

DESARROLLO DE UN CONFORMADOR HÍBRIDO RANDOMWALK PARA LA MEJORA DEL CONTRASTE EN SISTEMAS DE IMAGEN SINTÉTICA

PACS: 43.60.Fg

Martínez-Graullera, Óscar; Yagüe-Jiménez, Virginia; Ibáñez, Alberto; Parrilla, Montserrat
Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información, ITEFI (CSIC)

Dirección: C/ Serrano, 144
Madrid 28006

España

Tel: +34 915 618 806

E-Mail: oscar.martinez.graullera@csic.es

Palabras Clave: *RandomWalk*, imagen ultrasónica, conformador de haz

ABSTRACT

In order to increase the contrast in synthetic ultrasound imaging a hybrid beamformer based on the Delay-And-Sum and the Randomwalk Beamformer has been proposed. Analyzing the coarray structure of different data acquisition strategies, the redundancy in the data set has been used to divide the signal set in two different equivalent subsets. This process has been studied for the Full Matrix Capture set and for the Minimum Redundancy Coarray

RESUMEN

Con objeto de aumentar el contraste en las imágenes ultrasónicas producidas por técnicas de imagen sintética, se aprovecha la redundancia espacial de los sistemas de arrays para desarrollar una solución de implementación que divide la adquisición en dos flujos de señales redundantes. De manera que sobre cada flujo se aplican distintos procedimientos de conformación: el *Delay-and-Sum* (DAS) y el *Randomwalk* (RWB). La combinación de ambos conformadores genera una imagen de mejor contraste al tiempo que se mantiene la tasa de imágenes original. Partiendo de dos estrategias de adquisición diferentes, el *Full Matrix Capture* con un nivel de alto grado de redundancia y el 4R-SAFT con un grado dos de redundancia, se propone una arquitectura de procesamiento y se estudia cómo se combinan ambos resultados, permitiendo anotar la imagen en función a la estadística de certidumbre y mejorar el contraste.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años hemos asistido a un amplio despliegue de opciones de instrumentación dentro de las áreas relacionadas con la caracterización mediante ultrasonidos y, más concretamente, en el campo de la imagen. La tendencia de la industria en estas últimas décadas se ha centrado en la integración de múltiples canales electrónicos para aumentar la densidad de los sistemas y mejorar la relación señal ruido de los mismos. Aunque la principal consecuencia de este enfoque de la industria ha sido el abaratamiento de los costes por equipo, también

podemos destacar la aparición de nuevos sistemas genéricos y abiertos que han sido base para el desarrollo de nuevas técnicas de generación de imagen en tiempo real.

Este cambio de paradigma supone la simplificación de las etapas hardware de los sistemas. Actualmente éstos se centran en la adquisición y el manejo de grandes volúmenes de datos a alta velocidad, heredando capacidades fuertemente desarrolladas en otras áreas tecnológicas. Ahora, toda esta información puede ser procesada mediante sistemas de tecnología convencional p. e. GPGPU, altamente eficaces en la resolución de problemas SIMD (*Single Instruction Multiple Data*), dentro de los cuales está el cómputo de las imágenes ultrasónicas [1].

Quizá, de todos los procedimientos de generación de imagen ultrasónica, las técnicas de apertura sintética basadas en el coarray [2, 3] sean las que más se hayan desarrollado gracias a estos avances. Estas técnicas se basan en la adquisición independiente de todas las señales que corresponden a la combinación de un par emisor/receptor. Para un array de N transductores se obtienen $N \times N$ señales que se organizan en $2N - 1$ frecuencias espaciales en el coarray correspondiente (*Full Matrix Capture*, FMC) [4], presentando diversos grados de redundancia por frecuencia. Alternativamente, el análisis de las frecuencias espaciales permite proponer modos de adquisición que reducen el significativamente el número de señales hasta generar un sólo componente por cada frecuencia espacial ($2N - 1$ señales). A estas configuraciones se las conoce como Coarray de Mínima Redundancia (CMR) [5].

