de Conformador de Rice (Rician Beamformer, RiB), estimamos los parámetros σ y υ que modelan la expresión (5) a partir de la distribución de

valores obtenida del cálculo (4) en un número suficientemente grande de casos [8]. Una vez determinado esta expresión, sobre la misma seleccionamos, de entre todas las posibles estimas, que valor del percentil determina cual es nuestro nivel de referencia. En la figura 3 se muestra este proceso para un valor sobre el punto (b) de la figura 2 sobre el que se ha seleccionado un percentil del 1%. En este caso el valor de la estima es muy cercano a cero acelerando la caída del haz principal fuera del punto de foco mejorando la definición de la imagen y presumiblemente la resolución lateral.

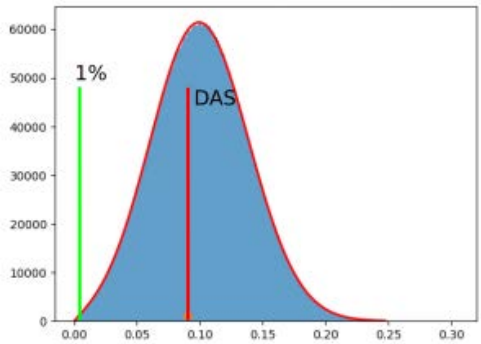

Figura 3. Distribución de estimas de los arrays dispersos. Se marca en rojo la posición del DAS y en verde el percentil de referencia que minimiza el resultado.

A modo de ejemplo, consideremos la imagen generada por un array de 64 elementos de un conjunto de puntos simulados en presencia de ruido (SNR por canal de 40dB). La escena simula un total de 14 reflectores, 13 de ellos distribuidos alrededor de un reflector que marca la referencia de 0dB. A su derecha a 4.5º tenemos uno a -26dB. En cada extremo, a 8º del de referencia, hay 3 centrados a -30dB. En las líneas superior e inferior hay distribuidos 3 en cada lado a -40dB.

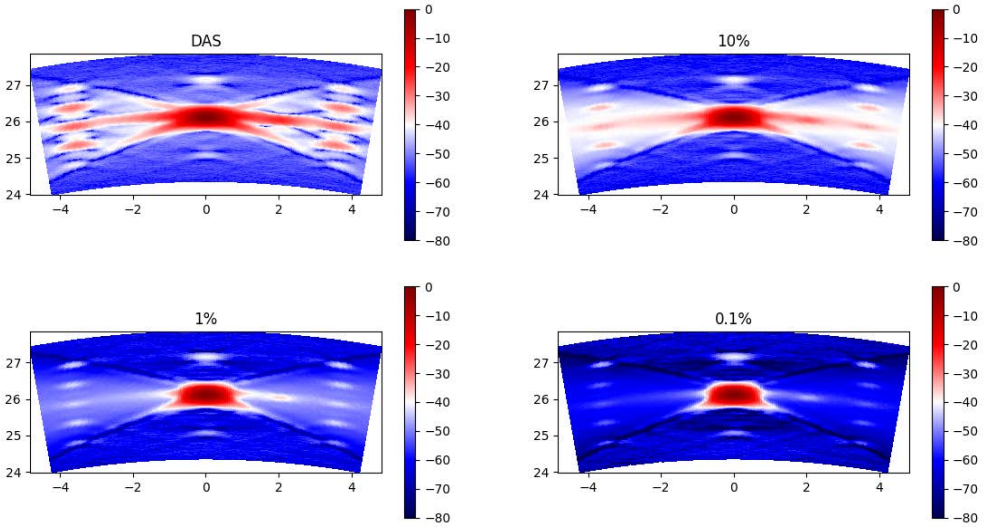

Figure 4. Resultados de aplicar los procesos de conformación sobre las señales sintéticas con 14 reflectores (1 a 0dB, 1 a -26dB, 6 a -30dB, 6 a 40dB). Se presenta el DAS y las RiB(10%), RiB(1%) y RiB(0.1%).

