

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE IMAGEN ULTRASÓNICA 3D

PACS: 43.35.Zc

Oscar Martínez-Graullera; David Romero-Laorden; Javier Villazón-Terrazas; Alberto Ibáñez; Montserrat Parrilla; Luis G. Ullate.
Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información "Leonardo Torres Quevedo" (CSIC).
Serrano 144
28006 Madrid. España
Tel: +34 915 618 806
Fax: +34 914 117 651
E-mail: oscar.martinez@csic.es

ABSTRACT

In this paper the design process of an ultrasonic volumetric imaging system based on synthetic aperture focusing technique is presented. Based on minimum redundancy coarray of 2D aperture and parallel processing techniques for beamforming an experimental system is developed to operate with a 2D array (3Mhz and 11x11 elements).

RESUMEN

Este trabajo describe el proceso de diseño e implementación de un sistema de imagen ultrasónica basado en la composición del coarray de mínima redundancia para aperturas 2D. Esta técnica de adquisición en combinación con la generación de imagen por apertura sintética, implementada por GPGPU, permite diseñar un sistema de imagen 3D con un número reducido de recursos. Se presentan resultados experimentales del sistema implementado sobre un equipo de imagen ultrasónica convencional para una apertura bidimensional de 3Mhz y 11x11 elementos.

INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones más importantes que tienen los ultrasonidos hoy en día y con mayor impacto social es la posibilidad de obtener imagen del interior de un cuerpo opaco sin dañar ni alterar las propiedades del mismo. Su uso, tanto en medicina como en aplicaciones industriales de Evaluación No Destructiva (END), se ha popularizado como herramienta de diagnóstico, adoptado diversos modos de visualización con diferentes usos como la imagen 2D sectorial, la visualización volumétrica estática (3D), o la visualización volumétrica dinámica (4D). Estas últimas están asociadas al empleo de sensores especiales con un gran número de transductores que precisan de un equipamiento sofisticado, lo que limita el campo de aplicación de este tipo de imagen [1]

Una alternativa al empleo de los voluminosos sistemas de focalización paralela "phased array" son

las técnicas de apertura sintética (SAFT). Éstas se plantean como solución para reducir la complejidad de un sistema de imagen mediante la adquisición independiente de las señales individuales que intervienen en el proceso de generación de la imagen ultrasónica. Sobre estas señales se aplica posteriormente un proceso de conformación de haz que permite focalizar de forma dinámica la imagen tanto en emisión como en recepción. La técnica SAFT supone una drástica reducción del número de canales activos y permite desarrollar sistemas de imagen de muy bajos recursos. Las críticas sobre ella se centran en la baja relación señal a ruido que ofrece y en el alto coste computacional que lleva asociada la generación de la imagen, lo que limita su empleo en tiempo real. Sin embargo, el empleo de sistemas de excitación basados en códigos (códigos de Golay) y/o en técnicas que incrementan la detección del reflector, así como el rápido desarrollo que han tenido en los últimos años los sistemas de procesamiento paralelo (tanto sistemas multicore como las técnicas basadas en GPGPU), permite desarrollar soluciones de bajo coste, con buena calidad de imagen y con una alta tasa de generación de imágenes por segundo.

Para el caso de imagen 2D a partir de un array lineal (2.6Mhz y 64 elementos en la apertura) se han publicado soluciones que, con dos canales en recepción y uno en emisión (solución SAFT de mínima redundancia), permiten producir una tasa de 150 imágenes por segundo con tamaño de 512x512 píxeles [2]. Este trabajo pretende explotar este enfoque para analizar la problemática de la imagen 3D y 4D basada en aperturas bidimensionales y propone la realización de un sistema de imagen 3D operando en tiempo real sobre hardware convencional.

EL COARRAY COMO BASE DE DISEÑO DEL SISTEMA DE IMAGEN

El coarray es una herramienta matemática utilizada para estudiar el patrón de radiación de una apertura de array en condiciones de campo lejano, banda estrecha y operando en emisión recepción. Básicamente construye una apertura virtual que a partir de la convolución de las aperturas de emisión y recepción modela el sistema de imagen y permite analizar el comportamiento del mismo. Del análisis de este proceso se puede obtener una relación detallada de señales (par de emisión/recepción) componen cada elemento del coarray, $c(x,y)$:

$$c(x,y) = e(x,y) *_{x,y} r(x,y) \quad (1)$$

donde $e(x,y)$ es la apertura en emisión, $r(x,y)$ es la apertura en recepción y $*_{xy}$ hace referencia a la convolución bidimensional. Aspectos como la resolución, la distribución de los lóbulos laterales o la generación de lóbulos de rejilla se pueden estudiar a partir de esta distribución virtual, incidiendo los resultados en el diseño de la apertura real o en su modo de operación [3]. Su utilidad viene del hecho de que las conclusiones son fácilmente extrapolables para el caso de banda ancha [4].