Disponer del conjunto las señales del coarray permite implementar el *Total Focusing Method* (TFM) donde todos los puntos de la imagen pueden ser focalizados mediante la técnica del *Delay-and-Sum* (DAS) [4, 5]. Este tipo de procesamiento responde a un planteamiento SIMD, y su implementación en GPGPU y en sistemas *multicore* es objeto de interés [1]. Pese al buen resultado que ofrece esta técnica [4, 6], tiene en su contra que el contraste en la imagen final se ve fuertemente limitado por la baja relación señal a ruido de las señales involucradas.

Con objeto de mejorar el contraste, en los últimos años se ha propuesto el uso de la fase como descriptor único para conformar un modo de imagen complementaria al DAS convencional. El uso de esta técnica tiene dos enfoques. El primero de ellos se basa en una interpretación estadística, que permite identificar y anotar en la imagen la presencia de reflectores, diferenciándolos de distintos tipos de artefactos también presentes en la imagen. Esta es la técnica empleada en el análisis de fase instantánea [7]. Como segundo enfoque alternativo encontramos el uso de esta información de fase como máscara de contraste que, multiplicada por el resultado obtenido mediante la técnica DAS, mantiene la amplitud de los reflectores mientras hunde el fondo de la imagen. En esta línea se encuentra el Factor de Coherencia de Fase (FCF) [8]. Ambos usos presentan ventajas, sin embargo, los algoritmos en que se basan tienen un coste computacional elevado, por lo que su implementación en tiempo real exige simplificaciones drásticas en su metodología limitando su eficiencia.

Este trabajo presenta una técnica basada en el comportamiento estadístico de las fases involucradas en el proceso, parejo a la pauta del paseo aleatorio, y que hemos denominado *Random Walk Beamformer* (RWB). Esta estrategia presenta ciertas ventajas respecto a las anteriores. En primer lugar, es relativamente sencilla de calcular y puede integrarse en la propia cadena de procesamiento del DAS con un bajo coste computacional. En segundo lugar, permite

un doble uso: por un lado, sus resultados como máscara de contraste son similares al FCF, y por otro tiene una interpretación estadística muy sencilla resultado de la cual puede ser usado para anotar la presencia de reflectores en la imagen.

EL CONFORMADOR DE PASEO ALEATORIO

Consideremos un array lineal de N elementos que ha sido empleado en un proceso de adquisición de datos de forma que obtenemos un conjunto de $N \times N$ señales, cada una de las cuales corresponde a un proceso de emisión-recepción independiente. Todas ellas forman un conjunto A de señales al que denominamos *Full Matrix Capture* (FMC):

$$A = \{S_{ij}(t)\} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad j = 1, \dots, N \quad S_{ij}(t) = s_{ij}(t) + q_{ij}(t) \quad (1)$$

donde $s_{ij}(t)$ hace referencia a la componente en fase y $q_{ij}(t)$ a la de cuadratura, siendo $S_{ij}(t)$ la expresión analítica de la señal correspondiente al par ij . En este caso la ecuación que proporciona el valor de un pixel sobre la posición x en la imagen de envolvente compuesta sobre la región de interés es:

$$DAS(\mathbf{x}) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{ij}(t) * \delta(t + t_{ij}(\mathbf{x})) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N q_{ij}(t) * \delta(t + t_{ij}(\mathbf{x})) \right)^2} \Bigg|_{t=0} \quad (2)$$

donde $t_{ij}(\mathbf{x})$ hace referencia a los tiempos de compensación de la emisión y la recepción al punto de interés de la imagen. Este conformador se conoce como *Delay-And-Sum* (DAS).

