

PROYECCIÓN DE SEÑALES. UNA FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE FORMACIÓN DE IMÁGENES ECOGRÁFICAS EN EL DOMINIO DEL ESPACIO-FRECUENCIA. PARTE II: APLICACIÓN DEL MÉTODO

PACS: 43.60.Fg

Ibáñez Rodríguez, Alberto¹; Parrilla Romero¹, Montserrat; Martínez Graullera, Oscar¹.

¹Instituto de Física Aplicada y Tecnologías de la Información Leonardo Torres Quevedo (ITEFI) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (CSIC)
Serrano 144.

28006 Madrid. España

Tel.: (+34) 915 618 806

Fax: (+34) 914 117 651

E-Mail: alberto.ibanez@csic.es

Palabras Clave: Ultrasound, Imaging, Beamforming, Ultrasonography

ABSTRACT

This paper compares the Signal Projection Method (MPS) with the traditional method of Delay and Sum (DAS) of signals for the formation of images in homogeneous and isotropic media. It is shown how MPS and DAS are affected by the use of different patterns of emission and verifies that MPS is a general method that can be applied without modification to different modes of imaging. In particular, two representative ones have been studied: sectoral image with Phased Array (PA) and formation of image using the Total Focusing Mode (TFM).

RESUMEN

En este trabajo se compara el Método de la Proyección de Señales (MPS) con el método tradicional de Retrasar y Sumar (DAS) señales para la formación de imágenes en medios homogéneos e isótropos. Se estudia su comportamiento ante diferentes patrones de emisión y se verifica que es un método general que puede aplicarse sin modificaciones a diferentes algoritmos de obtención de imagen. En concreto, se han estudiado dos modos representativos: Imagen Sectorial con Phased Array (PA) y formación de Imagen mediante el Método de Focalización Total (TFM).

1. INTRODUCCIÓN

El Método de la Proyección de Señales (MPS), que se describe en otro trabajo presentado en este mismo congreso [1], permite afrontar de forma sistemática problemas de formación activa de imágenes con arrays de transductores en condiciones mucho más generales que las de otros métodos habitualmente utilizados [2]. En este trabajo mostramos cómo el algoritmo derivado en [1] se aplica, sin modificaciones, a dos modalidades habituales de imagen ecográfica: el Método de Focalización Total (TFM) [3] y la imagen sectorial con Phased Array (PA) [4] comparándose las imágenes obtenidas con las que se forman con algoritmos basados en Retrasar y Sumar (DAS) señales.

El algoritmo basado en el MPS que proponemos es válido para la formación de imágenes en medios homogéneos e isótropos a trozos a partir de las señales de eco $\{s_i(t)\}$, $i = 1, 2 \dots M$, que se producen en respuesta a la emisión del conjunto de señales de excitación $\{e_i(t)\}$, $i = 1, 2 \dots M$.

Consideramos que el mismo conjunto de M transductores funciona, sucesivamente, como emisor de las señales de excitación y como receptor de las señales de

eco. Nos limitamos, además, al caso en el que los puntos donde se forma la imagen están en el campo lejano de cada uno de los transductores. En estas circunstancias el algoritmo queda descrito por la expresión [1]:

$$\mathbf{J}_c = \left(\sum_{n \in B} ((\mathbf{H}\bar{\mathbf{S}}) \circ (\mathbf{H}\mathbf{E})) \right) \circ \left(\sum_{n \in B} ((\widehat{\mathbf{H}\mathbf{E}}) \circ (\widehat{\mathbf{H}\mathbf{E}})) \right) \quad (1)$$

Donde \mathbf{J}_c es el vector columna formado por los valores de amplitud compleja que se asigna a cada punto de la imagen de reflectividad. \mathbf{H} es la matriz de transferencia que proporciona la amplitud compleja del campo propagado, a cada frecuencia, desde los transductores. Y \mathbf{E} y \mathbf{S} son los vectores de señales de excitación y de señales de eco respectivamente. Estos están formados por las transformadas discretas de Fourier de las extensiones analíticas de Gabor [5] de cada una de las M señales de excitación $\{e_i(t)\}$ y de las M señales de eco $\{s_i(t)\}$. B es el conjunto formado por los índices n de los términos no nulos de la Transformada de Fourier Discreta (TFD) de todas las señales involucradas que, por tanto, describe su ancho de banda efectivo. El operador \circ representa el producto de Hadamard y el símbolo $\widehat{}$ indica la matriz inversa de Hadamard [6] [7].

