

## TÉCNICA DE CONFORMACIÓN BASADA EN EL COARRAY PARA MEJORAR LA CALIDAD DE IMAGEN EN SISTEMAS DE APERTURA SINTÉTICA.

Óscar Martínez-Graullera<sup>1</sup>, Julio Cesar Eduardo de Souza<sup>2</sup>, Ricardo Tokio Higuti<sup>2</sup>, Monsterrat Parrilla Romero<sup>1</sup>, Alberto Ibañez Rodriguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información ITEFI (CSIC), C/Serrano 144 Madrid  
e-mail: oscar.martinez@csic.es

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira,  
Avenida Brasil, 56. 15385000 - Ilha Solteira, SP - Brasil

### Resumen

El Delay-And-Sum es el proceso de conformación de haces ultrasónicos más usado. En esta técnica, para un punto dado en la imagen, se compensan los tiempos de vuelo tanto en emisión como en recepción de todas las señales involucradas y se suman las muestras correspondientes a esta compensación. Este, es un proceso robusto que sin embargo no es capaz de aprovechar toda la información contenida en las señales y en particular es poco eficiente a la hora de explotar la información espacial asociada a los pares emisor-receptor. Cuando la técnica de adquisición se basa en apertura sintética la información de las señales puede mapearse sobre el coarray, permitiendo la reconstrucción de la interferencia que los diferentes frentes de onda generan sobre la apertura. Bajo esta perspectiva podemos desarrollar una interpretación alternativa de la estima de la reflectividad como la búsqueda de un nivel de continua en el coarray sobre el que se forman oscilaciones generadas fuera del punto de interés. El presente trabajo estudia esta interpretación para arrays bidimensionales disperso y propone un procedimiento de estima de la reflectividad que minimiza al mismo tiempo los lóbulos secundarios.

**Palabras clave:** imagen ultrasonica, conformación de haces, 2D arrays, apertura sintética.

### Abstract

The Delay-And-Sum is the most widely used ultrasonic beamforming technique. Although this is a robust process it is not able to take advantage of all the information contained in the signals and in particular, it is not very efficient to exploit the spatial information associated with the emitter-receiver pairs. When synthetic aperture technique is employed the information of the signals can be mapped on the coarray. This allows the spatial reconstruction of the interference that the different wavefront generates on the aperture. Under this perspective, we can interpret the reflectivity estimation as the search of an off-set over which oscillations generated by the reflectors outside the point of interest are formed. This paper studies this interpretation for 2D sparse arrays and proposes a reflectivity estimation procedure that minimizes the secondary lobes.

**Keywords:** ultrasonic imaging, beamforming, 2D arrays, synthetic aperture

**PACS n<sup>o</sup>.** 43.60.-c, 43.60.Lq, 43.60.Fg

## 1. Introducción

Los métodos de generación de imagen ultrasónica mediante arrays de transductores se basan en el uso de la técnica DAS de retardo y suma (delay-and-sum, DAS) [1]. Esta técnica calcula los tiempos de vuelo de las señales desde los transductores hasta el punto de interés del espacio, sumando las muestras recibidas correspondientes para obtener una estima de la reflectividad a través del promedio. El procedimiento puede ser más o menos preciso, dependiendo de la organización de los transductores así como del modo de operación del sistema.

En lo que respecta al modo de operación, el más convencional es emitir una perturbación mecánica sincronizando el instante de disparo de todos los transductores para generar en emisión una región de máxima energía que podemos colocar en un punto determinado. En este caso el DAS sólo compensa los tiempos de recepción y ofrece la máxima calidad de imagen sólo en la zona sobre donde previamente hemos colocado el foco de emisión. Alternativamente, podemos emplear una técnica de apertura sintética que en su forma general consiste en adquirir de forma independiente las señales correspondientes a todos los pares posibles de transductores en emisión-recepción. Este conjunto de señales se conoce como Full Matrix Capture (FMC). En este caso, el DAS compensa los tiempos tanto de emisión como de recepción de todos los pares de transductores involucrados sobre todos los puntos de la región de interés y toda la imagen presenta la máxima calidad. Este modo de operación es el que nos interesa aquí.

Por simplicidad supongamos un sistema de imagen compuesto por una apertura bidimensional de  $N$  elementos. Entonces, podemos decir que las muestras que se emplean en evaluar la reflectividad de un punto  $\vec{\chi}$  del espacio bajo estudio vienen dadas por

$$\text{FMC}(\vec{\chi}) : \left\{ s_{ij}(\vec{\chi}) = s_{ij}(\tau_{ij}), \tau_{ij} = \left| \frac{\vec{\chi} - \vec{x}_i}{c} \right| + \left| \frac{\vec{\chi} - \vec{x}_j}{c} \right| = \forall i, j = [1, N] \right\} \quad (1)$$

donde,  $\vec{x}_i$  y  $\vec{x}_j$  son las posiciones del emisor y del receptor respectivamente y  $s_{ij}(\tau)$  la muestra de la señal de eco correspondiente al citado par emisor/receptor, que corresponde con el tiempo de vuelo al punto  $\vec{\chi}$  sobre la señal  $s_{ij}(t)$ . Si nombramos a la señal como:

$$s_{ij}(\vec{\chi}) = m_{ij}(\vec{\chi}) + n_{ij}(\vec{\chi}) \approx m(\vec{\chi}) + n_{ij}(\vec{\chi}) \quad (2)$$

donde  $m_{ij}(\vec{\chi})$  es el valor de la reflectividad, según las características propias de los transductores involucrados y la función de difracción del reflector. Por comodidad, y dado que en condiciones ideales estos factores serían iguales en todo par  $ij$ , vamos a aproximar este valor a  $m(\vec{\chi})$ . Mientras, en el término  $n_{ij}(\vec{\chi})$  vamos a unificar toda referencia al ruido acústico, producido por los frentes de ondas interferentes desde otras posiciones, y el ruido térmico. La estima del valor de la reflectividad  $\hat{m}(\vec{\chi})$  se obtiene entonces como:

$$\hat{m}(\vec{\chi}) = m(\vec{\chi}) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{n_{ij}(\vec{\chi})}{N^2} = m(\vec{\chi}) + n(\vec{\chi}) \quad (3)$$