El desarrollo del coarray a partir de metodologías SAFT se obtiene mediante la descomposición de las aperturas de emisión y recepción en subaperturas ($\hat{e}(x,y)$ y $\hat{r}(x,y)$ respectivamente) que, actuando de forma independiente, se combinan para formar el coarray original. Este método permite controlar el proceso de llenado del coarray y planificar estrategias de adquisición que equilibren el compromiso entre la calidad, la velocidad de la imagen y los recursos electrónicos. En este sentido podemos cambiar la expresión (1) por:

$$\hat{c}(x, y) = \sum \hat{e}(x, y) *_{x,y} \hat{r}(x, y) \quad (2)$$

donde el coarray $\hat{c}(x, y)$ puede ser igual a $c(x, y)$ cuando todos los emisores actúan sobre todos los receptores. Lo interesante es que este proceso permite modelar el sistema de imagen mediante la selección de las señales que van a formar parte del proceso de conformación del haz.

Estrategia de Adquisición sobre Apertura Sintética para Coarrays de Mínima Redundancia

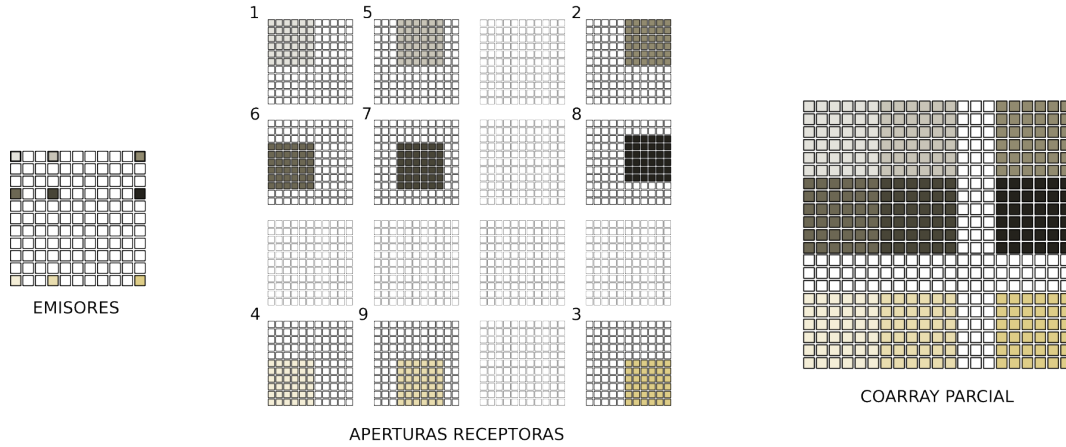
En este sentido, el primer requisito para cumplir con nuestro objetivo, es desarrollar una estrategia de adquisición de señales que garantice la completitud del coarray (lo que evita la formación de lóbulos de rejilla), y donde cada elemento del mismo esté compuesto por una única señal. A esta estructura la denominamos Coarray de Mínima Redundancia (CMR). Los otros requisitos pasan porque éste se complete con el menor número de disparos y de recursos posibles. El equilibrio entre estos factores será el que determine las capacidades de nuestro sistema.

Para un array lineal, el CMR de mínimos recursos se obtiene con una configuración de un emisor y dos receptores [2]. Para un array bidimensional el CMR de mínimos recursos se obtiene usando un emisor y cuatro receptores [5]. Estas soluciones precisan de un disparo por cada elemento de la apertura lo que limita la velocidad del sistema. Para aumentar la velocidad se puede aumentar el grado de paralelismo en recepción y así completar el mayor número posible de posiciones del coarray en cada disparo. Esta estrategia, desarrollada para arrays lineales en [6], muestra que para un array de N elementos tomando subaperturas de N_x elementos, es posible completar el CMR si el emisor se toma en pasos de $N_x/2$. Si consideramos la apertura bidimensional de $N_x \times N_y$ como la combinación de dos funciones donde la distribución de elementos en la apertura sobre ejes ortogonales se modela con una función independiente, se puede analizar el problema como dos funciones separables y extrapolar este resultado sobre los arrays bidimensionales. Sin embargo, para garantizar la completitud es conveniente un análisis de la problemática particular de la apertura y de las posibilidades que ofrece el sistema de multiplexación para proponer una estrategia de disparo que optimice el uso de los canales electrónicos y minimice el número de disparos.