En este trabajo utilizamos como términos H_{ij} de \mathbf{H} la función de Green de espacio libre para la ecuación de Helmholtz:

$$H_{ij}(n) = \frac{e^{-j\frac{\omega(n)}{v}r_{ij}}}{r_{ij}} = \frac{e^{-j\frac{2\pi n f_s}{Nv}r_{ij}}}{r_{ij}} = \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda(n)}r_{ij}}}{r_{ij}} \quad (2)$$

Donde r_{ij} es la distancia desde el transductor i del array hasta el punto j de la imagen, f_s es la frecuencia a la que se han muestreado las señales emitidas y recibidas, N es el número de muestras que forman cada señal y $\lambda(n)$ es la longitud de onda en el medio de propagación a la frecuencia asociada al término n de la TFD de las señales.

2. COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE PROYECCIÓN DE SEÑALES CON DAS

En este apartado presentamos ejemplos que tratan de ilustrar cómo se comporta el MPS, comparado con los métodos basados en DAS al variar la forma de las señales de excitación. La comparación se ha realizado con señales simuladas de los ecos producidos por un reflector puntual inmerso en agua empleando el programa de simulación Field II [8] [9]. Las señales se obtienen suponiendo que tenemos un array lineal de 128 elementos rectangulares de 0.209x5mm, kerf de 0.011mm y frecuencia central de 3.5MHz. La respuesta al impulso de cada elemento se ha modelado con 2 ciclos de 3.5MHz modulados con una ventana de Hanning. El reflector se ha situado en el eje del array a una distancia de 150mm que es, aproximadamente, un tercio del límite del campo lejano del array. Se ha generado la matriz de 128x128 señales correspondientes a emitir secuencialmente con cada uno de los elementos de array y recibir con todos en cada disparo. El método utilizado para construir las imágenes es el TFM, que consiste en formar una imagen de toda la escena por cada uno de los disparos y sumarlas para obtener la imagen final.

Hemos realizado tres imágenes del punto con DAS y MPS. Cada imagen corresponde a utilizar una forma de onda diferente para excitar los elementos en emisión. La primera es un ciclo completo de 3.5 MHz. En la Figura 1(a) se han representado la forma en el tiempo y el espectro en frecuencias de la señal que resulta al excitar los elementos con ese patrón. Es una señal de corta duración, 0.65µs, y ancho de banda del 60% de la frecuencia central del elemento a -3dB. En la Figura 1(d) y la Figura 1(g) se muestran las imágenes obtenidas aplicando DAS y MPS respectivamente con un rango dinámico de 60dB. Ambas imágenes son muy similares, la imagen

DAS presenta una ligera mejora en resolución mientras que la MPS presenta un patrón de difracción más nítido. Concretamente, en el umbral a -6dB las dimensiones del punto son de 2mm en el eje X en ambas imágenes (la resolución lateral la determina el tamaño del array). Y en el eje Z el DAS produce una imagen del 0.2mm y el MPS de 0.3mm.

El segundo patrón de excitación aplicado es un pulso de 6 ciclos de 3.5 MHz que da lugar a la señal emitida que se muestra, junto con su espectro, en la Figura 1(b). En este caso se trata de una señal larga en el tiempo, 2.2 μ s, y de banda muy estrecha, 15% de la frecuencia central del array. Las imágenes que se obtienen se muestran, con 60dB de rango dinámico, en la Figura 1 (e) y (h). La resolución lateral a -6dB es de 1.5mm en ambas imágenes, y la resolución axial es de 1.27mm en la imagen DAS y 1.4mm en la MPS.