Como complementario a este resultado se han propuesto otros conformadores que operan sólo con la fase, descartando la información referente a la amplitud. Este es el caso del Conformador de Paseo Aleatorio (*Randomwalk Beamformer*, RWB). Los conceptos básicos que describen la relación entre la fase y el Conformador de Paseo Aleatorio han sido descritos en [9], donde se describe como, tomando como medida de la concentración de fases el análisis de Fourier de la distribución de fases, es posible derivar la siguiente ecuación:

$$RWB(\mathbf{x}) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{s_{ij}(t)}{|S_{ij}(t)|} * \delta(t + t_{ij}(\mathbf{x})) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{q_{ij}(t)}{|S_{ij}(t)|} * \delta(t + t_{ij}(\mathbf{x})) \right)^2} \Bigg|_{t=0} \quad (3)$$

de donde se deriva que la imagen resultado puede ser obtenida mediante la suma de fasores de módulo unidad definidos en un espacio bidimensional de fase y cuadratura. Este proceso se puede entender como un paseo aleatorio y por tanto su comportamiento queda descrito por la distribución de Rayleigh que, para el caso de un array lineal de 64 elementos en configuración FMC (4096 señales) y CMR (127 señales), se presenta en la Figura 1.

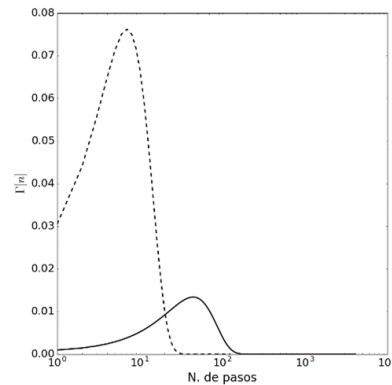


Figura 1. Función de densidad de probabilidad correspondiente al comportamiento de la configuración FMC (línea continua) y CMR (línea discontinua).

A partir de esta distribución es posible extraer cuál es la probabilidad de que un punto de la imagen contenga un reflector o no, al alcanzar un determinado valor. Así tenemos que, para el array propuesto, operando mediante el FMC, la probabilidad de alcanzar un valor superior a 250 implica la existencia de un reflector con una probabilidad de un 99.999%; mientras que si operamos sobre un subconjunto CMR esta probabilidad se alcanza en 40 señales. Este resultado tiene relevancia ya que implica la existencia de un rango dinámico fijo en la imagen RWB. Considerando el número de señales involucrados en cada estrategia para nuestro array de 64 elementos esto es -25 dB (FMC) y -10 dB (CMR) respectivamente.

Si tomamos un reflector puntual y calculamos cuál es la influencia del ruido por canal, tanto en el RWB como en el DAS (FMC y CMR), obtenemos la Figura 2. En ésta se observa que a partir de $SNR > 10$ el RWB satura mientras que para valores inferiores la caída en el valor del reflector cae parejo al del conformador DAS en ambas configuraciones, dejando patente que ambos dos conformadores tienen capacidades semejantes a la hora de detectar un blanco.

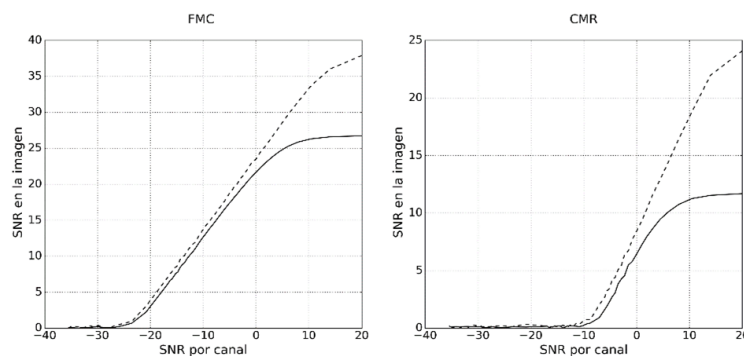


Figura 2. Evaluación del valor de un reflector puntual para distintos niveles de SNR por canal. La curva discontinua hace referencia al DAS y la continua al RWB.

Estos resultados ofrecen al menos dos usos alternativos del RWB. El primero, como fuente de aumento de contraste, ya que el producto punto a punto de ambas imágenes aporta un incremento del rango dinámico dado por los valores impuestos por la función de densidad de probabilidad de Rayleigh (25 dB y 10 dB para cada estrategia, respectivamente). Los reflectores que superen la SNR de 10 dB mantendrán su amplitud original, mientras que los que se encuentren por debajo de este umbral caerán de acuerdo con la descripción de la Figura 2. El segundo uso que puede proponerse es como mapa de probabilidades, dónde se establece

cuáles son los elementos significativos de la imagen, permitiendo etiquetar la imagen DAS bajo este criterio.

