

DISEÑO DE APERTURAS BIDIMENSIONALES DISPERSAS EN BASE A LA ESTADÍSTICA DE PASEO ALEATORIO

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: array dispersos, paseo aleatorio, imagen sintética

ABSTRACT

A Randomwalk Beamformer based on phase analysis that has the capability to reduce the grating lobes is presented. This paper analyzes the bidimensional array design process under the perspective of the Randomwalk analysis. The study has been applied to matrix and spiral array distributions. Finally, some solutions based on the Fermat Spiral Array are proposed and evaluated to show their strength against grating lobes.

RESUMEN.

En los últimos años se han desarrollado varias propuestas de conformadores de haz basados exclusivamente en el comportamiento de la fase. Este tipo de conformadores tienen la ventaja de reducir de forma sensible la influencia de los lóbulos de rejilla. El presente trabajo analiza el proceso de diseño de aperturas de arrays dispersos bidimensionales bajo la perspectiva de este análisis y en base a una estadística de paseo aleatorio. Así, tomando como referencia el *RandomWalk Beamformer* se propone el diseño de aperturas basadas en espirales con distinto número de elementos analizando sus prestaciones y robustez para componer imagen volumétrica.

Introducción

La imagen ultrasónica es una de las herramientas más populares para la visualización del interior de cuerpos opacos. Su campo de aplicación abarca desde la medicina al terreno industrial, donde su empleo se centra en las aplicaciones de Evaluación No Destructiva.

En general, los sistemas de imagen ultrasónica hacen uso de arrays de transductores que son estructuras multitransductor coordinadas tanto en emisión como en recepción, con el objeto de desviar la energía emitida y fijar la recepción en una dirección dada. Esta capacidad de control les permite componer una imagen línea a línea. El grado de libertad del sistema para deflectar el haz en el espacio depende de la organización del array. Así, un array lineal es capaz de producir un plano, mientras una distribución bidimensional es capaz de barrer un volumen.

La calidad de la imagen viene determinada por las características del array, que condicionan su rango dinámico y resolución. En general, la resolución depende del tamaño de la apertura. A su vez, para obtener una imagen de calidad es necesario mantener una distancia de media longitud de onda entre elementos [1]. Así, por ejemplo, una apertura bidimensional matricial con un poder de resolución de un grado debe contener más de 14400 elementos (120x120). En la actualidad es tecnológicamente posible implementar arrays densamente poblados [2], pero es evidente que el desarrollo de sistemas que puedan manejar simultáneamente un número tan grande de elementos supone un reto.

En los últimos años, apoyada por el fuerte avance tecnológico, existe una línea de trabajo muy activa enfocada en mejorar el control y procesamiento de las señales adquiridas mediante grandes aperturas: *rectilinear scanning* [3], *phased subarray processing* [4], *separable beamforming* [5], *microbeamforming* [6] o apertura sintética [7]. Por el contrario, la línea clásica de trabajo para afrontar este problema continúa centrada en la reducción de elementos activos en la apertura matricial [8]. En esta línea, algunos autores han optado por buscar soluciones basadas en otro tipo de geometrías para obtener nuevas disposiciones de los elementos: los arrays de anillos segmentados [9] o las espirales [10]. Este tipo de estructuras persiguen la obtención de coarrays más densos y con el menor grado de periodicidad posible que, aunque no eliminan los lóbulos de rejilla, reducen el volumen de elementos que colaboran en su formación y por lo tanto su impacto.

Otra estrategia para abordar el problema de la aparición de los lóbulos de rejilla pasa por el empleo de conformadores basados en la fase, desarrollados sobre técnicas de apertura sintética, como por ejemplo el de Factor de Coherencia de Fase (FCF) [11] o el Conformador de Paseo Aleatorio (*RandomWalk Beamformer*, RWB) [12].

Este trabajo se centra en la aplicación del RWB al diseño de arrays. Analizando cuál es el comportamiento que tiene con los lóbulos de rejilla, tanto en el array matricial bidimensional como en la espiral de Fermat. Para este último caso se describe el comportamiento de dos aperturas distintas de 64, 128 elementos.