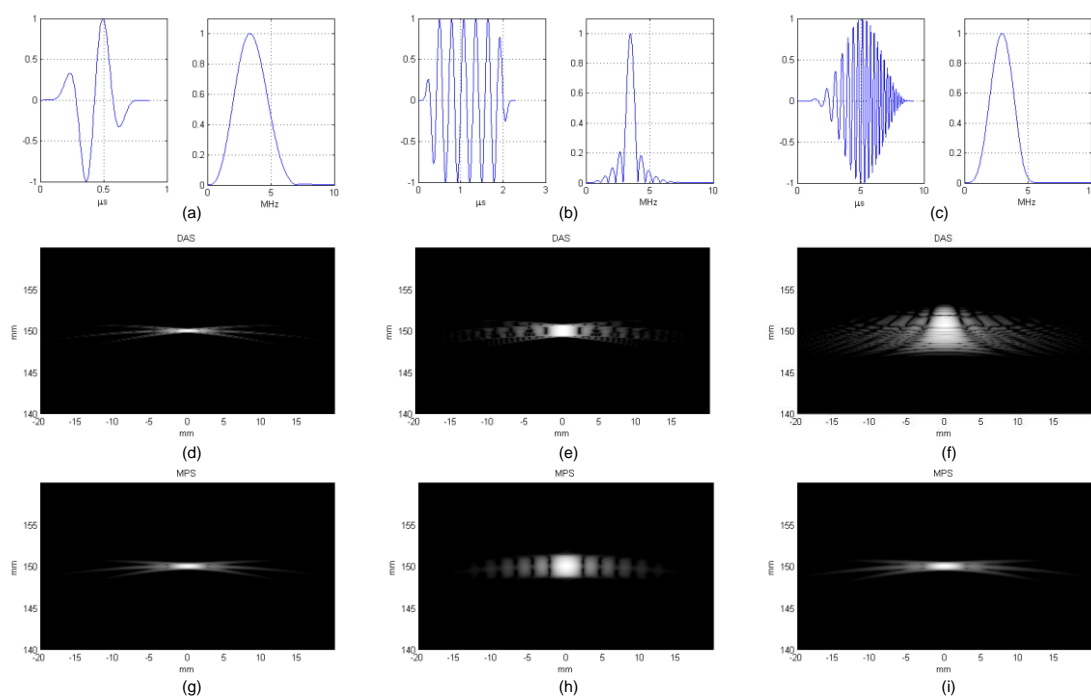


Figura 1: Señales emitidas (a), (b) y (c) con el array lineal de 128 elementos en simulación. En (d), (e) y (f) se muestran las imágenes obtenidas mediante TFM con algoritmo basado en DAS con cada una de las señales emitidas. En (g), (h) e (i) las que se obtienen con TFM y MPS. El rango dinámico de todas las imágenes es de 60dB.

El último patrón de excitación es una señal chirp cuya frecuencia cambia linealmente de 0Hz a 5.25MHz. Esta excitación da lugar a la emisión de la señal que se muestra, junto con su espectro, en la Figura 1(c). Es una señal de muy larga duración, 8 μ s, y del 45% del ancho de banda de la frecuencia central del array a -3dB. La Figura 1 (f) e (i) muestra las imágenes DAS y MPS con 60dB. La resolución lateral a -6dB es 2.57mm y 3.37mm respectivamente. La axial es de 2.15mm para el DAS y de 0,3mm para el MPS, que, en este último método, coincide con la obtenida con la primera señal de excitación.

Estos ejemplos ponen de manifiesto la diferencia sustancial de ambos algoritmos: los algoritmos basados en DAS parten de suponer que la excitación es impulsiva, por lo que su resolución axial depende directamente de la longitud en el tiempo de la señal de excitación. En contrapartida, el MPS que presentamos, se adapta a la forma de la señal emitida, por lo que su resolución axial está ligada al ancho de banda de la señal. Esto lo hace especialmente útil en aplicaciones donde sea necesario excitar con mayor energía o con formas de excitación arbitrarias.

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para verificar experimentalmente el método propuesto, se han utilizado señales de phantoms estándar proporcionados públicamente hace años a la comunidad científica por el Biomedical

Ultrasonics Laboratory de la Universidad de Michigan. Las medidas fueron obtenidas empleando un array de 3.5MHz y 128 elementos (Acuson, modelo V328) con un espacio entre elementos de 0.22mm. Todos los elementos se han utilizado como emisores y receptores. Un elemento actúa como emisor y se registran todos los ecos recibidos por cada uno de los elementos individualmente. De esta forma se obtienen un total de 128x128 señales de radiofrecuencia que permiten simular mediante software cualquier arquitectura de conformación de haces. Cada A-scan está muestreado a 13.89MHz y tiene 2048 muestras. Con objeto de reducir el ruido, cada señal resulta del promediado de sucesivas adquisiciones.

