

SYNTHETIC APERTURE IMAGING TECHNIQUES FOR 2D SPIRAL SPARSE ARRAYS

Oscar Martínez-Graullera¹, David Romero-Laorden¹,
Javier Villazón Terrazas¹, Jordi Glez-Llinas¹

¹Centro de Acústica Aplicada y Evaluación No Destructiva (CAEND) CSIC-UPM
C/Serrano 144. Madrid (Spain) 2800
oscar.martinez@csic.es, david.romero@caend.upm-csic.es,
javier.villazon@csic.es, jordiglezllinas@gmail.com

Resumen

El desarrollo de sistemas de imagen volumétrica de alta resolución basada en arrays 2D capaces de operar en tiempo real es un tema complejo que mantiene abiertas distintas líneas de investigación, tanto sobre el diseño de la apertura, como el modo de operación de la misma, o los procesos de generación de la imagen 3D. El principal inconveniente para el desarrollo de sistemas de tiempo real es el gran número de señales involucradas en el proceso, por lo que una parte importante de este trabajo se ha centrado en el desarrollo de sistemas de apertura sintética como modo de reducir esta complejidad. Sin embargo, las soluciones tradicionales basadas en la distribución matricial no son las más adecuadas para las nuevas propuestas de aperturas dispersas basadas en espirales. Este trabajo se centra en el desarrollo de modos de adquisición SAFT para este tipo de aperturas, proponiendo soluciones que permiten optimizar el compromiso entre tiempo, calidad y recursos.

Palavras-chave: imagen ultrasónica, arrays 2D dispersos, SAFT.

Abstract

The development of volumetric imaging systems based on high resolution 2D arrays capable to operate in real time is a complex issue that requires multiple levels of design and it is supported by different lines of research: the design of the aperture, the operation mode, and the generation and visualization of the 3D image.

The main drawback is the large number of signals involved in the process, so that an important part of this work has been focused on the development of synthetic aperture systems.

In the last years sparse apertures based on spirals have been introduced, showing better behaviour than conventional matrix array. Traditional SAFT solutions based on the distribution matrix elements are not appropriate for the spiral apertures. So this work is focused on the development of new synthetic aperture acquisitions techniques for this aperture in order to optimize the tradeoff between time quality and resources.

Keywords: ultrasonic imaging, 2D sparse arrays, SAFT.

PACS no. 43.35.Zc

1 Introducción

La generación de una imagen ultrasónica tridimensional es un proceso complejo donde cada línea de imagen debe ser capturada explícitamente mediante un proceso de adquisición independiente que requiere de operaciones de focalización tanto en emisión como en recepción. La posibilidad de representar en 3D el interior de un cuerpo opaco es de enorme interés a la hora de dimensionar y localizar sus componentes internos, y tiene especial relevancia en el campo de la imagen médica [1].

Los sistemas de imagen 3D se componen de un multisensor formado por una distribución bidimensional de transductores y con subsistemas electrónicos para permitir la focalización del haz acústico tanto en emisión como en recepción. Si consideramos las necesidades de este proceso para la imagen de alta calidad, con resolución lateral por debajo del grado, la complejidad de estos sistemas se desarrolla a tres niveles: primero por el número de sensores involucrados, luego por el alto volumen de datos a procesar y finalmente por los requerimientos temporales de la adquisición que limitan el desarrollo de sistemas de tiempo real [2].

El impacto de las dos primeras cuestiones puede ser reducido si se optan por estrategias de diseño de aperturas que reduzcan el número de elementos activos. Ésta es una línea de trabajo activa donde buscando soluciones de compromiso que a costa de sacrificar el rango dinámico y buscando mantener la alta resolución lateral han conseguido reducciones significativas en el número de canales electrónicos. En este sentido sobre una base de distribución basada en las espirales de Fermat se han diseñado aperturas de diámetro de 60λ con 128 y 256 transductores y con rangos dinámicos que llegan a los 40dB y 50dB respectivamente [3]. Frente a los 16000 elementos que precisaría una apertura convencional plena la reducción de complejidad del sistema resulta significativa.