Por el otro lado, es bien sabido que la distribución espacial de los transductores sobre la apertura actúa como un filtro espacial. Considerando  $E(\vec{x})$  y  $R(\vec{x})$  las distribuciones espaciales de los transductores en la apertura, el modelo de pulso eco de la misma es equivalente a una nueva distribución espacial conocida como coarray,  $C(\vec{x})$ , que se obtiene de la convolución entre ambas:

$$C(\vec{x}) = E(\vec{x}) * R(\vec{x}) \quad (4)$$

Donde sobre  $C(\vec{x})$ , aquellas señales que se localizan en una misma posición  $\vec{x}$  proporcionan la misma información espacial y por tanto son redundantes. Esto implica que la información espacial queda modulada por la organización espacial de la redundancia del coarray [2].

El interés en esta construcción surge cuando sobre la misma puedes mapear la información procedente de  $FMC(\vec{\chi})$ . En ese caso, el procedimiento de retraso reordena las señales generando un frente de onda plano cuando el origen de la respuesta de eco corresponde con el punto  $\vec{\chi}$ . Las fuentes de eco fuera de ese punto, pero sobre el mismo arco de focalización, se organizan en forma de oscilaciones cuya frecuencia esta en función del ángulo de elevación relativo respecto al eje que une la apertura con el punto focalizado. La organización espacial de estos frentes de interferencia que sobre el coarray se orientan en la dirección del origen de la perturbación. De forma similar una fuente de eco fuera de ese plano, genera un tipo de perturbaciones con distinto comportamiento frecuencial pero que también se orienta según la dirección de la fuente respecto al foco. En adelante llamaremos perturbación a la energía presente en el coarray que no tiene su origen en el punto observado.

El DAS actúa como un filtro paso bajo muy robusto que estima la reflectividad en  $\vec{\chi}$  como un promedio de  $FMC(\vec{\chi})$ . Esto significa que suma este conjunto de datos sin más consideración, con la esperanza de que las perturbaciones se anulen a si mismas. Cuando esto no pasa, se genera un lóbulo secundario que hace perder calidad a la misma imagen. No obstante, si los datos se obtienen de forma disociada (apertura sintética) y se pondera la redundancia en el coarray esta puede eliminar las perturbaciones y mejorar la calidad de la imagen.

## 2. Cálculo de la reflectividad en la imagen a través del coarray

Todo este discurso, es bien conocido en el caso de arrays matriciales. Para expandirlo al caso de arrays dispersos con distribución no matricial debemos usar una expresión más generalizada del coarray donde a sus elementos es necesario proporcionarles un kernel que modele su área de influencia. De esta forma componemos el coarray según una función continua sobre una superficie.

$$C(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(\vec{x} - (\vec{x}_i + \vec{x}_j)) \quad (5)$$

Donde,  $f(\vec{x})$  es una función gaussiana que a modo de kernel modela el área de influencia de la muestra  $s_{ij}(\tau)$  en el coarray.

$$f(\vec{x}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{|\vec{x}|^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

Donde, asumiendo que en la apertura un muestreo espacial mayor de  $\lambda/2$  genera artefactos en la imagen, el valor de  $\sigma$  se ajusta a  $\lambda/4$ . Si consideramos el punto del espacio  $\vec{\chi}$  donde queremos calcular la reflectividad podemos introducir el valor de las muestras del FMC de tal forma que:

$$C(\vec{x}, \vec{\chi}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{ij}(\vec{\chi}) f(\vec{x} - (\vec{x}_i + \vec{x}_j)) \quad (7)$$

Si además, sobre la ecuación 7 introducimos una función de ponderación espacial, podemos explotar la capacidad del coarray para aplicar filtros espaciales,

$$C_G(\vec{x}, \vec{\chi}) = G(\vec{x}) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{ij}(\vec{\chi}) f(\vec{x} - (\vec{x}_i + \vec{x}_j)) \quad (8)$$

Donde,  $G(\vec{x})$  es una función arbitraria que usamos para modelar la respuesta del coarray y alterar la distribución de los lóbulos secundarios así como la resolución lateral. Así podemos decir que nuestra estima de reflectividad se puede obtener como la integral sobre la superficie que define el coarray:

$$\hat{m}(\vec{\chi}) = \frac{1}{K} \int_S C_G(\vec{x}, \vec{\chi}) dS = m(\vec{\chi}) + \frac{n_G(\vec{\chi})}{Q} \quad (9)$$

Donde  $K$  es una constante de normalización que depende de  $G(\vec{x})$  y del propio coarray, y cuyo valor es conocido. Por tanto, este proceso permite obtener un resultado semejante al de la ecuación 3.

$$Q = \int_S G(\vec{x}) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(\vec{x} - (\vec{x}_i + \vec{x}_j)) dS \quad (10)$$