Para las pruebas específicas presentadas aquí se han utilizado dos *phantom* diferentes. El primero contiene seis hilos alineados ligeramente fuera de la normal del array para evitar sombras, que están situados a 34, 48, 65, 83, 102 y 121mm de radio (*phantom* de hilos). El segundo está formado por dispersores y cuatro regiones quísticas (*phantom* de quistes). Ambos se utilizarán para verificar la calidad de la imagen, el primero para comprobar la resolución axial y lateral y el segundo para realizar la medida del contraste.

Las pruebas consisten en aplicar el MPS a dos algoritmos clásicos de formación de imagen, el Método de Focalización Total (TFM) y el Phased Array (PA), comparándolos a continuación con el método tradicional de Retrasar y Sumar señales (DAS) aplicado a los mismos algoritmos. Destacar que en el caso del DAS las señales han sido sobremuestreadas por 8 para obtener una frecuencia de muestreo de 32 veces la frecuencia central del transductor mientras que en el caso del MPS se han empleado las señales originales (4 veces la frecuencia central).

Para aplicar el MPS es necesario conocer la forma de onda de las señales emitidas de las que, en este caso, no se dispone. Dado que las señales fueron capturadas para aplicar algoritmos de tipo DAS, hemos supuesto que los transductores fueron excitados con señales que tratan de aproximarse a un impulso, y que las señales emitidas se asemejan a la respuesta al impulso de los elementos. Hemos construido las señales emitidas suponiendo que su espectro es, en valor absoluto, la media del valor absoluto de los espectros de todas las señales, y que su fase es cero. Las imágenes que se obtienen con estas señales demuestran que el MPS es robusto y puede funcionar con eficacia incluso cuando no se conoce el patrón de emisión.

3.1. Método de Focalización Total (TFM)

Igual que hicimos con las señales simuladas, en este apartado presentamos el resultado de formar las imágenes mediante TFM sobre la matriz de señales completa. Formamos una imagen con las señales de ecos recibidos por cada una de las emisiones y sumamos las 128 imágenes para formar la imagen definitiva. El valor que se asigna a cada pixel de la imagen es el módulo del valor de imagen resultante, en el caso del MPS, y la envolvente en DAS.

3.1.1. Resolución.

En la Figura 2 se muestran las imágenes del *phantom* de hilos obtenidas aplicando el algoritmo TFM con los métodos DAS y MPS representadas con un rango dinámico de 60dBs. Puede observarse que las diferencias en la imagen son casi inapreciables.

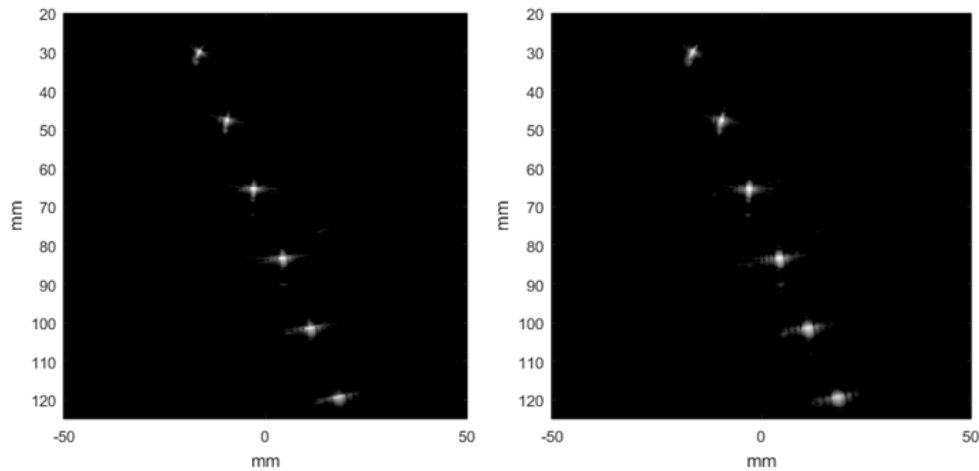


Figura 2. Imágenes del *phantom* de hilos obtenidas aplicando el algoritmo TFM con los métodos DAS (izda.) y MPS (dcha.) (60dBs).