No obstante atendiendo a los requerimientos de un sistema phased-array, el tiempo invertido en el proceso de adquisición de la imagen donde se conforma un haz sobre cada dirección del volumen de interés puede ser muy alto en función de la resolución deseada. Para un barrido de 60° de abanico con una resolución en la imagen de 0.5° se precisan un total de 14641 líneas. Lo que para una profundidad de 8cm en tejido humano supone un tiempo de 0,24ms por línea y un total de 3,5 segundos por volumen. Esta simple cuenta revela el principal inconveniente para el desarrollo de sistemas de imagen 3D de tiempo real.

Una de las primeras propuestas, manteniendo la filosofía de paralelismo del sistema convencional phased-array, ha sido la paralelización en la recepción de haces. Sacrificando la resolución lateral se hace uso de un haz ancho en emisión y se generan varios haces simultáneos en recepción []. Esta solución supone un fuerte incremento en la complejidad del sistema al obligar a desarrollar distintas cadenas de conformación de haz en paralelo. Otras alternativas siguen las propuestas de los trabajos de Kassam [4] que explotan el concepto de coarray y de apertura sintética para planificar una estrategia de adquisición que permita un compromiso a tres bandas entre los recursos electrónicos, el número de disparos y volumen de datos a procesar. La apertura sintética se basa en operar de forma independiente el proceso de emisión/recepción de cada canal, y en post-procesar todos los datos de forma conjunta compensando las distancias de emisión y recepción sobre cada punto del volumen de interés [5]. Se consigue así una imagen donde en cada punto se obtiene el máximo de resolución lateral posible. El número de adquisiciones que hay que hacer por imagen es directamente proporcional al cuadrado de transductores de la apertura e inversamente proporcional al número de canales electrónicos en recepción. Como inconveniente sólo un emisor debe actuar por adquisición lo que limita la SNR y fuerza al uso de modos de excitación basados en señales codificadas [6].

El análisis del coarray pleno de un array revela que se produce un alto grado de redundancia, donde los elementos virtuales están formados por más de una señal, y que la forma final del diagrama de radiación pulso-eco esta determinada por como se organiza esta redundancia. La estrategia de adquisición completa con $N \times N$ señales y conocida como FMA es la que más calidad ofrece pero también la que más recursos y tiempo consume. Sin embargo con una planificación inteligente de este proceso de adquisición, acorde a los recursos disponibles y en función al nivel de calidad necesario es posible reducir el número de señales involucradas disminuyendo así el tiempo de trama de la imagen.

La planificación de la adquisición para un proceso de SAFT muy estudiado en arrays de estructura lineal matricial donde esta regularidad es muy útil [7], sin embargo sobre aperturas dispersas es un proceso muy complejo y los trabajos presentados han sido muy pocos y se han limitado a la distribución anular [8]

Este trabajo presenta una estrategia para la planificación del proceso de adquisición de aperturas bidimensionales dispersas y analiza su aplicación para el caso de una apertura de 128 elementos

2 El teorema de *Projection-Slice*

El teorema de *Projection-Slice*, también conocido como *Fourier slice Theorem*, plantea que para una función bidimensional el resultado de proyectar la función sobre una línea y calcular la transformada de Fourier de la misma, y calcular su transformada bidimensional y coger los resultados sobre la línea que pasa por el centro de la figura y es paralela a la proyección anterior son equivalentes [9].

A partir de este hecho y haciendo uso de la relación que a través de la transformada de Fourier existe para banda estrecha entre la distribución de elementos en el array y el campo acústico que genera en campo lejano, somos capaces de generalizar este proceso para una apertura bidimensional operando en banda ancha. De tal forma que tomando nuestra distribución bidimensional de elementos sobre el coarray X_c podemos calcular el campo en una determinada dirección en azimut a partir del array lineal equivalente, obtenido de la proyección de los elementos que forman la apertura sobre esa dirección. En este sentido si lo que se pretende es garantizar unas determinadas propiedades sobre campo acústico es necesario que estas vengan dadas a partir de los arrays lineales equivalentes correspondientes a cada dirección de azimut.

Nuestra propuesta parte entonces de analizar para un conjunto determinado de direcciones de azimut el array lineal equivalente que genera el coarray, reduciendo el número de adquisiciones a aquellas señales cuyo elemento origen del coarray se proyecte sobre una distribución que garantice una distancia de $\lambda/2$ entre elementos en el array lineal equivalente. De esta manera se pretende que la apertura equivalente se aproxime al comportamiento de un array lineal plano con una longitud equivalente a la del coarray.