El procedimiento propuesto consiste en seleccionar en primer lugar los emisores de los vértices y a continuación colocar las subaperturas de recepción respectivas. A partir de uno de ellos se genera la secuencia de operación hasta entrar en colisión con los elementos ya colocados, pasando entonces a tomar un nuevo vértice como referencia para seguir generando la secuencia. Este procedimiento deja dos franjas libres que se cubren progresivamente partiendo desde los extremos hacia el centro.

La figura 1 muestra el proceso completo para una apertura de 11×11 partiendo de una estructura de multiplexado de 6×6 . Cada etapa de emisión/recepción se ha presentado con un color. La operación se ha dividido en dos etapas: en la primera partiendo de los extremos se han llenado las posiciones plenas y en la segunda se han rellenado los recortes. La numeración asociada a cada etapa muestra la secuencia de selección seguida.

(A) SECUENCIA DE LLENADO DEL COARRAY: SUBAPERTURAS 6x6



(B) SECUENCIA DE LLENADO DEL COARRAY: SUBAPERTURAS ESPECIALES (RECORTES)

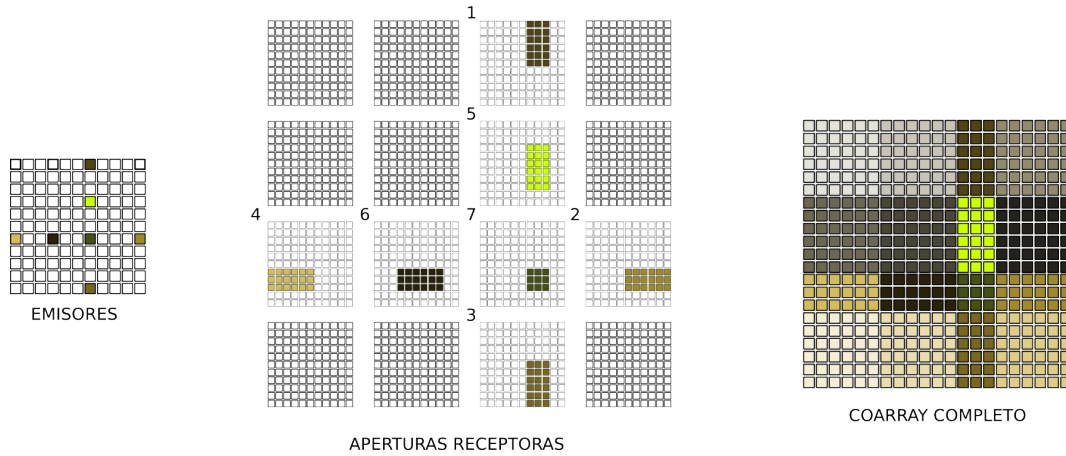


Figura 1. Diseño de la estrategia de adquisición para una apertura de 11x11 con una subapertura de 6x6 (A) y con otras subaperturas especiales (B).

Etapa de conformación del haz

El proceso de conformación del haz basado en el retraso y suma (DAS, Delay-and-Sum) es un procedimiento bastante conocido. Como se ha comentado anteriormente, las técnicas de apertura sintética hacen posible la focalización dinámica en cada punto de la región de interés. De este modo, las señales de todos los elementos del array se deben sumar para sintetizar un foco de tal forma que la intensidad del volumen $V(x, y, z)$ en cualquier punto de la región viene dada por [1]:

$$V(x, y, z) = \left| \sum_{\text{paratodos}, r} S_{e,r} \left(\frac{\sqrt{(x_e - x)^2 + (y_e - y)^2 + z^2} + \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + z^2}}{c} \right) \right| \quad (3)$$

donde $S_{e,r}(t)$ es la señal analítica obtenida por la transformada de Hilbert perteneciente a los elementos emisor y receptor e, r respectivamente, (x_e, y_e) y (x_r, y_r) son las coordenadas de los

elementos del array, c es la velocidad en el medio y (x, y, z) son las coordenadas del punto espacial. Esta suma se lleva a cabo por cada combinación de las aperturas en emisión y recepción. Sin embargo, las técnicas CMR tienen como principal inconveniente la baja relación señal ruido que limita la calidad de la imagen volumétrica. Por ello, en este trabajo se ha hecho uso de un descriptor de fase para mejorar el contraste de la misma. El mapa de coherencia del descriptor, de ahora en adelante H , viene dado por la siguiente ecuación [7]:

$$H(x, y, z) = \sqrt{\left(\sum_e \sum_r \frac{I_{e,r}(V(x, y, z))}{X(V(x, y, z))}\right)^2 + \left(\sum_e \sum_r \frac{Q_{e,r}(V(x, y, z))}{X(V(x, y, z))}\right)^2} \quad (4)$$

donde $I_{e,r}(V(x, y, z))$ y $Q_{e,r}(V(x, y, z))$ son los valores de fase y cuadratura pertenecientes a la señal del emisor y receptor e, r respectivamente y $X(V(x, y, z))$ es el módulo de la señal. Con este descriptor, la nueva ecuación del volumen vendrá determinada por:

$$V_H(x, y, z) = V(x, y, z)H(x, y, z) \quad (5)$$

Generación de volumen en tiempo real

Para llevar a cabo la generación de imagen volumétrica en tiempo real con las técnicas SAFT-CMR se ha hecho uso de algoritmos de procesamiento paralelo sobre GPU. Este tipo de procesamiento, organizado en tres etapas, se ha estado utilizando con éxito durante los últimos años en el campo de la imagen ultrasónica[2].

En primer lugar se desarrolla una etapa de preprocesamiento, donde el paralelismo se desarrolla a nivel de señal realizando el filtrado y la obtención de las señales analíticas mediante la transformada de Hilbert. Para ello se han usado algoritmos especialmente optimizados para el cálculo de FFTs en GPU (librería CUFFT [R]) cuyo resultado se almacenan en memoria de textura de la GPU (memoria caché que hace posible lecturas más rápidas) para la próxima etapa.

La segunda etapa es el DAS, y el paralelismo se desarrolla a nivel de pixel ya que estas operaciones son totalmente independientes unas de otras. Esto significa que el proceso se encarga de calcular el valor correspondiente a cada punto espacial consiguiendo un nivel de paralelismo igual al número de píxeles del volumen ($NX \times NY \times NZ$). El cálculo de las lentes de focalización se realiza dinámicamente, lo que evita transacciones de memoria CPU-GPU innecesarias permitiendo incrementar el rendimiento general del algoritmo y facilitando operaciones de zoom y/o desplazamiento sobre el volumen. Por último, se calcula el módulo de la envolvente para obtener el valor del pixel. Todas las operaciones (localidad espacial, escrituras a memoria, cálculos duplicados) han sido optimizadas para exprimir al máximo los recursos disponibles.

En la etapa final de post procesamiento se convierte el valor de los píxeles a decibelios y se representa por pantalla usando la librería gráfica OpenGL así como un algoritmo de reconstrucción de imagen volumétrica implementado también en GPU. Finalmente, un nuevo banco actualizado de señales se copiará desde CPU a GPU y el proceso vuelve a empezar.

DESARROLLO PRÁCTICO

En la implementación práctica se empleó un array de 11x11 elementos operando a 3.16MHz y con un pitch entre elementos de 1mm para aplicaciones de END (www.imasonic.com). Como sistema de adquisición un equipo SITAUX MX con 32 canales en paralelo multiplexado a 128 para barrido lineal, configurado para un modo de adquisición de apertura sintética (www.daselsistemas.com). Y finalmente, como host de procesamiento y generación de imagen un sistema INTEL Q9450 (4 cores 266MHz, 4GB) equipado con una tarjeta NVIDIA quadro 4000 (256cores 1GB).

Como escenario de test empleamos un bloque de metacrilato (figura 3) con diversos taladros realizados desde el fondo a distintas profundidades y posiciones, repartidos en una superficie de 60x60mm. Si tenemos en cuenta que la velocidad de propagación en el metacrilato es de 2.7 mm/ μ s el *pitch* del array es un 20% superior a la longitud de onda lo que limita muestra capacidad de barrido a 50 grados, y la anchura angular del haz a 9 grados (3mm para Z = 20mm).