Y  $n_G(\vec{\chi})$  representa el ruido filtrado por  $G(\vec{x})$

$$n_G(\vec{\chi}) = \int_S G(\vec{x}) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N n_{ij}(\vec{\chi}) f(\vec{x} - (\vec{x}_i + \vec{x}_j)) dS \quad (11)$$

## 2.1. Filtrado direccional sobre el coarray

Dada la naturaleza organizativa del ruido acústico sobre el coarray podemos explotar el Fourier Slice Theorem para hacer un análisis direccional del comportamiento del coarray. Para ello hacemos uso del concepto array lineal equivalente a partir del coarray

$$C(x, \phi) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(x(\phi) - (x_i(\phi) + x_j(\phi))) \quad (12)$$

Donde,  $x(\phi)$ ,  $x_i(\phi)$  y  $x_j(\phi)$  son las proyecciones de los vectores  $\vec{x}$ ,  $\vec{x}_i$  y  $\vec{x}_j$  sobre la dirección de  $\phi$ . Al igual que en el caso general, sobre este array la redundancia de información en el conjunto  $FMC(\vec{\chi})$  en la dirección de  $\phi$  se presenta cuando distintos elementos caen sobre una misma posición. Y de la misma forma que hicimos en el caso general podemos usar una función  $g(x, \phi)$  para ponderar como se combina esta redundancia

$$c(x, \phi, \vec{\chi}) = g(x, \phi) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (m(\vec{\chi}) + n_{ij}(\vec{\chi})) f(x(\phi) - (x_i(\phi) + x_j(\phi))) \quad (13)$$

Donde  $g(x, \phi)$  se define para promediar la redundancia sobre el coarray.

$$g(x, \phi) = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(x(\phi) - (x_i(\phi) + x_j(\phi)))} \quad (14)$$

Este filtro es sólo dependiente de la apertura y por tanto es conocido. Prolongando el estudio hasta obtener la estima de la reflectividad, tenemos que:

$$\hat{m}(\vec{\chi}, \phi) = m(\vec{\chi}) + \frac{n_g(\vec{\chi}, \phi)}{q(\phi)} \quad (15)$$

donde  $q(\phi)$  es la constante de normalización:

$$q(\phi) = \int_x g(x, \phi) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(x(\phi) - (x_i(\phi) + x_j(\phi))) dx \quad (16)$$

y

$$n_g(\vec{\chi}, \phi) = \int_x g(x, \phi) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N n_{ij}(\vec{\chi}) f(x(\phi) - (x_i(\phi) + x_j(\phi))) dx \quad (17)$$

Lo interesante de la ecuación 15 es que proporciona una estima de la reflectividad donde el sesgo se corresponde en como se organiza la perturbación en la dirección estudiada. Si, sobre un punto  $\vec{\chi}$  dado, extendemos este estudio a todo el espacio de  $\phi = [0, 2\pi[$ . Al ser  $g(x, \phi)$  una función de ponderación distinta para cada valor de  $\phi$ , el valor de  $\hat{m}(\vec{\chi}, \phi)$  proporcionará una estima distinta para cada ángulo, permitiendo componer para el punto  $\vec{\chi}$  un conjunto de estimas que responderá al valor subyacente de  $m(\chi)$ .

$$\hat{M}(\vec{\chi}) = \{\hat{m}(\vec{\chi}, \phi) = m(\vec{\chi}) + n_g(\vec{\chi}, \phi), \quad \forall \phi \in [0, 2\pi[ \} \quad (18)$$

donde los patrones de ruido  $n_g(\chi, \phi)$  son los que marcan la diferencia entre los diferentes resultados.

## 2.2. Selección de la estima

Con el fin de evaluar el funcionamiento de esta técnica, se ha diseñado un array bidimensional disperso con dos aperturas separadas de 32 elementos para emisión y recepción. Esto se ha hecho así para reducir el nivel de redundancia, al no existir elementos recíprocos, y dar al coarray más riqueza informativa. Este array tiene un diámetro de 35mm, que para una frecuencia de operación de 3MHz (BW=60 %) supone en agua un diámetro de  $70\lambda$  por lo que genera una resolución lateral por debajo del grado. En la figura 1 tenemos representada la apertura y el coarray correspondiente.

En la figura 2 se presenta la simulación del campo de presión acústica para esta apertura en base a un modelo de elementos puntuales. Para este caso los lóbulos secundarios alcanzan los -34dB de valor de pico y su valor medio ronda los -40dB. En la semiesfera del campo podemos ver como el desfase entre los elementos de cada anillo permite que los lóbulos radiales creados se distribuyan minimizando las superposiciones entre los mismos.

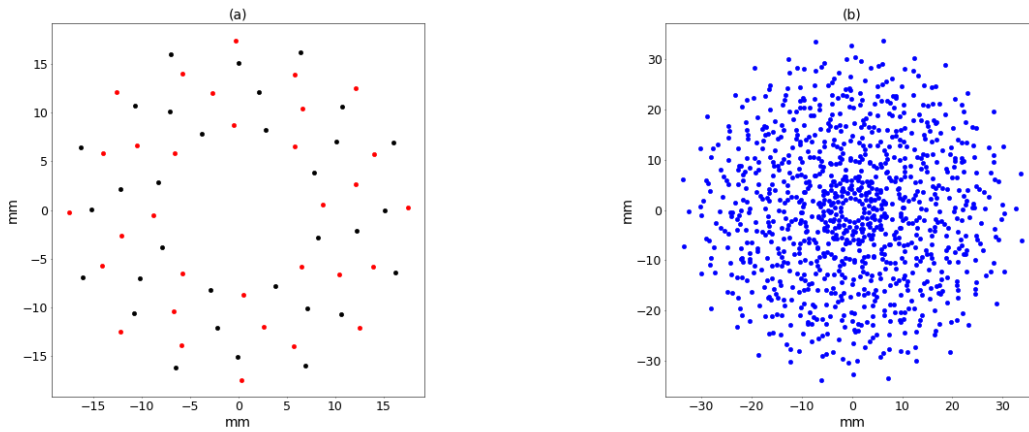


Figura 1: En la parte izquierda de la figura se muestra el array diseñado, donde los puntos en rojo son los centros de los elementos array en emisión y en negro los centros de los elementos del array en recepción. En la parte derecha tenemos una representación de los elementos del coarray.