EL CONFORMADOR DE PASEO ALEATORIO

Consideremos un array de estructura genérica 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).

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

En su forma analítica, estas señales se pueden expresar como:

$$S_{ij}(t) = s_{ij}(t) + q_{ij}(t) \quad (2)$$

donde $s_{ij}(t)$ hace referencia a la componente en fase y $q_{ij}(t)$ a la de cuadratura. En este caso la ecuación que proporciona el valor de un pixel sobre la posición \mathbf{x} en la imagen de envolvente compuesta sobre la región de interés es:

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

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 [12], 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:

$$RWB(\mathbf{x}) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{s_{ij}(t)}{|s_{ij}(t)|} * \delta(t + t_{ij}(\mathbf{x})) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{q_{ij}(t)}{|s_{ij}(t)|} * \delta(t + t_{ij}(\mathbf{x})) \right)^2} \Bigg|_{t=0} \quad (4)$$

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. En la Figura 1 se presenta distribución para un conjunto 4096 pasos (que corresponde a un array de 64 elementos), un conjunto de 16384 pasos (que corresponde a un array de 128 elementos) y un conjunto de 65536 pasos (que corresponde a un array de 256 elementos).

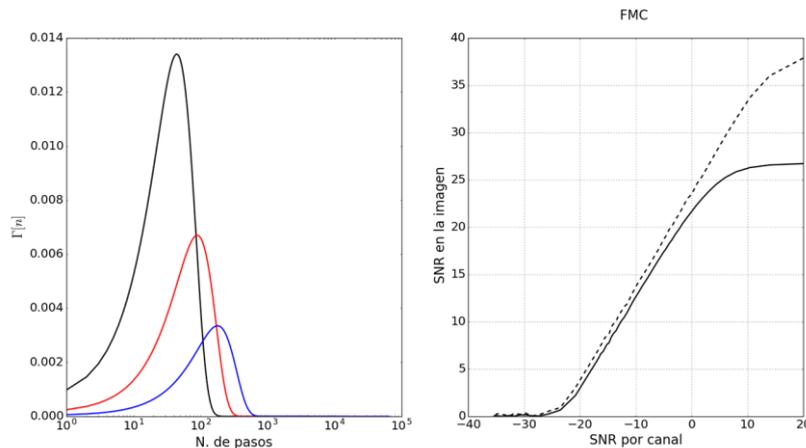


Figura 1. (DCH) Función de densidad de probabilidad correspondiente al comportamiento de la configuración FMC de distintos tipos de aperturas: 64 elementos (negro), 128 elementos (rojo) y 256 elementos (azul). (IZQ) Valor de un reflector puntual en la imagen para distintos niveles de SNR por canal para un array de 64 elementos. La curva discontinua hace referencia al DAS y la continua al RWB.

Esta función permite determinar para una probabilidad dada, cuál es el número mínimo señales que tienen significación estadística. Así, podemos decir que el valor de un punto de nuestra imagen RWB corresponde a un reflector con un 99.99% de probabilidad si excede los siguientes valores: para un array de 64 elementos 250 señales (6% del total); para un array de 128 elementos 490 señales (3% del total); y para un array de 256 elementos 950 señales (1.4% del total).

En estas condiciones, para un array de 64 elementos podemos establecer un umbral de ruido sobre el RWB de forma que por encima de -25 dB podemos considerar que existe reflector. Y en base a este umbral, podemos probar la robustez del método frente al ruido térmico por canal. La Figura 1-IZQ presenta este resultado tanto para el RWB como para el DAS. El aspecto más interesante de este resultado es que ambos conformadores presentan la misma sensibilidad. Se observa que para el RWB a partir de $SNR > 10$ se satura, ya que la coherencia entre señales es completa e independiente de la amplitud. En la región donde el ruido tiene suficiente fuerza para destruir el pulso, el nivel de coherencia máximo se pierde. Pero esto no implica que se pierda la

significación estadística del mismo que se mantiene hasta el mismo instante en que el DAS es incapaz de revelar la presencia del reflector (SNR por canal -25 dB).