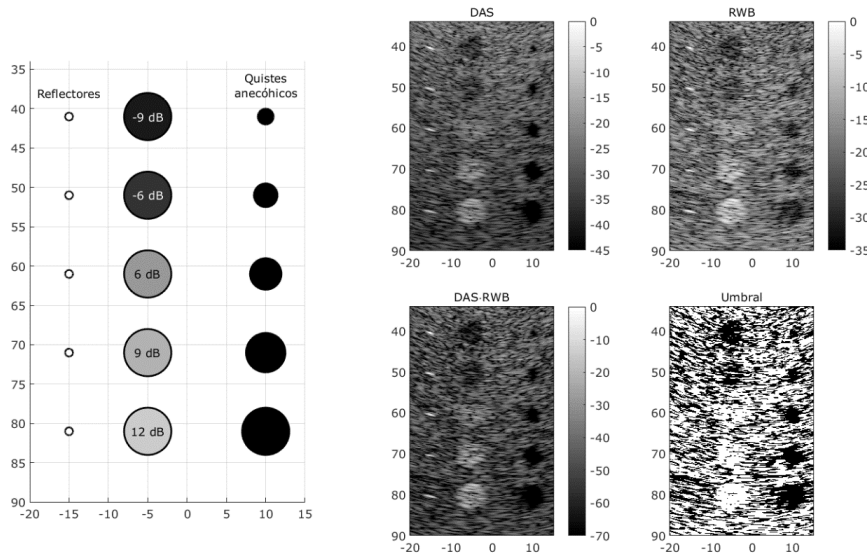


Figura 3. Las imágenes son: DAS (arriba-izquierda), RWB (arriba-derecha), DASxRWB (abajo izquierda), Umbral estadístico RWB (abajo derecha).

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de un phantom médico simulado mediante el programa FIELD II [10]. En este ejemplo se observa cómo las imágenes del DAS y el RWB resaltan los mismos elementos de la imagen y cómo el empleo de la imagen obtenida mediante el RWB a modo de máscara de contraste aumenta el margen dinámico de la imagen con respecto a la textura de fondo. Por otro lado, si se evalúa la significación estadística, ésta revela que la textura de fondo responde a la presencia de reflectores y no a ruido térmico. En este sentido, el estudio del comportamiento estadístico de la técnica RWB abre las puertas a una nueva interpretación de máscaras de contraste, pero queda fuera del contexto de este trabajo, por lo que se deja para futuros trabajos.

En este sentido es interesante hacer una comparativa entre el RWB y el Factor de Coherencia de Fase (FCF) como el principal exponente de esta técnica. Donde el FCF viene dada por:

$$FCF(\mathbf{x}) = 1 - \sqrt{\sigma^2 \left(\sin \left(\theta_{ij}(\mathbf{x}) \right) \right) + \sigma^2 \left(\cos \left(\theta_{ij}(\mathbf{x}) \right) \right)} \quad (4)$$

En la Figura 4 se muestra la imagen obtenida mediante la técnica FCF aplicada sobre el modelo de la Figura 3, así como una comparativa punto a punto de ambas imágenes (RWB y FCF). De ambas imágenes se puede resolver que la FCF se comporta como un expansor del resultado del RWB; y que existe entre ambas una relación cuadrática, a lo largo de un considerable margen dinámico, evidenciando la equivalencia entre ambas. Así pues, el RWB presenta las mismas propiedades que la ACF, pero a su vez aporta una nueva interpretación estadística que permite anotar la imagen, presenta un rango dinámico acotado e implica una menor carga computacional.