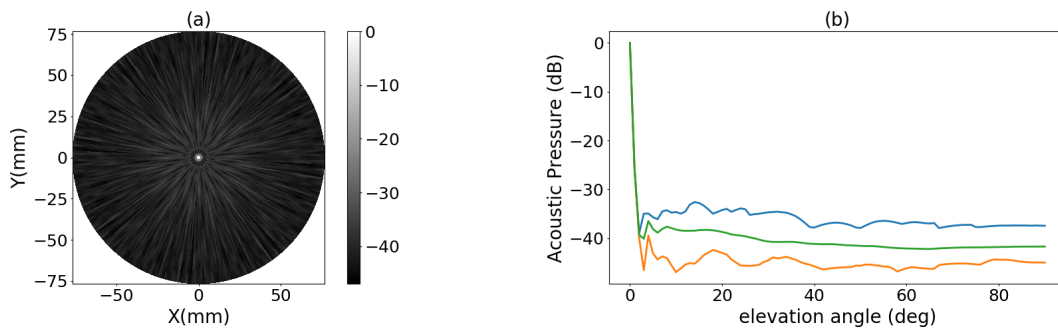


Figura 2: En la parte izquierda de la figura se muestra el campo calculado sobre una semiesfera ( $\theta = [0 : 90]$ ,  $\phi = [0 : 360]$ , resolución de  $1^\circ$ ) en el plano focal. En la parte derecha para cada ángulo de elevación se ha representado el campo en tres valores: máximo (azul), media (verde) y mínimo (rojo).

En las siguientes figuras se muestran los resultados de una simulación de una línea de imagen que contiene tres reflectores ideales. Estos están situados sobre una semiesfera a 68mm de profundidad de la apertura: sobre el eje Z se coloca el reflector principal con  $0dB$  de reflectividad; a  $+4^\circ$  se coloca un reflector de reflectividad  $-30dB$ , que constituye el blanco más bajo que podemos determinar con certidumbre; y a  $-4^\circ$  se coloca un reflector de reflectividad  $-40dB$ , que queda fuera del rango dinámico de la apertura. Hemos calculado la imagen en la línea que contiene a los tres reflectores desde  $-10^\circ$  a  $+10^\circ$ . En la figura 3(a), se muestra en forma de matriz el conjunto de estimas obtenidas (barrido en azimut con resolución de  $1^\circ$ , en el eje de abscisas) para todos los ángulos de elevación de esta línea (eje de ordenadas). Se observa que, independientemente del ángulo de azimut sobre el que proyectemos la apertura, en aquellas posiciones donde existe un reflector fuerte las estimas tienen valores similares. Este comportamiento se mantiene incluso cuando el valor de reflectividad es bajo pero dentro del rango dinámico de la apertura. Para el caso en que el reflector queda por debajo del rango dinámico, en la figura se observa que se desarrolla un patrón que podría llevar a deducir la existencia del mismo.

En la figura 3(b) tenemos una representación de la densidad de las soluciones para cada ángulo de ele-

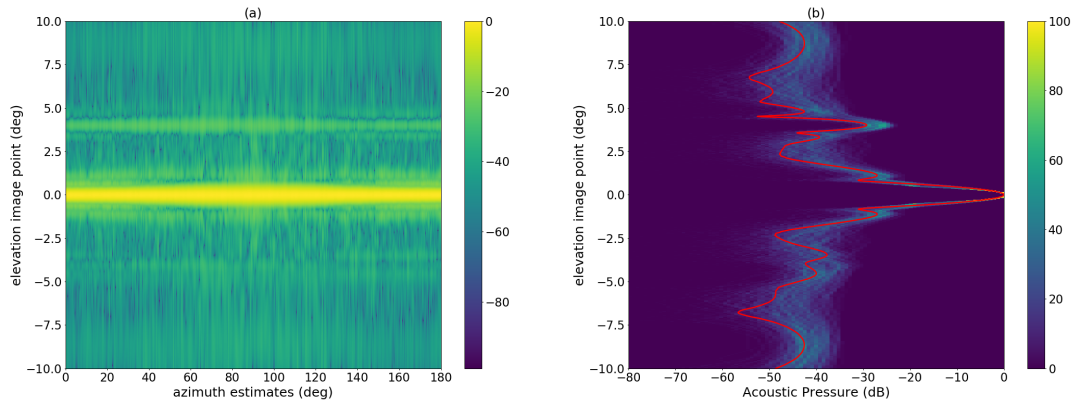


Figura 3: (a) Representación de todas las estimas en azimut de cada posición de elevación. (b) reordenación de las soluciones de azimut sobre el histograma para cada posición de elevación

vacación y representada en una línea roja el nivel de presión medido por el DAS convencional. Si bien se confirma que los valores de la estima sobre reflectores grandes se concentran, los valores sobre los lóbulos secundarios se expanden en amplias zonas con diferencias superiores a los 20dB en algunas zonas. En el caso del reflector a  $+4^\circ$  estas estimas son incluso superiores al valor del DAS. En el reflector por debajo del rango dinámico encontramos soluciones que se acercan al valor de referencia pese a que el DAS en esa posición detecta un mínimo.