En cuanto a resolución lateral ambos métodos son casi idénticos como se observa en la Figura 3 izda. La anchura del lóbulo principal a -6dBs es de 0.9 grados en ambos casos y el fondo de ruido es similar en los dos métodos. Las diferencias aparecen en cuanto a la resolución axial. En la Figura 3 dcha. se observa que el MPS tiene una ligera pérdida de resolución. Concretamente, en el corte a -6dBs el DAS tiene una resolución axial media de 0.7mm y el MPS de 1mm manteniendo el mismo nivel en el fondo de ruido y en la amplitud.

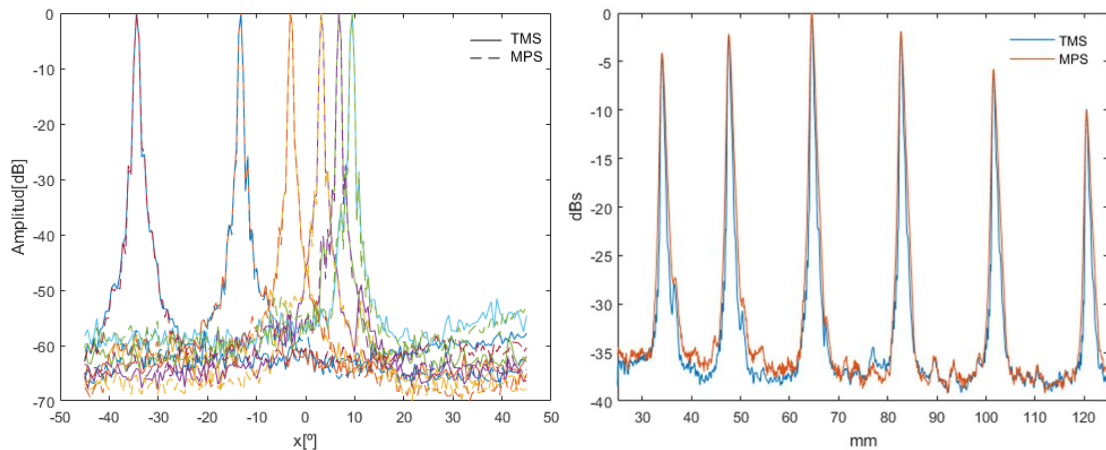


Figura 3. Izda: Patrón lateral de cada uno de los hilos extraído de las imágenes de la Figura 2. En línea continua se representa el método DAS y en línea discontinua el MPS. La amplitud está normalizada para cada uno de los hilos. Dcha. Patrón axial de las mismas imágenes en este caso sin normalizar.

3.1.2. Contraste

En la Figura 4 se muestran las imágenes del *phantom* de quistes anecoicos obtenidas aplicando el algoritmo TFM con los métodos DAS y MPS representadas con un rango dinámico de 60dBs. Ambas imágenes son indistinguibles a simple vista. A pesar de todo se ha realizado la medida del contraste utilizando la expresión, propuesta en [10], dada por:

$$C = -20 \log_{10} \left(1 - \frac{\mu_f - \mu_q}{\mu_f} \right) \quad (3)$$

donde μ_f y μ_q son los valores medios de las amplitudes del fondo y de la región de interés de la imagen, respectivamente. Según esta fórmula, el contraste en el método DAS es 22.87dBs y en el MPS es 23.28dBs, lo que confirma también su similitud de forma objetiva.