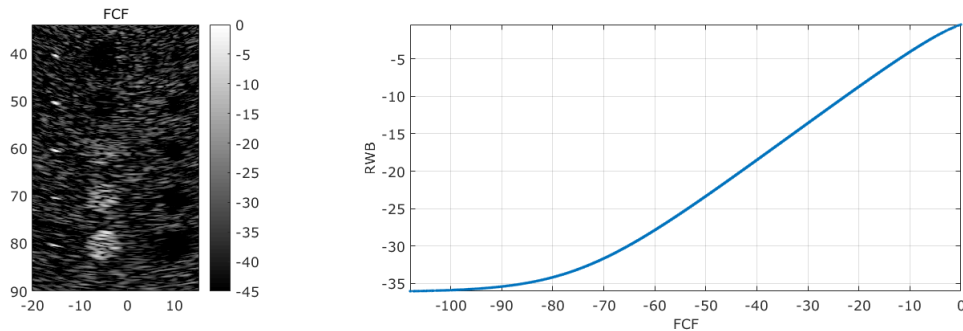


Figura 4. A la izquierda imagen de FCF de nuestro phantom médico bajo estudio. A la derecha, distribución de la relación punto a punto entre ambos conformadores de fase.

IMPLEMENTACIÓN DEL CONFORMADOR DE HAZ RANDOMWALK

El uso del RWB como máscara de contraste implica el producto punto a punto entre los resultados del DAS y el RWB. Dada las similitudes entre las ecuaciones (2) y (3), podemos asegurar que los procesos necesarios para resolver parten de la misma información y su integración en el mismo flujo de trabajo es relativamente sencilla.

Del resultado de la Figura 2 se deduce: que el conformador Randomwalk presenta la misma robustez frente al ruido que el DAS; que mantiene el nivel de los blancos que tienen una SNR superior a 10 pero que se castiga en mayor o menor medida los reflectores con una SNR por debajo; y que el margen de mejora tiene un nivel acotado que se puede determinar de acuerdo con la función de distribución de Rayleigh y el número de señales implicadas. Otro factor destacable es el hecho de que, tanto el DAS como el RWB, emplean el mismo conjunto de señales. Como consecuencia, puede existir el riesgo de que ambas técnicas recreen el mismo patrón de ruido, potenciando la generación de artefactos en las zonas de la imagen con mayor incertidumbre en la detección de reflectores.

No obstante, puesto que contamos con todo el conjunto de señales del coarray (FMC), podemos usar el principio de reciprocidad para dividir éste en dos conjuntos que sólo distarán entre sí a causa del ruido de fondo (*Half Matrix Capture*, HMC). Los conjuntos de cada conformador quedan compuestos así:

$$A_{DAS} = \{s_{ij}(t)\}, \text{ si } i \leq j \quad A_{RWB} = \{s_{ij}(t)\}, \text{ si } i \geq j \quad (5)$$

Únicamente los pares formados por $i = j$ forman parte de ambos conjuntos, manteniendo así la longitud del coarray pleno y evitando la distorsión de la *point spread function* original. Esto no supone más que el 3% del total de señales empleadas en cada subconjunto.

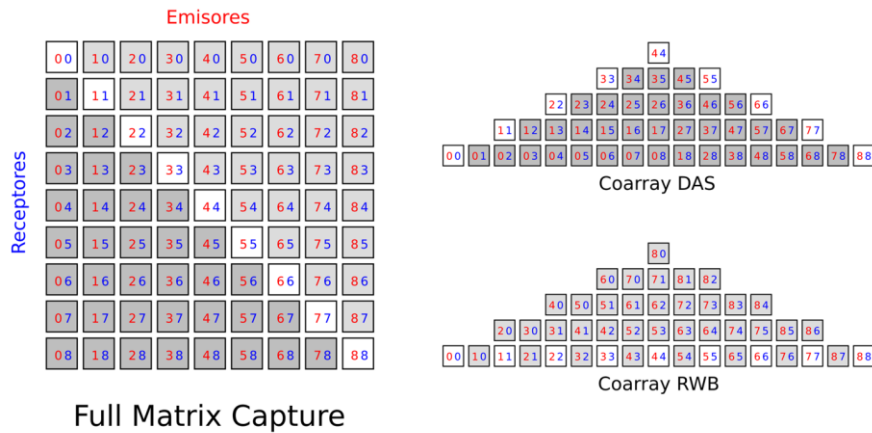


Figura 5. Para un array lineal de 9 elementos: representación matricial el FMC y de los dos subconjuntos de señales organizados de acuerdo a las frecuencias espaciales en coarray que emplean para el DAS y para el RWB.