2.1 Aplicación del procedimiento

Tomando como apertura-semilla una distribución de elementos con un determinado rango dinámico y una resolución lateral acorde a las necesidades de la aplicación, se compone el coarray correspondiente mediante:

$$X_C = \{\vec{x}_i + \vec{x}_j\} \forall \vec{x}_i \in X_e, \vec{x}_j \in X_r$$

Donde X_c es el conjunto de elementos del coarray obtenido a partir de la suma de todo el conjunto de elementos emisores X_e con el conjunto de elementos receptores X_r . El coarray se proyecta entonces sobre una dirección de azimut determinada

$$\vec{x}_c(\varnothing) = [\cos(\varnothing), \sin(\varnothing)] * \vec{x}_c$$

Se define sobre este nuevo eje un patrón de distribución de elementos de media longitud de onda sobre el que se sitúan los elementos proyectados. Consideramos que una posición esta cubierta siempre y cuando el elemento del coarray no diste de la posición escogida más allá de un umbral escogido.

$$\vec{x}_c(\varnothing, n) = \text{floor}\left(\vec{x}_c(\varnothing), \lambda/2\right), \quad / \quad \left| \text{mod}\left(\vec{x}_c(\varnothing), \lambda/2\right) \right| < \text{umbral}$$

Este umbral se escoge para minimizar los posibles errores causados por esta falta de alineación y acorde a nuestra experiencia previa en procesos de conformación de haz hemos tomado este umbral con un valor máximo de $\lambda/32$ [10]. Cada posición de este array puede estar ocupada por varias soluciones. El proceso se repite sobre todos los ángulos en azimut que se quieren considerar, de tal forma que un elemento del coarray puede colaborar sobre distintas posiciones dependiendo del ángulo de azimut considerado. A esta rejilla de distribución de elementos la llamaremos *rejilla de proyección del coarray* (RPC) y su tamaño depende del diámetro de la apertura y del número de ángulos de azimut que se tomen para la proyección.

A partir de estos resultados se inicia un procedimiento de selección cuyo objetivo es obtener aquél conjunto de señales que garantice el máximo de posiciones llenas entre los arrays lineales equivalentes de las direcciones de azimut seleccionadas con el mínimo nivel de redundancia.

3 Reducción del conjunto de señales para la aplicación del SAFT sobre una apertura de Fermat de 128 elementos

3.1 Descripción del array de referencia

El trabajo considera una apertura de referencia de 128 elementos compuesta en base a una espiral de Fermat con un ángulo de divergencia de $\alpha=174.5^\circ$. Este array ha sido diseñado en un trabajo previo []. El campo para este array sobre un modelo de transductores omnidireccionales puntuales operando con un pulso de banda ancha del 60% se presenta junto con el array en la figura 1 La figura 1 muestra las distribuciones de elementos tanto en el array (1-A) como en el coarray (1-B), así como el campo de presión (1-C) en la semi-esfera ($\theta=0^\circ:90^\circ$, $\phi=0^\circ:360^\circ$) y los perfiles laterales de la misma (1-D). Destacando el máximo de presión, la media y el mínimo para los ángulos de azimut y sobre cada ángulo de elevación. La figura muestra un rango dinámico de 43dB con una resolución de 2.5° . Este array configurado en FMA y para un modo de operación TFM emplea un total de 16000 señales.

3.2 Reducción del conjunto de señales

Con objeto de reducir este número de señales es necesario determinar cuales de ellas con las que colaboran de forma más eficiente en la composición del haz. Para ello se determina un perfil de referencia para el array lineal equivalente, este se muestra en la figura 1-D junto con los perfiles de la apertura plena, y da un nivel de rango dinámico de 43dB con una resolución lateral de 36° a -40dB.