En la figura 4 se presentan los resultados de calcular el DAS y el RiB para los percentiles de 10%, 1% y 0.1%. Mientras que la imagen del DAS muestra una compleja estructura de lóbulos secundarios que complica la interpretación de la imagen, la disminución progresiva del percentil en las imágenes RiB reduce esta la estructura al tiempo que disminuye el ruido en la imagen. Los reflectores contenidos en el área de influencia de los lóbulos del blanco más representativo también se ven afectados por este proceso de atenuación, pero mantienen su contraste respecto al fondo que se homogeniza progresivamente con la disminución del percentil. Un aspecto interesante del RiB es que su aplicación cambia la estructura de los lóbulos suavizándola al tiempo que la hace más contrastada respecto a la zona donde sólo existe ruido.

Resultados experimentales.

Las pruebas experimentales se han realizado con una probeta de test de aluminio característica de END. En la pieza hay una secuencia de 7 pares de taladros distribuidos en diagonal a través de la misma. Sobre ella se ha usado un array lineal de 128 elementos operando a 5Mhz. Mediante una adquisición de apertura sintética se tomaron 16384 señales que componen el FMC y se compuso la imagen correspondiente por el procedimiento TFM.

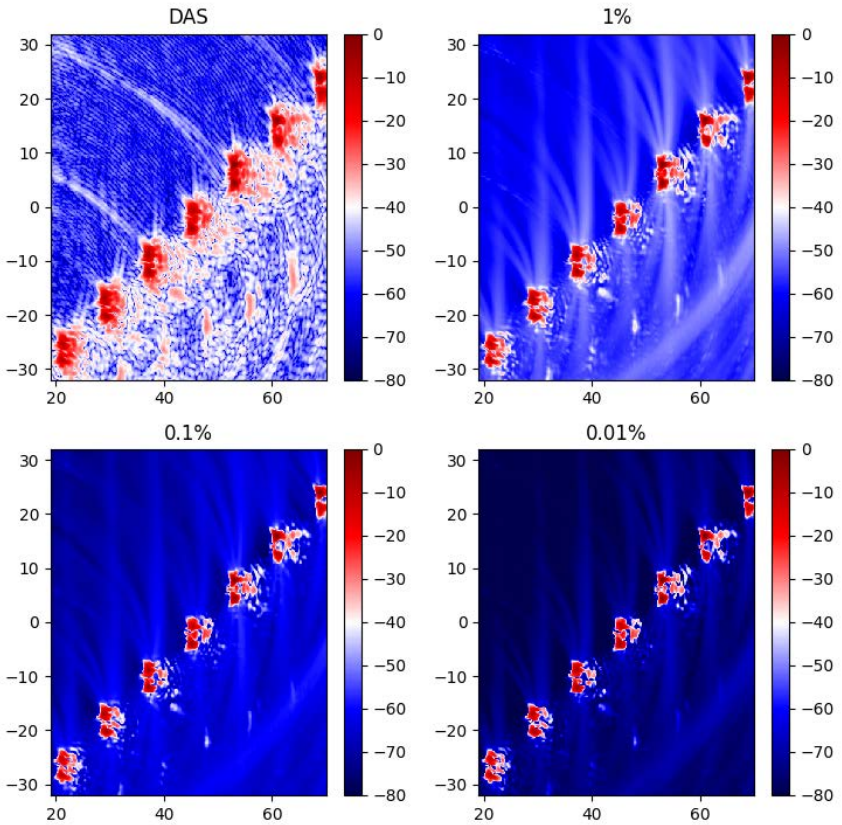

Figura 5. Imagen ultrasónica de una pieza de aluminio examinada a 5Mhz con un array lineal de 128 elementos. Las imágenes han sido compuestas por el TFM para el DAS y el RiB(1%), RiB(0.1%) y RiB(0.01%).

El aspecto más interesante de la aplicación del RiB es que genera una reducción drástica del ruido y de la estructura de rebotes que existe en la pieza. La imagen compuesta revela las zonas por donde progresan los lóbulos secundarios suavizándolos progresivamente con el valor del percentil. Los taladros destacan al reducir parcialmente las interferencias constructivas que se generan en cada par debidas a los rebotes múltiples.

La figura 6 muestra el resultado de proyectar los máximos sobre el eje Z del DAS y el RiB(0.01%). Se observa que la reflectividad de los taladros se mantiene con pocas variaciones respecto al DAS. No obstante, se ha obtenido una bajada significativa del fondo de ruido (30dB de mejora) y de la reflectividad entre los taladros (caen una media de 10dB), mejorando el contraste y la definición de los mismos.