Partiendo de esta división, la implementación del conformador es sencilla: en [1] podemos encontrar desarrollos adecuados tanto para arquitecturas *multicore* como GPGPU. La Figura 6 muestra el resultado de ambas imágenes. Respecto a la Figura 3 hay una pérdida de 6 dB en el rango dinámico consecuencia de haber dividido el número de señales por dos a costa de mantener la tasa de imágenes.

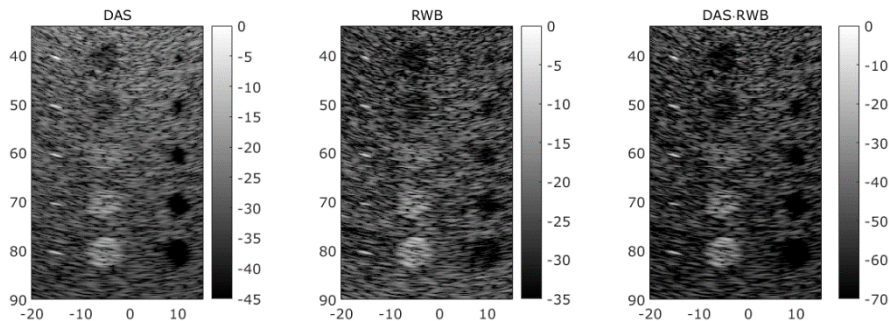


Figura 6. Resultado de aplicar la máscara RWB sobre el FMC. A la izquierda la imagen original del DAS, al centro el RWB y a la derecha la imagen resultante.

En el caso de los CMR y tomando como referencia el procedimiento 2R-SAFT, que minimiza el número de canales en recepción [5], el procedimiento pasa por duplicar la red de canales en recepción. De esta forma, podemos aumentar la redundancia y mantener la secuencia de disparos consecutivos tal y como se muestra en la Figura 7. A esta estrategia la hemos denominado 4R-SAFT.

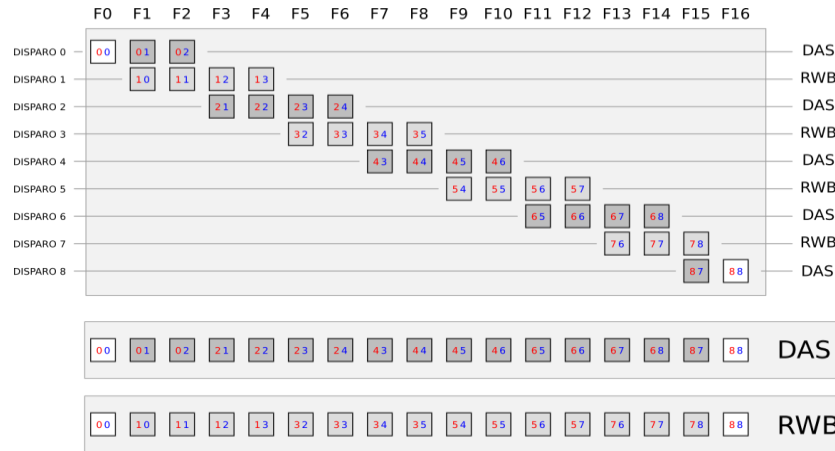


Figura 7. Para un array lineal de 9 elementos. Secuencia de disparos organizadas de acuerdo a las frecuencias espaciales (valores de F0 a F16). Cada disparo recoge la señal de al menos cuatro receptores y estas se asignan en bloque a un conformador diferente de tal forma que ambos componen CMR plenos.

El 4R-SAFT dispara secuencialmente todos los elementos de la apertura y emplea dos canales de adquisición consecutivos para completar el CMR. Duplicando el número de canales en recepción y manteniendo la secuencia de disparo, se produce una superposición de dos señales sobre las $2N - 3$ frecuencias espaciales centrales que permite dividir el conjunto en dos coarrays independientes.