Estudiando la distribución de estimas para un punto dado podemos encontrar una analogía entre esta situación con el problema clásico de *multipath* en radiocomunicaciones donde este conjunto de estimas se modela en función de una distribución de Rice [4]. El modelo distribución de Rice ya ha sido empleado en el análisis de la estructura del *speckle* en imágenes médicas ultrasónicas, y en este sentido esta ampliamente aceptado que una distribución de lóbulos secundarios puede analizarse según esta distribución [5–7].

$$f(y|\nu, \sigma) = \frac{y}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-(y^2 + \nu^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{y\nu}{\sigma^2}\right) \quad (19)$$

donde  $\nu$  y  $\sigma$  son los parámetros característicos de la distribución [8] que estimados a partir de  $\hat{M}(\chi)$  permiten modelar todo el conjunto de soluciones. En la figura 4 se presenta la reconstrucción de la figura 3(b) a partir de estos parámetros estimados. El resultado es una versión suavizada de la misma sobre la que se puede operar para filtrar la imagen. En la figura 4(b) presentamos de nuevo la curva el DAS (en rojo) y dos soluciones estimadas de la imagen: en verde se presenta la estimación para un percentil del 99%; y en amarillo se presenta la estimación para un percentil del 1%. Estos límites, que pueden extenderse todo lo que se considere necesario dentro del margen de  $[0, 1]$ , muestran por un lado que la solución del DAS esta perfectamente integrada dentro del espacio de soluciones y por otro que el rango dinámico de la imagen se puede expandir de forma controlada afectando en menor grado a los reflectores que a los lóbulos secundarios. No obstante, como puede verse en el caso del reflector a  $-40dB$  ni el DAS, ni este procedimiento, siguiendo un umbral fijo, ofrecen una adecuada detección por debajo del rango dinámico.

### 2.3. Rician beamforming

Este proceso desarrolla un conformador estadístico y convierte el criterio de selección de la estima en el control de la calidad de la imagen. En este caso, dado que se sigue la distribución Rician hemos

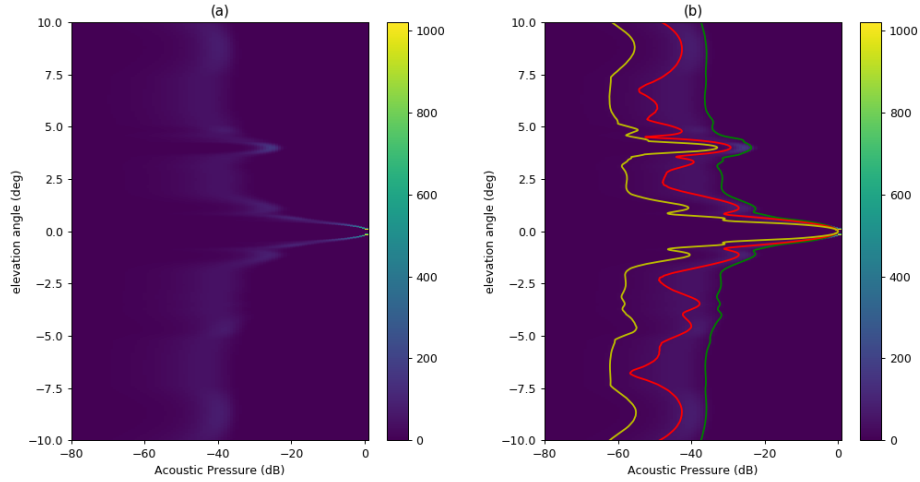


Figura 4: (a) Reconstrucción de los espacio de soluciones  $\hat{M}(\chi)$  en la línea estudiada a partir de la distribución de Rice. (b) Representación sobre la reconstrucción del DAS (rojo) y los percentiles del 99 % (verde) y del 1 % (amarillo).

denominado a este proceso *Rician beamforming* (RIC) [3]. Como criterio de selección de la estima se proponen dos tipos de soluciones. El umbral fijo, que es la selección de un percentil dentro de la distribución. Y el umbral variable, que depende del punto analizado y que mantiene la información de textura.

En el caso del umbral fijo consideramos un valor arbitrario del percentil  $p$  y haciendo uso de la función inversa de la *Cumulative Distribution Function* (CDF) ( $F^{-1}(y)$ ) obtenemos el valor de nuestra estima

$$\hat{m}_p(\vec{\chi}) = F^{-1}(p) \quad (20)$$

Como umbrales variables hemos considerado dos. El primero, esta asociado al resultado del DAS es una posible opción. Así, usando la *Cumulative Distribution Function* (CDF) podemos obtener la posición en el percentil del DAS  $F(\hat{m}(\vec{x}))$  y desde este valor mover el percentil proporcionalmente a un factor  $p$  arbitrario.

$$\hat{m}_p(\vec{\chi}) = F^{-1}(pF(\hat{m}(\vec{x}))) \quad (21)$$

El segundo umbral, esta asociado al cociente entre la contribución en potencia de la señal directa y las otras contribuciones consecuencia del efecto multicamino [8]. Este cociente se denomina *parámetro de forma* ( $k$ ) y caracteriza a la distribución. Se obtiene como:

$$k = \frac{\nu^2}{2\sigma^2} \quad (22)$$

A partir de este valor, normalizado para acotarlo en el intervalo  $[0, 1]$ , nuestra estima es:

$$\hat{m}_p(\vec{\chi}) = F^{-1}(k_n^p) \quad (23)$$

donde  $p$  se define entre  $[0, 1]$ , donde 0,5 corresponde a la compensación del efecto cuadrático.