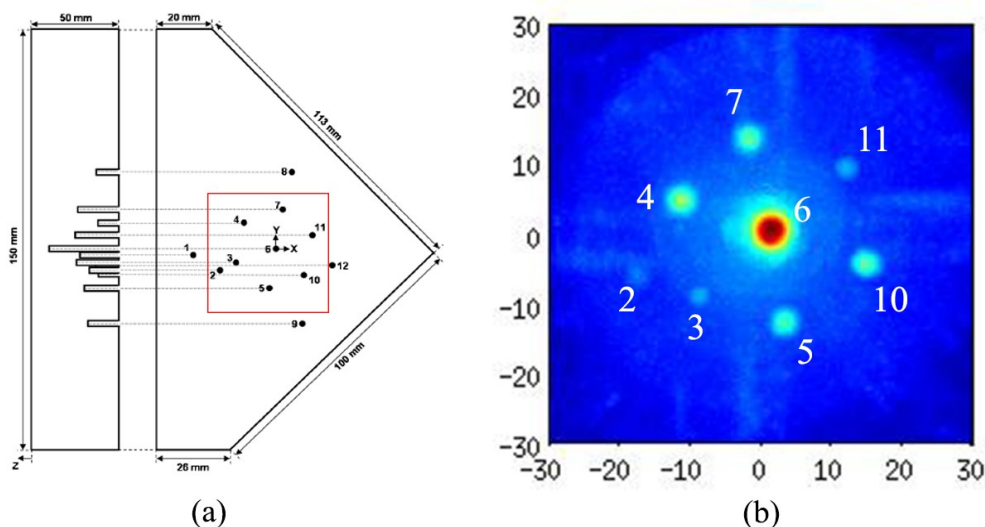


Figura 3. Pieza de test de metacrilato desarrollada para la experimentación. Los taladros están identificados por un número. En la derecha se presenta el C-Scan del TFM 2D con los principales defectos identificados.

Para la apertura CMR precisa de 441 señales en una matriz de 21x21. La estrategia más sencilla de adquisición es $1e(2x2)r$, pero supone aprovechar tan sólo un octavo de los recursos. La principal limitación del sistema SITAUX es que su red de multiplexado está enfocada a resolver una secuencia de barrido lineal orientada a producir aperturas activas consecutivas, de forma que cada digitalizador tiene acceso a sólo 4 canales separados entre sí 32 posiciones. Con esta configuración del multiplexor sólo abarca de forma completa dos columnas, por lo que no permite conseguir configuraciones cuadradas de la matriz de recepción superiores a 2x2. La alternativa es organizar la adquisición en matrices rectangulares tipo 2x11. Esta configuración permite reducir el número de disparos a 22, empleando un máximo de 22 canales en recepción. A modo de referencia se ha realizado una adquisición en modo FMA (Full Matrix Array) con un total de 14641

(121x121) señales correspondientes a esta apertura y se ha generado una imagen volumétrica usando todas ellas (Total Focusing Method, TFM).

Resultados y Conclusiones

El volumen a visualizar es de 30x30x20 mm, que se corresponde con una imagen de 64x64x128 pixels. Dada la limitada capacidad de deflexión y la baja resolución lateral, este espacio es el que se considera adecuado a las características de la apertura, con un muestreo cinco veces superior a ambas resoluciones. La figura 3 presenta a modo de referencia la imagen C-scan obtenido a partir del FMA (rango dinámico de 45dB) de un volumen más amplio (60x60x26mm).

En la figura 4(a) mostramos la imagen de volumen TFM para nuestro espacio de interés. En él se identifica la posición de los blancos 6, 7, 4, 5 y 10. En la figura 4(b) mostramos el volumen obtenido para una estrategia 1e(2x11)r (con 441 señales) donde se ha aplicado un término de coherencia para mejorar los resultados. Ambos volúmenes están representados con un rango dinámico de -45dB y un corte a -43dB para identificar los principales reflectores .

Las imágenes muestran que ambas configuraciones son capaces de detectar los defectos, si bien la configuración SAFT-MR presenta una relación señal ruido más baja que introduce *artefactos* en la imagen y desdibuja los perfiles de los blancos.