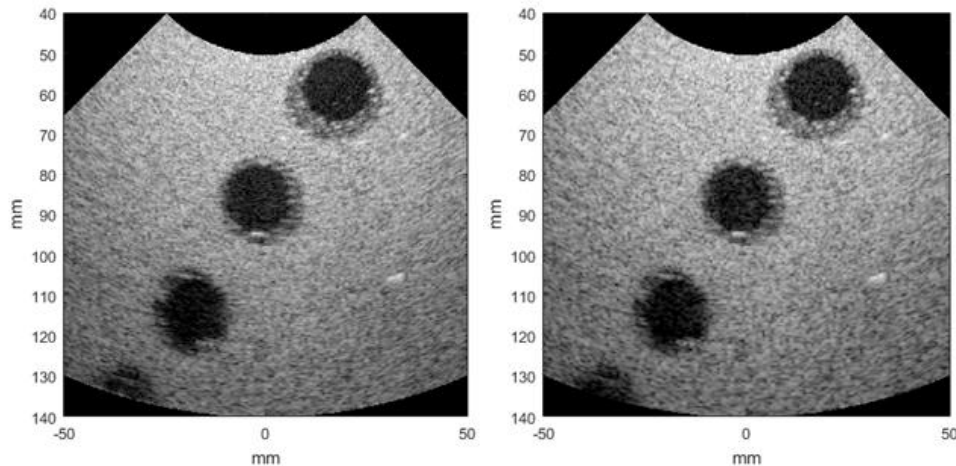


Figura 4. Imágenes del *phantom* de quistes obtenidas aplicando el algoritmo TFM con los métodos DAS (izda.) y MPS (dcha.) (60dBs).

3.2. Phased Array (PA)

En este apartado presentamos un análisis similar al realizado aplicando el TFM con imágenes obtenidas mediante el método PA en un barrido sectorial. Como es sabido, este método consiste en emitir con todos los elementos para formar un pulso estrecho que se propaga a lo largo de una línea. En el caso de realizar un barrido sectorial, todas las líneas parten del centro del array en un ángulo y con un foco que están determinados por la ley focal en emisión aplicada. Para cada emisión se registran las señales de eco recibidas por cada elemento del array y se utilizan para formar una imagen de su línea de propagación. La imagen final se forma agrupando ordenadamente las imágenes de cada línea. En este caso realizamos barridos formados por 181 líneas de imagen que barren un sector de -45° a 45° . Las imágenes basadas en DAS utilizan focalización dinámica en recepción y, aun siendo tipo DAS, requieren utilizar un algoritmo específico diferente al empleado para realizar las imágenes TFM. Sin embargo, para calcular las imágenes con el MPS se ha utilizado el mismo código que en el caso de las imágenes con TFM.

3.2.1. Resolución

En la Figura 5 se muestran las imágenes del *phantom* de hilos obtenidas aplicando el algoritmo PA con los métodos DAS y MPS colocando un foco en emisión en 50mm (60dBs de rango dinámico). Como en el caso del algoritmo TFM las diferencias en la imagen son casi inapreciables y analizando en detalle los patrones lateral y axial podemos comprobar que su similitud es aún mayor que en el caso del TFM.

En cuanto a resolución lateral (Figura 6 izda) se observa que ambos métodos dan resultados muy parecidos tanto en la anchura del lóbulo principal como en el fondo de ruido. La resolución lateral media a -6dBs en todos los hilos es de 1.1° , y la del hilo situado en el foco es de 0.9° . Y en cuanto a resolución axial, en este caso, la anchura del haz a -6dBs es de 0.9mm en ambos métodos.

Sólo existen ligeras diferencias en el valor máximo de la señal y el fondo de ruido a medida que nos alejamos del foco en emisión.

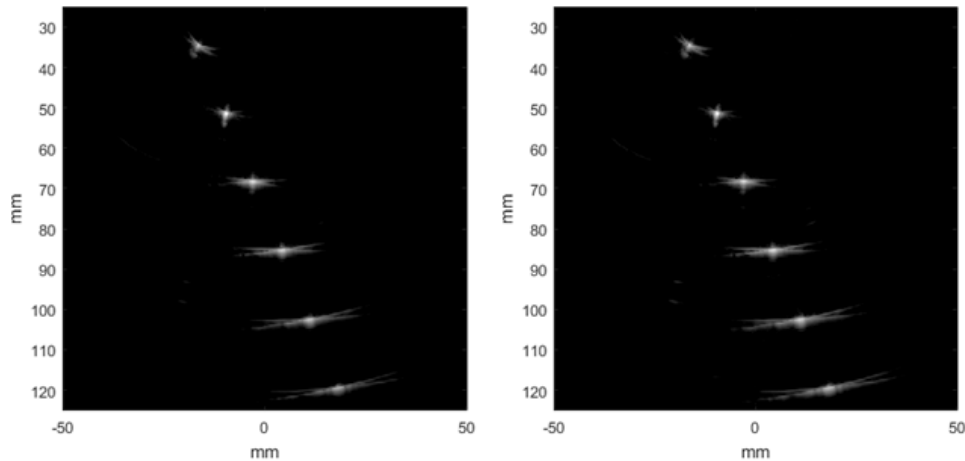


Figura 5. Imágenes del *phantom* de alambres obtenidas aplicando el algoritmo PA con los métodos DAS (izda.) y MPS (dcha.) con foco fijo en emisión situado en 50mm. (60dBs).