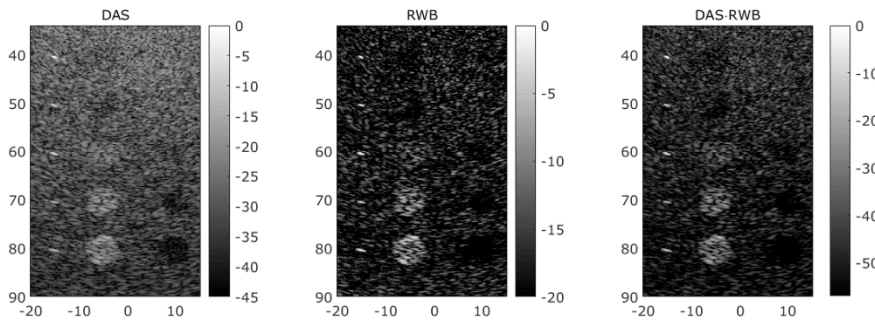


Figura 8. Resultado de aplicar la máscara RWB sobre el CMR. A la izquierda la imagen original del DAS, al centro el RWB y a la derecha la imagen resultante.

CONCLUSIONES

El presente trabajo ha presentado el Random Walk Beamformer; mostrando cuáles son sus propiedades fundamentales y como su sencilla implementación hace compatible su integración con el DAS. Su uso como máscara de contraste se ha comparado con el FCF evidenciando la existencia de una relación cuadrática entre el resultado aportado por ambas estrategias.

Por último, se han estudiado dos casos de implementación de la máscara de contraste basada en el RWB una para el caso FMC y otra para el CMR. En ambos casos se han expuesto los procedimientos para generar en el mismo proceso de adquisición dos conjuntos de señales independientes, pero con redundancia en el dominio de las frecuencias espaciales. Esto permite integrar tanto al RWB como al DAS sobre el mismo proceso de conformación generando un conformador híbrido capaz de producir un alto contraste.

En conclusión, el empleo de máscaras de contraste tiene un coste reducido en el procesamiento y puede ser especialmente útil en el caso de sistemas de imagen de muy bajos recursos basados en el CMR. En este sentido la disponibilidad en el mercado de circuitos integrados con múltiples canales facilita el desarrollo de sistemas que integren esta técnica con un coste relativamente bajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el Proyecto DPI2016-80239-R (AEI/FEDER, UE) y está financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Romero-Laorden, J. Villazón-Terrazas, O. Martínez-Graullera, A. Ibáñez 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.
- [2] R. T. Hocht 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.
- [3] M. Karaman, P.-C. Li y M. O'Donnell, «Synthetic aperture imaging for small scale systems,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 42, nº 3, pp. 429-442, mayo 1995.
- [4] 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.
- [5] C. J. Martín-Arguedas, D. Romero-Laorden, O. Martínez-Graullera, M. Pérez-López y L. Gómez-Ullate, «An ultrasonic imaging system based on a new SAFT approach and a GPU beamformer,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 59, nº 7, pp. 1402-1412, 2012.
- [6] M. F. Ramunssen y J. A. Jensen, «Comparison of 3-D synthetic aperture phased-array ultrasound imaging and parallel beamforming,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 61, nº 10, pp. 1638-1650, 2014.
- [7] V. T. Prado, S. C. García Granja, R. Tokio Higuti, C. Kitano, O. Martínez-Graullera y L. Elvira Segura, «Defect detection in anisotropic plates based on the instantaneous phase of signals,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 62, nº 10, pp. 1888-1894, 2015.
- [8] J. Camacho, M. Parrilla y C. Fritsch, «Phase Coherence Imaging,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 56, nº 5, pp. 958-974, 2009.
- [9] O. Martínez-Graullera, D. Romero-Laorden, A. Ibáñez y L. G. Ullate, «A new beamformer based on phase dispersion to improve 2D sparse array response,» de *2012 IEEE 7th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 2012.
- [10] J. A. Jensen, de *10th Nordicbaltic Conference on Biomedical Imaging*, 1996.