Con este planteamiento, los lóbulos secundarios y de rejilla introducen un sesgo en la estadística que reduce el rango dinámico. No obstante, cuando éstos no están formados por la colaboración de toda la apertura, pueden ser susceptibles de ser eliminados por una suma mayoritaria de señales no coherentes. Esto depende básicamente de la estructura del coarray y del número de ciclos de la señal recibida. La Figura 2 analiza este fenómeno para un array lineal de 64 elementos, y esquemáticamente para un array de 5 elementos. Ambas aperturas con un espacio entre elementos de λ , lo que genera, en deflexión, un lóbulo de rejilla a 60° del haz principal. Tomando como referencia el array de 5 elementos y una excitación de 3 ciclos (Figura 2 SUP. IZQ.), los elementos del coarray están formados por diferentes señales que se combinan generando estos frente de onda independientes. Estos frentes se espacian entre sí progresivamente desde el foco hasta que en una determinada posición angular alcanzan una separación de una longitud de onda, sumándose de nuevo en fase y combinándose en el proceso tantos elementos según sea la longitud del pulso. Para el caso de la figura, este lóbulo alcanza un valor de 13 señales, frente al lóbulo principal que alcanza el valor de 25 señales.

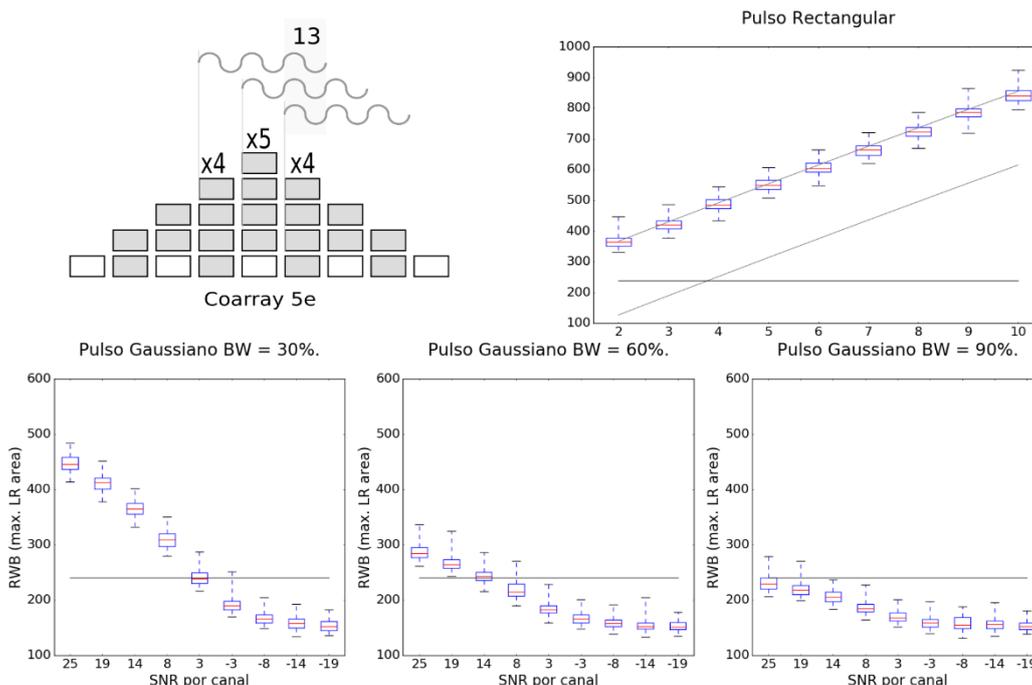


Figura 2. (SUP. IZQ.) Coarray correspondiente a un array de cinco elementos equiespaciados una longitud de onda. Para un array lineal de 64 elementos: (SUP. DCH.) sesgo introducido en el RWB en función del número de ciclos de la excitación; (INF. IZQ.) sesgo para un pulso gaussiano del 30% en función del ruido; (INF. CTO.) sesgo para un pulso gaussiano del 60% en función del ruido; (INF. DCH.) sesgo para un pulso gaussiano del 90% en función del ruido.