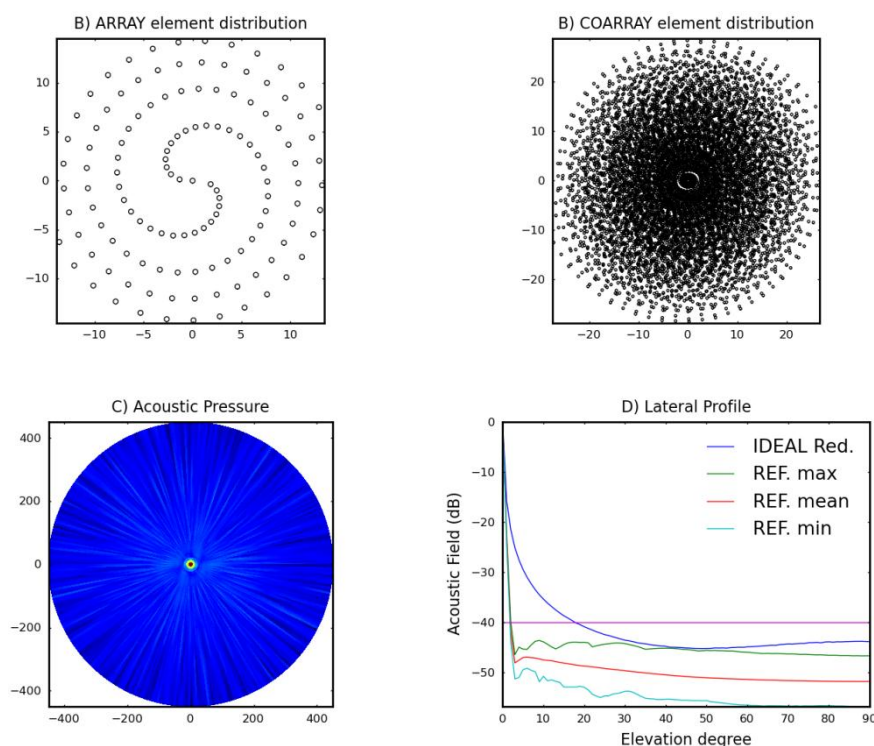


Figura 1 – Apertura de Fermat 128 elementos, $\alpha= 174.5$. A) Distribución de elementos en el array, B) distribución de elementos en el coarray, C) campo de presión acústica, D) perfiles laterales del campo de presión (max, media y min.) y referencia de un coarray plano equivalente.

El análisis de la apertura plena se realiza con una RPC adecuada a la resolución esperada es decir con resolución lateral de 1° . De esta manera se establecen las limitaciones de la apertura, se analiza una RPC para los 360° de azimut y 120 posiciones sobre el array lineal equivalente. De las 43260 posiciones definidas tan sólo un total de 30402 están cubiertas por el coarray pleno. Esto es nuestro límite superior de operación. Las Figuras 2 a 5 muestran nuestros resultados para distintas RPC, mostrando de izquierda a derecha, el coarray, el campo bidimensional y los perfiles laterales (max, mean y min) en comparación con la referencia y el coarray pleno.

Si tomamos una RPC(360) obtenemos la configuración de la figura 2 con un total de 2932 elementos en el coarray y una ocupación de la RPC cercana al 50% (22530 posiciones). Con una resolución lateral equivalente al array original hasta los 35dB pero con máximos en 40dB que llevan en algunas posiciones la resolución hasta los 30° . No obstante si se considera la media en elevación a los 40dB este se mantiene a 9° y el perfil se sitúa siempre por debajo del patrón de referencia escogido y ligeramente por encima del nivel de máximos de la apertura plena. Desde el punto de vista de la implementación un sistema operando en estas condiciones emplearía 128 disparos y 23 conversores por canal. El tiempo de captura de datos para 128 disparos en las condiciones de operación antes descritas es de 0,03 segundos. Muestreando a 40MHz esto son 4500 datos por señal lo que para una conexión PCI-e 3 da un tiempo de transmisión de los datos de un volumen de 0,01segundos. Con estos datos obtendríamos una velocidad de 33 volúmenes por segundo, unas 116 veces superior a la de la configuración original.