Los resultados de estas tres estrategias se pueden ver en la figura 5. En todas la figuras, la línea roja se corresponde con el resultado del DAS. En general se observa como todas las estrategias aumentan el rango dinámico, reduciendo en mayor o menor grado el reflector secundario y generando una mayor resolución lateral. Además, pese a reducir la intensidad de los lóbulos secundarios todas mantienen la



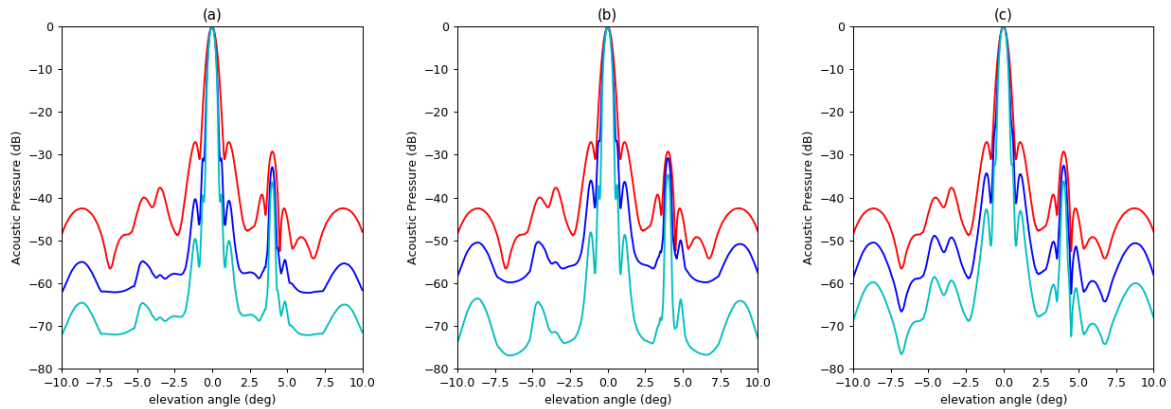


Figura 5: Estrategias de conformado sobre la distribución de Riciana. (a) percentil fijo ( $p = ,01$  línea azul y  $p = ,001$  línea cían), (b) percentil variable en función de  $k$  ( $p = ,5$  línea azul y  $p = 1$ . línea cían)(c) variable respecto al DAS ( $p = ,01$  línea azul y  $p = ,001$  línea cían).

estructura de algunos elementos principales (lóbulos situados a  $8,7^\circ$  del reflector principal) que dependen de la distribución de los elementos en la apertura.

En la figura 5(a) analizamos el resultado de aplicar un percentil constante a toda la imagen para valores de  $p = 0,01$  (línea azul) y  $p = 0,001$  (línea cían) respectivamente. En la figura 5(b) analizamos el resultado de aplicar un percentil variable en función de  $K$  a toda la imagen para valores de  $p = 0,5$  (línea azul) y  $p = 1,0$  (línea cían) respectivamente. En la figura 5(c) analizamos el resultado de aplicar un percentil variable a toda la imagen para valores de  $p = 0,01$  (línea azul) y  $p = 0,001$  (línea cyan) respectivamente. Es interesante como el modelo de la distribución riciana aplana el fondo de la imagen y deja reducida la línea a los elementos principales salvo en el caso de estar asociado al DAS, donde el perfil de lóbulos se replica a diferentes profundidades. De los tres, el resultado asociado al factor  $K$  es la que mejor respuesta tiene con el reflector secundario. La constante por su parte tiene la mejor respuesta lateral. Si analizamos la respuesta sobre el reflector secundario podemos ver que la pérdida de reflectividad alcanza los 6dB en los valores más extremos y, según la estrategia tomada, entre 2 y 3dB en las más suaves. Sobre el reflector más bajo, la solución basada en el DAS mantiene el perfil de lóbulos secundarios original. No obstante los otros dos métodos la modifican y resaltan la presencia del reflector si bien con muy baja intensidad y a un nivel comparable a los lóbulos secundarios en todos los casos.

La solución de un percentil fijo es eficiente cuando se pretende aplicar un criterio conservador en la imagen y se toman percentiles bajos. Esto aumenta el contraste pero minimiza el valor de los reflectores más débiles. Su uso potencial esta principalmente en el campo de la evaluación no destructiva. La solución variable basada en el DAS sigue ese mismo criterio conservador, minimizar la reflectividad para reducir el ruido, pero intentando mantener la estructura de lóbulos subyacente. Ambas técnicas ofrecen un resultado de reflectividad por debajo del DAS. En contraste, el uso del parámetro  $k$  permite aumentar la reflectividad cuando la concentración de energía en una solución es significativa, lo que permite mejorar la detección respecto al DAS.