Para el RWB, se ha extendido el análisis a un array de 64 elementos; y considerando distintos escenarios con el fin de observar como el RWB responde a este fenómeno. Para cada escenario se han valorado 200 casos y tomando como resultado el valor de pico en la posición del lóbulo rejilla. Se ha señalado el umbral de -25 dB como referencia. En la parte superior hemos representado como aumenta el sesgo con el número de ciclos (pulso rectangular), y junto a este hemos representado con una línea el sesgo calculado a partir de la progresiva inclusión de elementos del coarray en función del número de ciclos. Se observa como en media los valores

simulados tienen la misma pendiente que el valor obtenido en las simulaciones desplazada 250 pasos. Este valor es justo el número de señales que determina nuestro criterio de detección. En la parte inferior se representa para distintos anchos de banda (30%, 60% y 90% pulso gaussiano) cuál es la influencia del ruido en la destrucción de los lóbulos. Los resultados muestran como a longitud bajo determinados niveles de ruido es posible eliminar los lóbulos de rejilla.

Del análisis de las gráficas de la Figura 2 se extrae la conclusión de que el sesgo que introduce el lóbulo de rejilla puede ser destruido si el grupo que lo genera es bajo y puede ser compensado por el resto de señales no coherentes. Este fenómeno se enfatiza al aumentar el nivel de ruido, ya que éste, junto con el proceso de normalización el RWB, destruyen los ciclos de baja amplitud del pulso gaussiano.

ARRAYS BIDIMENSIONALES

En consecuencia, el diseño de arrays bidimensionales debe plantear como objetivo generar un coarray donde la colaboración entre señales para componer una misma frecuencia espacial sea lo suficientemente baja como para que el sesgo introducido pueda ser compensado por el resto de señales. Para un número de elementos dado, esto supone crear un patrón denso y lo más irregular posible, evitando así el acople entre distintos elementos del coarray. En este sentido las espirales de Fermat constituyen una interesante alternativa de diseño [10].

Tomando como referencia un array de 64 elementos (diámetro 64λ) estudiaremos las diferencias entre un array matricial de 8×8 (Figura 3) y una apertura basada en la espiral de Fermat de dimensiones equivalentes (Figura 4). Para ambos casos calculamos cuál es su *Point Spread Function* (PSF) en la semiesfera ($\theta = [0, 90]$, $\phi = [0, 360]$) tanto para el DAS como para el RWB. En las simulaciones se ha usado una SNR de 26 dBs y el pulso tiene un ancho de banda del 60%. La espiral de Fermat fue diseñada para conseguir la mayor dispersión posible entre sus elementos ($\alpha = 145.625$).

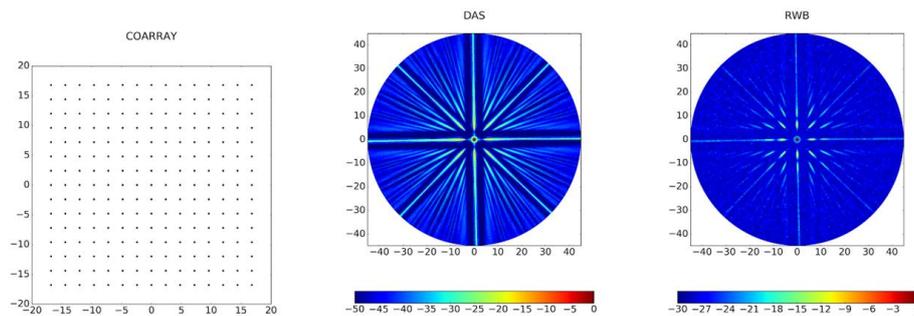


Figura 3. Apertura matricial de 8×8 (IZQ). Campo acústico producido por el DAS (CTO). Campo acústico producido por el RWB (DCH).