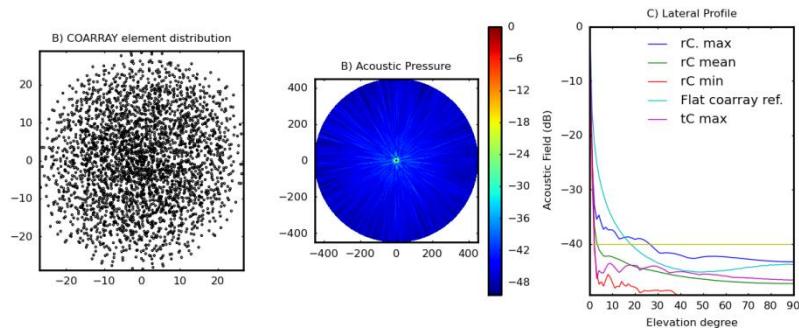


Figura 2 – RPC(360) Coarray con 2932 elementos.

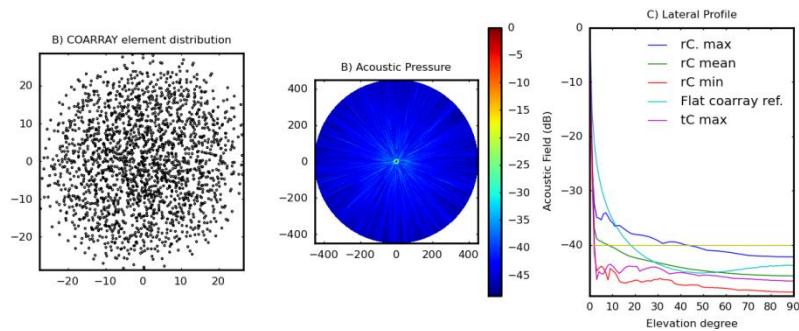


Figura 3 – RPC(45) Coarray con 1979 elementos.

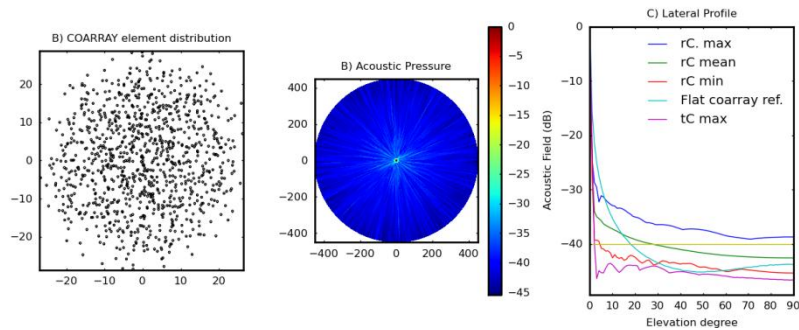


Figura 4 – RPC(15) Coarray con 1006 elementos.

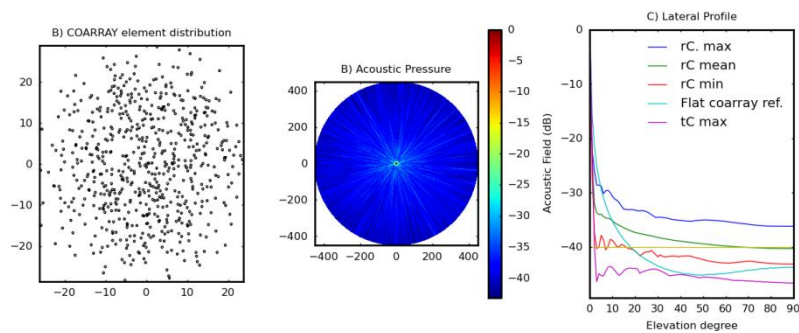


Figura 5 – RPC(8) Coarray con 625 elementos.

Con objeto de definir distintos niveles de reducción se han tomado distintas configuraciones de RPC: 45 (con 1979 elementos), 15 (con 1006 elementos) y 8 (con 625 elementos). La ventaja de estas configuraciones respecto a la RPC(360) no residen ya en el tiempo de adquisición puesto que la transmisión ya está por debajo del tiempo de adquisición, sino en la reducción de hardware que lleva asociada y la reducción de la complejidad del proceso de composición de la imagen. PRC(45) emplea 16 canales en recepción, PRC(15) emplea 8, y PRC(8) un total de 5 canales. Estas configuraciones permitirían plantear el desarrollo de sistemas de bajo consumo.