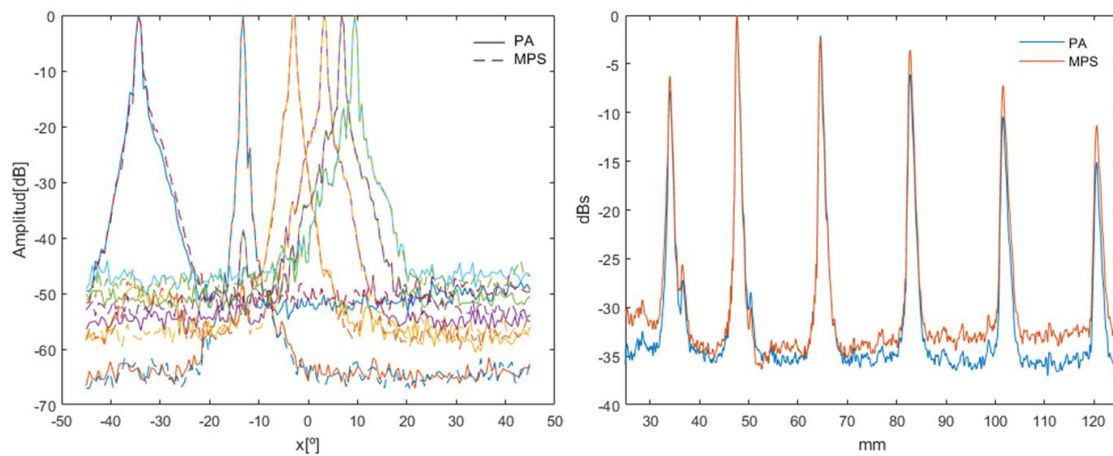


Figura 6. Izda: Patrón lateral de cada uno de los hilos extraído de las imágenes mostradas en la Figura 5. En línea continua se representa el método DAS y en línea discontinua el MPS. La amplitud está normalizada para cada uno de los hilos. Dcha. Patrón axial de las mismas imágenes en este caso sin normalizar.

3.2.2. Contraste

En la Figura 7 se muestran las imágenes del *phantom* de quistes anecoicos obtenidas aplicando el algoritmo PA con los métodos DAS y MPS (rango dinámico de 60dBs). En este caso se ha puesto un foco en emisión en 100mm lo que hace que el fondo sea menos uniforme que en el caso del TFM, oscureciéndose ligeramente la zona del foco. Las dos imágenes son prácticamente iguales a simple vista y aplicando la expresión(3) se confirma, el contraste en el caso del DAS es 21.7dBs y en el caso del MPS es de 21.8dBs.

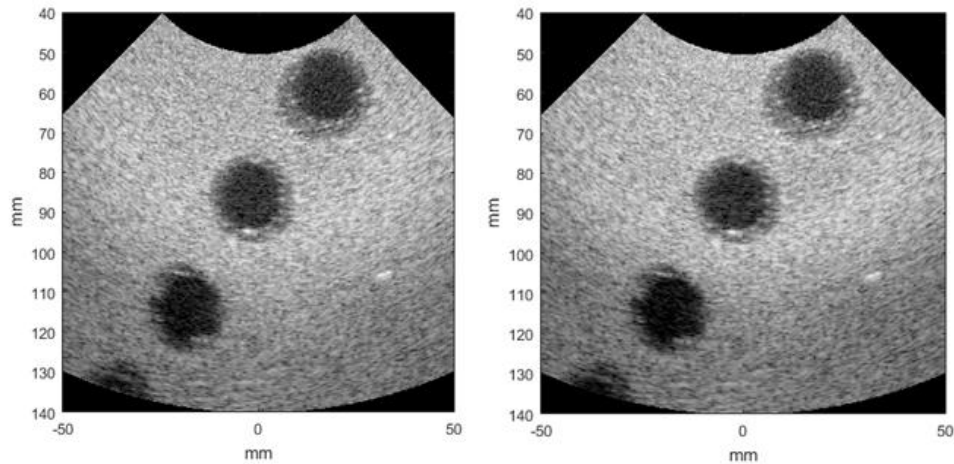


Figura 7. Imágenes del *phantom* de quistes obtenidas aplicando el algoritmo PA con los métodos DAS (izda.) y MPS (dcha.) con foco fijo en emisión situado en 100mm. (60dBs).