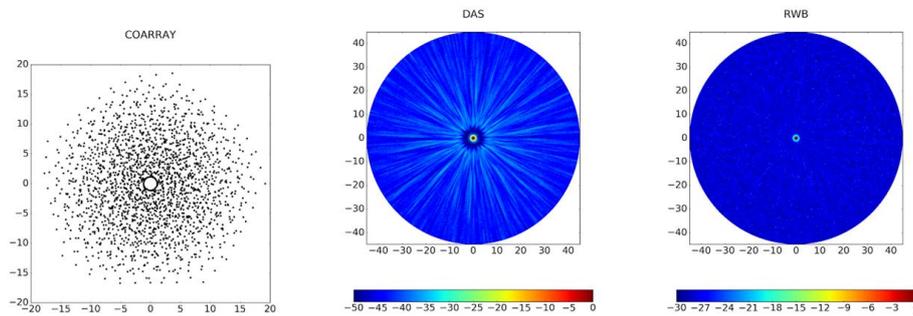


Figura 4. Apertura espiral de Fermat (IZQ). Campo acústico producido por el DAS (CTO). Campo acústico producido por el RWB (DCH).

Los resultados de ambas aperturas en el DAS muestran cómo se organizan los lóbulos de rejilla. En la apertura matricial estos se desarrollan sobre los ejes principales y alcanzan valores significativos reduciendo el rango dinámico en la imagen a 14 dB. En la espiral de Fermat los lóbulos se distribuyen por un área mayor y mantienen un nivel con pocas variaciones, de tal forma que mantienen un rango dinámico de -30 dB. Si consideramos el RWB, en la apertura matricial el patrón de sesgo introducido reduce el rango dinámico a -8.5 dB ya que el sesgo se ve potenciado por el elevado peso de los elementos del coarray. En la apertura de Fermat sin embargo los elementos del coarray tienen menos peso y quedan más distribuidos, en consecuencia, el sesgo introducido no resulta significativo y deja un rango dinámico de 25 dB, que es justo el valor de referencia obtenido a través de la distribución del paseo aleatorio.

Para entender mejor las consecuencias de este resultado diseñamos una escena de elementos puntuales con cuatro reflectores con diferentes SNR por canal (26 dB para el reflector colocado a 10°; -13 dB para los reflectores a 0° y -5°; y -20 dB para el reflector a -10°). Éstos se encuentran dispuestos sobre un mismo arco, distribuyéndose en aquellos puntos coincidentes con el máximo del lóbulo de rejilla teórico. Los resultados obtenidos, para ambas técnicas y las dos geometrías bajo estudio se muestran en las Figura 5 y 6:

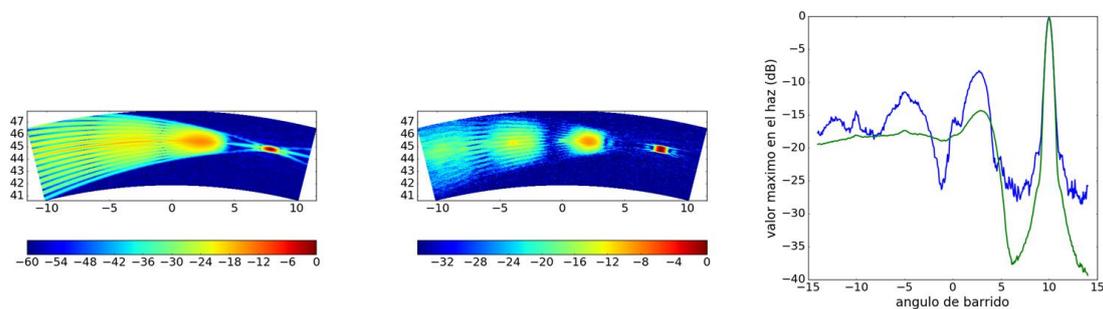


Figura 5. Imagen DAS (IZQ) y RWB (CTO) producida por el array matricial entre -15° y 15° en elevación. Corte lateral de los perfiles de máximos para ambos conformadores (DAS verde, RWB azul)