No obstante hay una pérdida paulatina del rango dinámico conforme se reduce el número de elementos en el coarray. Para PRC(45) el campo sigue el perfil original hasta los -35dB, valor a partir del cual la curva de máximos se mantiene alta aunque la media se mantiene a niveles de la referencia. Para PRC(15) las desviaciones aparecen a los -30dB y los valores de pico se sitúan por encima de -40dB, la curva media se sitúa por encima de la referencia, pero alcanza a los -40dB sobre los 13° a partir de ese momento se mantiene por debajo de esa línea. Para PRC(8) la curva de máximos se sitúa por encima de los -35dB y la curva de medias por encima de los -40dB

4 Conclusiones

Se ha presentado una metodología que a partir de una referencia deseada permite seleccionar un conjunto de señales mínimo para componer para una configuración de apertura sintética con la resolución lateral de la apertura original y un rango dinámico por encima de los -40dB. Esta metodología es aplicable sobre cualquier apertura bidimensional, incluidas aquellas que no se basan en la distribución matricial. El presente trabajo analiza un modelo basado en la espiral de Fermat.

La bondad del método depende de la apertura original de partida y del procedimiento de selección de los elementos del coarray intervinientes. Este procedimiento puede venir condicionado por aspectos relativos a la configuración del sistema, como puede ser el número de canales de adquisición en paralelo, o por los requerimientos de la aplicación (ej. el número de disparos necesarios para obtener la imagen).

Se ha demostrado que para una apertura en espiral de 128 elementos, lo que involucra 16000 señales en el proceso de conformación de haz, es posible operar con un máximo de 3000 señales, proporcionando unos resultados con la resolución lateral deseada y con un rango dinámico cercano a los 40dB, lo que resulta ligeramente superior al rango dinámico de la apertura original y en sintonía con la referencia de la apertura plana tomada como referencia.

Los futuros trabajos se centrarán en desarrollar distintas metodologías para la selección de elementos que permitan la modificación de la función de apodización natural de la apertura con el fin de incrementar el rango dinámico más allá de los 40dB e introducir restricciones consecuentes con los recursos del sistema disponible.

Agradecimientos

Este trabajo está apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España a través del proyecto DPI 2010-19376 y la beca BES-2008-008675.

Referencias

- [1] Thomas L. Szabo Diagnostic Ultrasound Imaging. Ed Elsevier Academic press. 2004
- [2] S. Stergiopoulos, P. Sehk. Portable 3D/4D Ultrasound Diagnostic Imaging System. RTO-MP-HFN-182
- [3] Oscar Martínez-Graullera, Carlos J. Martín, Gregorio Godoy, Luis Gómez-Ullate. "2D Array design based on Fermat Spiral" Ultrasonics 50 pp. 280-289. 2010
- [4] F. Ahmad, S. Kassam "Coarray analysis of the wide-band point spread function for active array imaging". Signal Processing. Volume 81, Issue 1, January 2001, Pages 99–115.
- [5] G.R. Lockwood, J.R. Talman, and S.S. Brunke, "Real-Time 3-D Ultrasound Imaging Using Sparse Synthetic Aperture Beamforming", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr. 45 (4), pp. 980-988, (1998)
- [6] O'Donnell, M.: Coded Excitations Systems for Improving the Penetration of Real-Time Phased-Array Imaging Systems. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.39, No.3, 1992.
- [7] Martin-Arguedas, C.J., Martinez, O., Ullate, L.G., Octavio, A., Godoy, G., "Reduction of grating lobes in SAFT images", IUS 2008. pp.721-724, 2-5
- [8] C. Tekes, M. Karaman, L. Degertekin, "Co-array Optimization of CMUT Arrays for Forward-Looking IVUS", IEEE Ultrasonics Symposium, 20-23 Sep. Rome, 2009.
- [9] Bracewell, R.N. (1990). "Numerical Transforms". Science 248 (4956): 697–704
- [10] C. Fritsch, M. Parrilla, A. Ibáñez, R. C. Giacchetta, O. Martínez. "The Progressive Focusing Correction Technique for Ultrasound Beamforming". IEEE Tans. on UFFC, 53 (10). pp. 1820-1831. 2006