4. CONCLUSIONES

El algoritmo basado en MPS que proponemos proporciona resultados comparables a los que se obtienen con los tradicionales basados en DAS en cuanto a calidad de imagen, presentando algunas otras ventajas como hemos visto y ahora resumimos.

El MPS tiene en cuenta la forma de onda emitida en el cálculo de la imagen, por lo que la resolución axial que se consigue está ligada al ancho de banda efectivo de las señales. El DAS, sin embargo, supone la emisión de señales impulsivas lo que significa que, en la práctica, la resolución axial que proporciona está ligada a la duración de los pulsos emitidos. Esto implica que en modalidades de imagen como el TFM, que teóricamente deben proporcionar imágenes de alta calidad, los algoritmos basados en DAS sean poco prácticos debido a la poca energía asociada a la emisión de pulsos muy cortos con un solo elemento del array, ya que los hace muy sensibles al ruido y limita su capacidad de penetración. Con el MPS en cambio se podrían utilizar pulsos largos de mayor energía y mayor capacidad de penetración que, si son de banda ancha, mantendrían la resolución axial y mejorarían la calidad de la imagen.

A diferencia del DAS, el algoritmo MPS se puede aplicar sin modificaciones a diferentes modos de imagen y con cualquier esquema y forma de ondas en las señales de emisión. En consecuencia, podría ser una herramienta muy útil para diseñar y probar nuevos modos de imagen. En particular, en aquellos casos en los que no es posible calcular los tiempos de vuelo de las señales necesarios para implementar algoritmos de imagen basados en DAS.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro del proyecto: FIS2013-46829-R financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

A Carlos Valdecantos Martínez que nos inició en el campo de los ultrasonidos y nos regaló su amistad, DEP.

REFERENCIAS

- [1] A. Ibáñez Rodríguez, M. Parrilla Romero and O. F. Martínez Graullera, "Proyección de Señales. Una Formulación General del Problema de Formación de Imágenes Ecográficas en el Dominio del Espacio-Frecuencia.," in *48º TeniAcústica*, La Coruña, 2017.
- [2] K. E. Thomenius, «Evolution of ultrasound beamformers,» de *Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium.*, San Antonio, Texas, USA, 1996.
- [3] 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.
- [4] O. T. Von Ramm y S. W. Smith, «Beam steering with linear arrays,» *IEEE transactions on biomedical engineering*, Vols. %1 de %2BME-30, nº 8, pp. 438-452, 1983.
- [5] S. L. Marple, "Computing the Discrete-Time Analytic Signal via FFT," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 47, pp. 2600-2603, 1999.
- [6] E. Million, "The hadamard product," 12 April 2007. [Online]. Available: <http://buzzard.ups.edu/courses/2007spring/projects/million-paper.pdf>. [Accessed January 2017].
- [7] G. P. H. Styan, "Hadamard products and multivariate statistical analysis," *Linear Algebra and its Applications*, vol. 6, pp. 271-240, 1973.
- [8] J. A. Jensen, «A Program for Simulating Ultrasound Systems,» de *10th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Imaging. Medical & Biological Engineering & Computing*, pp. 351-353, Volume 34, Supplement 1, Part 1, , 1996.
- [9] J. A. Jensen y N. B. Svendsen, «Calculation of pressure fields from arbitrarily shaped, apodized, and excited ultrasound transducers,» *IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 39, nº 2, pp. 262-267, 1992.
- [10] D. H. Turnbull, P. K. Lum, A. T. Kerr y F. Stuart Foster, «Simulation of B-scan images from two-dimensional transducer arrays: Part I - Methods and quantitative contrast measurements,» *Ultrasonic Imaging*, vol. 14, nº 4, pp. 323-343, 1992.