### 3. Aplicación en imagen médica

Con el fin de verificar el funcionamiento de este conformador en situaciones más complejas hemos procedido a desarrollar un modelo de simulación siguiendo las pautas de los phantoms médicos de calibración de ultrasonidos. El modelo esta compuesto por 20 quistes distribidos en una retícula de  $5 \times 4$ . Entre

cada par de quistes se ha colocado un reflector puntual y entre las tres primeras filas se han distribuidos dos conjuntos de cuatro hilos de tal forma que los de la izquierda están separados  $1\text{mm}$  y la derecha  $2\text{mm}$ . Respecto a los quistes, de izquierda a derecha la reflectividad media de cada quiste es  $2\text{dB}$  menor que el anterior. Tomando como referencia el quiste situado en  $(-20, 80)$  el paso de fila significa  $10\text{dB}$  de diferencia. En la última fila los quistes se sitúan en valores de  $-30\text{dB}$ , que es el nivel de referencia para el ruido de clutter. El último quiste de esa fila es hueco. El nivel de ruido eléctrico es de  $-26\text{dB}$ . Las imágenes resultantes se pueden ver en la figura 6, en la izquierda la imagen del DAS y en la derecha la imagen del RIC. Se observa que existe una mejora significativa del contraste, destacando la eliminación de los lóbulos secundarios de la primera fila, así como de la resolución lateral. Se percibe la disminución media de la intensidad de los quistes que por debajo de  $-30\text{dB}$  son indistinguibles del fondo de referencia en ambas imágenes. Además se observa que pese al incremento de contraste las estructuras subyacentes en el clutter son identificables en ambas imágenes. Con objeto de poder comparar estas imágenes se han realizado una serie de figuras que analizaremos a continuación.

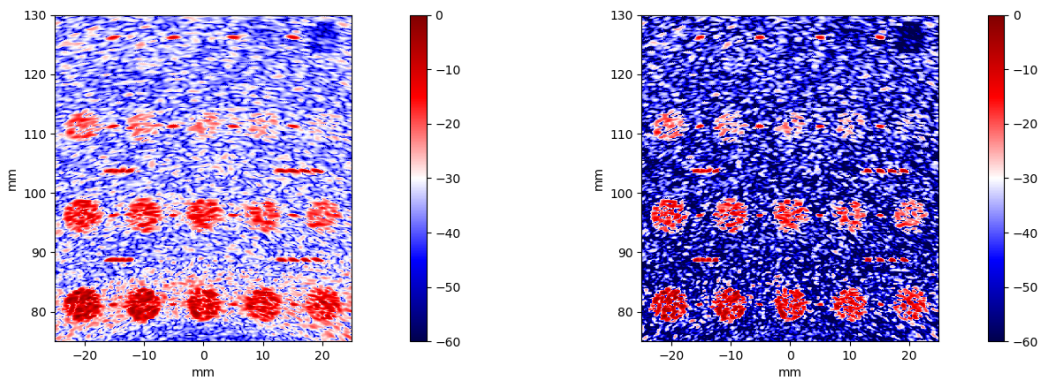


Figura 6: En la izquierda se presenta la imagen obtenida a partir de la conformación DAS. En la derecha se muestra el resultado de la conformación RIC

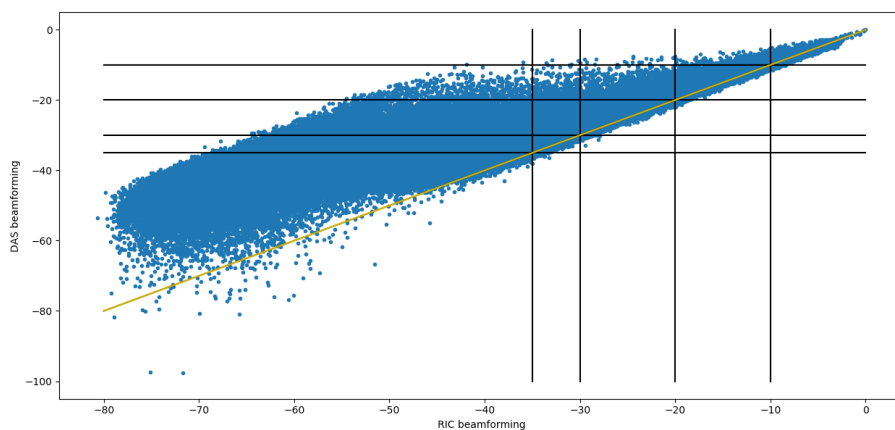


Figura 7: Representación punto a punto de la conformación DAS contra la RIC. Se han marcado las regiones correspondiente con cortes a  $-10\text{dB}$ ,  $-20\text{dB}$ ,  $-30\text{dB}$  y  $-35\text{dB}$  así como la línea identidad.

La figura 7 compara, punto a punto en decibelios, una imagen contra la otra. En rojo se ha señalado la