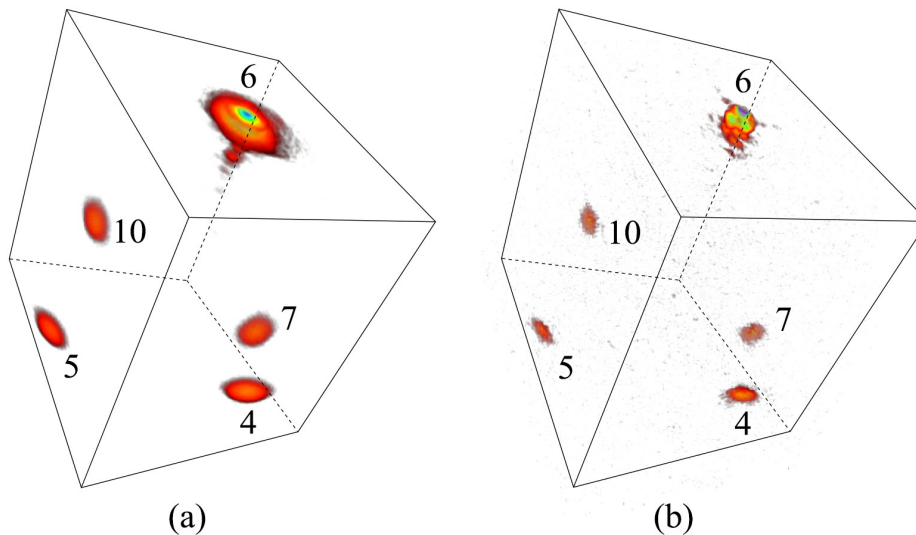


Figura 4.(a) Volumen del TFM (121 disparos y 14641 señales). (b) Volumen del 1e(2x11)r (22 disparos y 441 señales)

Aplicando el TFM se obtiene una tasa de 0.6 volúmenes por segundo (para este cálculo se obvian los procesos de adquisición y transmisión de datos). En el caso de la técnica SAFT propuesta se obtienen mayores tasas de formación de imágenes mostradas en la tabla 1. Esta tabla presenta los consumos de tiempo de GPU para las diferentes operaciones del proceso en función de los

diferentes volúmenes. Los tiempos de computación medidos indican que es posible generar imagen en tiempo real con la configuración descrita variando la tasa de generación de imágenes entre 59 volúmenes/s para tamaños pequeños y 5 volúmenes/s para volúmenes más amplios. En cualquier caso, el sistema SAFT-CMR incrementa en aproximadamente un orden de magnitud la tasa de imágenes obtenida por el TFM. Actualmente estamos estudiando soluciones que permitan aumentar esta tasa de velocidad para aumentar el espacio de barrido.

	TIEMPOS EN GPU		
Copia y Pre procesamiento	1.72 ms		
Dim. del volumen en pixeles	32 × 32 × 128	64 × 64 × 128	128 × 128 × 128
DAS y envolvente	13.45 ms	47.50 ms	175.80 ms
Post procesamiento (dB)	1.76 ms	6.71 ms	28.52 ms
Tiempo	16.93 ms	55.93 ms	206.04 ms
Tasa de volumen	59 vol/s	18 vol/s	5 vol/s

Tabla 1. Tiempo de ejecución de las diferentes operaciones del conformador de haz en función del tamaño del volumen en píxeles

CONCLUSIONES

En conclusión diremos que el trabajo ha mostrado que es posible desarrollar un sistema de imagen 3D para tiempo real a partir de un sistema de arrays convencional. La clave del desarrollo consiste en emplear una estrategia SAFT para generar un coarray de mínima redundancia, optimizando el uso de los recursos paralelos del sistema, minimizando el número de disparos, y explotando el paralelismo (multiprocesadores) de los sistemas GPGPU de visualización. El empleo de esta capacidad de cálculo no sólo permite aumentar la velocidad del sistema sino que, además, permite implementar algoritmos de procesamiento para mejorar la calidad de la imagen como sucede en el caso de la dispersión de fase.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el Gobierno de España a partir del Plan Nacional de I+D+i dentro del marco del proyecto DPI2010-19376.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T.L. Szabo. Diagnostic Ultrasound Imaging, Ed. Elsevier, 2004
- [2] C.J. Martín-Arguedas et al. "An ultrasonic imaging system based on a new SAFT approach and a GPU beamformer". IEEE Trans. on UFFC vol.59(7) pp.144-151, 2012.
- [3] B. D. Steinberg. Principles of Aperture and Array System Design, Ed. Wiley-Interscience, 1976.
- [4] G. Lockwood et al. Real-time 3-D ultrasound imaging using sparse synthetic aperture beamforming. IEEE Trans. on UFFC vol.45(4) pp.980-988, 1998.
- [5] C.J. Martín-Arguedas et al. 2D SAFT Technique to Reduce Grating Lobes in Volumetric Imaging, Physics Procedia, pp. 381-388, 2010.
- [6] D. Romero-Laorden et al. "Strategies for hardware reduction on the design of portable ultrasound imaging systems", in Advancements and Breakthroughs in ultrasound imaging, 2013
- [7] O. Martinez-Graullera et al., "A new beamforming process based on the phase dispersion analysis", ICU 2011, AIP Conf. Proc. 1433, pp. 185-188, 2011