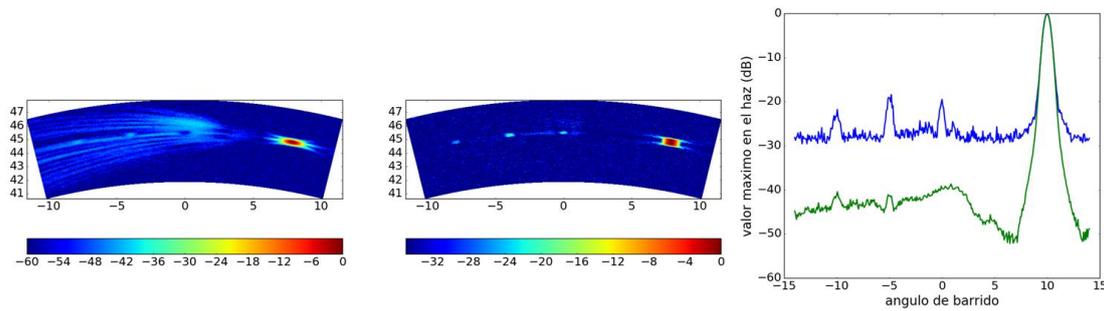


Figura 6. Imagen DAS (IZQ) y RWB (CTO) producida por el array de espiral entre -15° y 15° en elevación. Corte lateral de los perfiles de máximos para ambos conformadores (DAS verde, RWB azul)

La apertura matricial presenta un rango dinámico bastante pobre y no es capaz de revelar de forma eficiente la presencia de todos los blancos: tanto para el DAS como para el RWB todos los reflectores distinguibles (con el conocimiento explícito de su existencia) están contenidos dentro del rango de los lóbulos haciéndolos, en la práctica, indistinguibles del fondo. En contrapartida, el array de Fermat presenta en el DAS un rango dinámico mayor, con una estructura de lóbulos muy baja. Sin embargo, ésta es lo suficientemente relevante como para ocultar la presencia del blanco situado en el primer lóbulo de rejilla. Esta problemática se ve solventada por el procesamiento del RWB. En este caso, la estructura de los lóbulos de rejilla, al encontrarse por debajo del umbral estimado (-25 dB), queda prácticamente eliminada. Así, en el perfil lateral obtenemos como valor de pico en las posiciones correspondientes a los reflectores (de izquierda a derecha) -22.5 dB, -18.6 dB, -20 dB y 0 dB. Según el estudio teórico previo, expuesto en la Figura 1 (DCH), los valores esperables se corresponderían con -22.1 dB, -16.5 dB, -16.5 dB y 0 dB respectivamente. Fuera del blanco principal, que se encuentra en saturación, las diferencias son bajas y pueden achacarse al sesgo de los lóbulos de rejilla, que aún se encuentra presente. Esto puede verse en el ligero incremento en el fondo de ruido entre 0° y -5° . Si consideramos los niveles relativos entre los blancos sobre las señales (de 26 dB a -20 dB) podemos establecer un rango dinámico en la imagen es de 46 dB comprimido en un espacio de 25 dB.

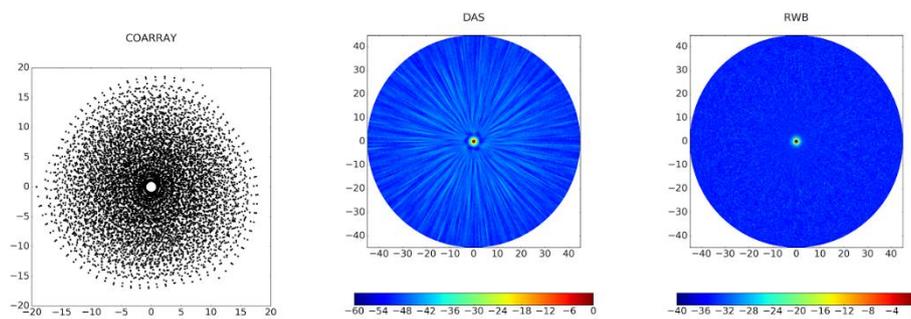


Figura 7. Apertura espiral de 128 elementos (IZQ). Campo acústico producido por el DAS (CTO). Campo acústico producido por el RWB (DCH).