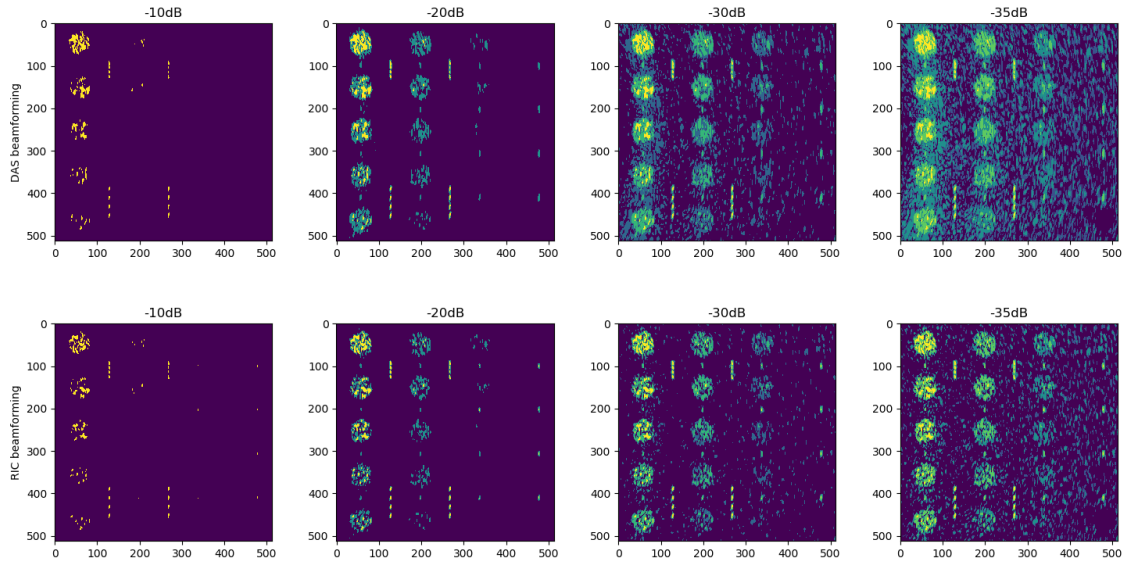


Figura 8: Representaciones segmentadas por nivel de la imágenes del DAS y del RIC a  $-10dB$ ,  $-20dB$ ,  $-30dB$  y  $-35dB$ .

línea donde se sitúa la relación uno a uno entre ambas imágenes, y en negro se han marcado ciertas regiones con cortes a  $-10dB$ ,  $-20dB$ ,  $-30dB$  y  $-35dB$  dentro de las cuales se encuentran los elementos más significativos de la escena recreada. En la figura 8 se presentan las imágenes que se corresponde con estas regiones.

El primer hecho significativo en la figura 7, es que el RIC introduce una ganancia positiva de hasta  $3dB$  en una serie de puntos que se extienden desde  $0dB$  hasta  $-45dB$ . En la figura 8 (corte de  $-10dB$ ) se observa que eso implica una mejora en la detección de los reflectores puntuales de las últimas filas. Al mismo tiempo en la figura 7 se observa que se atenúa un significativo número de puntos dentro de las zonas principales, alcanzando dentro del rango de la imagen de  $-30dB$  al 50% de los puntos (figura 8). Si observamos las imágenes (corte de  $-20dB$  en la figura 8) vemos que esa reducción se hace a costa de un incremento de la resolución lateral y en el caso del corte de  $-30dB$  de la eliminación de los lóbulos secundarios. En el corte de  $-35dB$ , que constituiría el fondo de ruido de la apertura se observa que la imagen RIC tiene una mejor calidad que la imagen DAS. Por último, hay que destacar que el incremento en el contraste tiene un límite de alrededor de  $40dB$

## 4. Conclusiones

El primer aporte de este trabajo ha sido presentar una solución de conformación para imagen ultrasónica 3D basada en un conformador estadístico. Para ello se ha generado un procedimiento capaz de generar un conjunto de estimas posibles de reflectividad sobre un punto dado. Una vez se dispone de este espacio de soluciones, hemos elaborado un modelo estadístico según la distribución de Rice que puede modelar un conjunto infinito de probables soluciones a partir de dos parámetros  $(\mu, \sigma)$ .

El segundo aporte de este trabajo, ha sido desarrollar sobre este modelo estadístico distintas técnicas para seleccionar la estima entre ese conjunto de probables soluciones, que modulan las características de la

imagen. En este trabajo se ha tomado como referencia principal para seleccionar esa estima el factor de forma  $K$  de la distribución de Rice.

El tercer aporte ha sido mostrar cuales son las ventajas de este conformador. Así frente al DAS, aunque para el ejemplo desarrollando las imágenes resultantes mantienen las limitaciones de la imagen original en lo que respecta al rango dinámico, ha mejorado el contraste de la imagen, la resolución lateral y la reflectividad.

El presente trabajo abre además varias líneas de trabajo. Primero en el diseño de arrays dispersos, hacia donde es fácil extrapolar reglas de diseño basadas en aspectos puramente geométricos. Segundo, en el desarrollo de modelos estadísticos que se aproximen mejor al conjunto de soluciones obtenidos. Tercero, en mejorar la detección de reflectores por debajo del rango dinámico a partir del análisis del espacio de soluciones.

## Agradecimiento

Este trabajo es resultado del proyecto DPI2016-80239-R, financiado por el Gobierno de España a través de la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (AEI/FEDER, UE). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

## Referencias

- [1] C. Holmes, B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox, “Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation”, *NDT & E Int.*, 38(8) 2005, 701 – 711.
- [2] R. T. Hocror and 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, 1990, 735-752.
- [3] N. Baba and K. Murata, “Filtering for image reconstruction from projections,” *J.Opt. Sot. Amer.*, vol. 67, pp. 662-668, 1977
- [4] Bernard Sklar, “Rayleigh Fading Channels in Digital mobile Communication Systems Part I: Characterization”, *IEEE Communication Magazine*, July 1997, 90–100.
- [5] Nadarajah, Saralees, ”Statistical distributions of potential interest in ultrasound speckle analysis”, *Physics in Medicine & Biology*, 52(10), 2007, 213-227.
- [6] Aysal, T.C. et al., Rayleigh-maximum-likelihood filtering for speckle reduction of ultrasound images”. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 26(5) 2007, 712-727.
- [7] Eltoft, T., ”Modeling the amplitude statistics of ultrasonic images”. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 25(2) 2006, 229-240.
- [8] Kushal K. et al., “Estimation of the parameters of the Rice distribution”. *J. Acoust. Soc. Am.* 89 (3), 1991, 1193-1197.