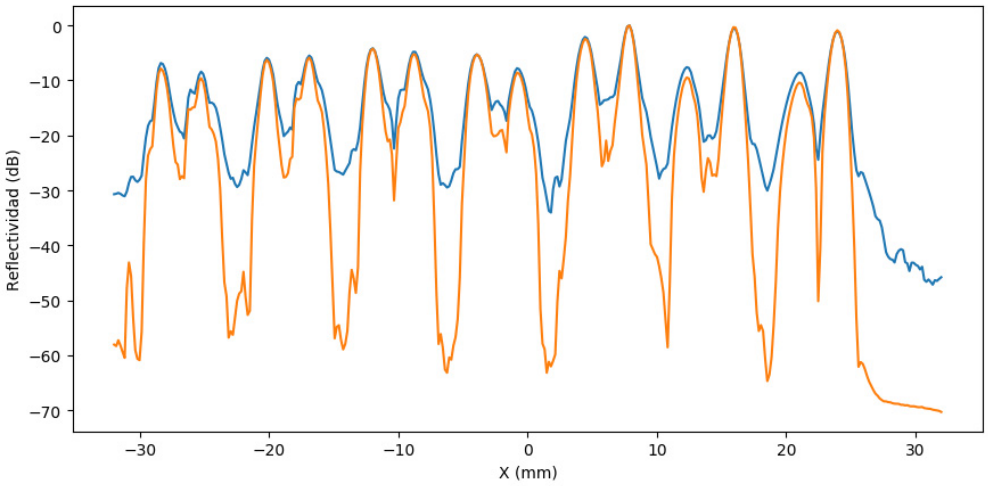

Figura 6. Corte lateral de la pieza proyectando el máximo cada valor de X a lo largo del eje Z. Se presenta el DAS en azul y el RiB(0.01%) en naranja.

Conclusiones

Los resultados muestran que es posible desarrollar un nuevo método de conformación a partir de las estimas obtenidas con arrays dispersos compuestos aleatoriamente. Los objetivos que se plantearon se han alcanzado mejorando el contraste y reduciendo de forma significativa el ruido en la imagen. Las pruebas han mostrado la viabilidad de esta técnica en situaciones reales.

La nueva técnica permite identificar claramente las zonas de la influencia de los lóbulos secundarios y abre la posibilidad de desarrollar técnicas de análisis más complejas, que adapten el percentil de referencia a esta naturaleza.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (AEI/FEDER, UE) a través del proyecto DPI2016-80239-R.

Referencias

(1) C. Holmes, B. W. Drinkwater y P. D. Wilcox, “Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation”, NDT & E International, vol. 38, no 8, pp. 701 - 711, 2005.

(2) D. Romero-Laorden, J. Villazón-Terrazas, O. Martínez-Graullera, A. Ibánez y M. Parrilla, “Analysis of Parallel Computing Strategies to Accelerate Ultrasound Imaging Processes”, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 27, no 12, pp. 3429-3440, 2016.

(3) Peter Bello, “Characterization of Randomly Time Variant Linear Channels,” IEEE Transactions on Communication Systems, vol. 11, no. 4, December 1963, pp. 360-393

(4) Bernard Sklar, “Rayleigh Fading Channels in Digital Communication systems. Part I: Characterization,” IEEE Communication Magazine, July 1997, pp. 90 – 100.

(5) G. R. Lockwood, Pai-Chi Li, M. O'Donnell and F. S. Foster, "Optimizing the radiation pattern of sparse periodic linear arrays," in *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 43(1), pp.7-14, 1996. doi: 10.1109/58.484457

(6) R. T. Hoctor y S. A. Kassam, “The unifying role of the coarray in aperture synthesis for coherent and incoherent imaging”, Proceedings of the IEEE, vol. 78, no 4, pp. 735-752, 1990.

(7) N. Youssef, Cheng-Xiang Wang, M. Patzold, I. Jaafar and S. Tabbane, "On the statistical properties of generalized Rice multipath fading channels," *2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference.* 2004, pp. 162-165 Vol.1. doi: 10.1109/VETECS.2004.1387934

(8) Kushal K. Talukdar, William D. Lawing. “Estimation of the parameters of the Rice distribution”. J. Acoust. Soc. Am. 89 (3), March 1991.