Este estudio sobre el patrón de difracción se ha aplicado a una espiral de 128 elementos (Figura 7), obteniéndose el campo acústico equivalente generado por el DAS y el RWB. El patrón de difracción por el DAS desarrolla una estructura de lóbulos con valores que van desde -40 dB a -55 dB. En el caso del RWB esta estructura queda contenida entre -30 dB y -36 dB. Valores que se corresponden con la función de probabilidad del paseo aleatorio, que nos proporciona un umbral de ruido -30 dB. Este resultado muestra que se ha conseguido eliminar de esta forma los lóbulos de rejilla de la imagen.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha puesto de manifiesto como el Conformador de Paseo Aleatorio (RWB) maneja los lóbulos de rejilla y como a pesar de introducir un sesgo en la estadística, éste puede ser compensado cuando está compuesto por un número reducido de señales. Así, es posible disminuir su impacto, e incluso eliminarlos, si se hace un adecuado diseño de la estructura de distribución de los elementos.

En esta contribución, como solución a este problema, se ha propuesto una disposición de los elementos que componen el array siguiendo una espiral de Fermat. Esta geometría cumple con los requisitos necesarios para evitar la formación de estructuras ordenadas, reduciendo así el acoplamiento entre elementos cercanos en el coarray. Como consecuencia directa de esta decisión de diseño, se obtienen estructuras con lóbulos homogéneos y con un nivel bajo, que, asociadas al uso del RBW, permiten la detección de reflectores por debajo del rango dinámico que forma el patrón de difracción de la apertura, y condicionándola únicamente por el ruido del sistema.

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] S. W. Smith, H. G. Pavy y O. T. von Ramm, «High-speed ultrasound volumetric imaging system. I. Transducer design and beam steering,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 38, nº 2, pp. 100-108, 1991.
- [2] I. O. Wygant, N. S. Jamal, H. J. Lee, A. Nikoozadeh, Ö. a. K. M. Oralkan y B. T. Khuri-Yakub, «An integrated circuit with transmit beamforming flip-chip bonded to a 2-D CMUT array for 3-D ultrasound imaging,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 56, nº 10, pp. 2145-2156, 2009.
- [3] J. T. Yen y S. W. Smith, «Real-time rectilinear volumetric imaging,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 49, nº 1, pp. 114-124, 2002.
- [4] J. A. Johnson, M. Karaman y B. T. Khuri-Yakub, «Coherent-array imaging using phased subarrays. Part I: basic principles,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 52, nº 1, pp. 37-50, 2005.
- [5] M. Yang, R. Sampson, T. F. Wenzsch y C. Chakrabarti, «Separable beamforming for 3-D synthetic aperture ultrasound imaging,» de *SiPS 2013 Proceedings*, Taipei, 2013.
- [6] «Microbeamforming transducer architecture». Estados Unidos Patente US20080262351 A1, 22 septiembre 2005.
- [7] M. F. Ramussen 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, 2014.
- [8] R. E. Davidsen, J. A. Jensen y S. W. Smith, «Two-Dimensional Random Arrays for Real Time Volumetric Imaging,» *Ultrasonic Imaging*, vol. 16, nº 3, pp. 143-163, 1994.
- [9] M. Akhnik, O. Martinez, L. Ullate y F. Montero de Espinosa, «64 Elements two-dimensional piezoelectric array for 3D imaging,» *Ultrasonics*, vol. 40, nº 1, pp. 139 - 143, 2002.

- [10] O. Martínez-Graullera, C. J. Martín, G. Godoy y L. G. Ullate, «2D array design based on Fermat spiral for ultrasound imaging,» *Ultrasonics*, vol. 50, nº 2, pp. 280 - 289, 2010.
- [11] J. Camacho, M. Parrila y C. Fritsch, «Phase Coherence Imaging,» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 56, nº 5, pp. 958-974, 2009.
- [12] 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.