

AMPLIA: UNA ARQUITECTURA MODULAR PARA EL PROCESAMIENTO Y DESPLIEGUE DE IMAGEN ACÚSTICA

REFERENCIA PACS: 43.35.Yb

C. Fritsch; T. Sánchez; D. Jiménez; O.M. Graullera
Instituto de Automática Industrial, CSIC
La Poveda (Arganda)
28500 Madrid (España)
e-mail: carlos@iai.csic.es

ABSTRACT

Many Digital Signal Processing techniques have been proposed over the years for ultrasound signals and acoustic images. However, only a few reach the real world of application in the clinical as well as in the industrial field. The high diversity of applications and algorithms does not provide the critical volume needed for production. AMPLIA is an approach to overcome this situation, by proposing an architecture which provides the support for a very wide range of applications and techniques at high performance and low cost as it is analysed in this work. Basically, AMPLIA is a pipeline architecture which can be broken in chains to perform parallel, iterative and recursive processing on ultrasonic signals. An overview is given in this paper.

RESUMEN

Numerosas técnicas de Procesamiento Digital de señales ultrasónicas y de formación de imágenes acústicas han sido propuestas en los últimos años. Sin embargo, muy pocas llegan al mundo de las aplicaciones reales tanto en el sector clínico como en el industrial. La diversidad de aplicaciones y algoritmos no proporciona el volumen crítico necesario para su producción. AMPLIA constituye una aproximación al problema proponiendo una arquitectura que soporta una gran variedad de aplicaciones y técnicas, con altas prestaciones y bajo coste, como se analiza en este trabajo. Básicamente, AMPLIA es una arquitectura encadenada que puede dividirse en subcadenas para realizar procesamiento paralelo, iterativo y recursivo sobre señales ultrasónicas. Este trabajo realiza una presentación general de la arquitectura.

INTRODUCCIÓN

Numerosas contribuciones han demostrado la utilidad del procesamiento digital de señal en aplicaciones ultrasónicas clínicas e industriales. A pesar de ello, sólo una pequeña fracción de los métodos propuestos llega a ser utilizada en condiciones reales de aplicación, y menos aún, a materializarse en equipos. Quizás la principal causa de esta situación sea de tipo comercial: la diversidad de métodos y aplicaciones dificulta la obtención de un volumen suficiente de producción que mantenga los costes de los sistemas en niveles razonables. Una forma de abordar este problema es obtener arquitecturas con la suficiente generalidad,

flexibilidad y potencia como para dar soporte a una gran variedad de aplicaciones con la incorporación de los métodos de procesamiento de señal ultrasónica más interesantes. De este modo, la realización de sistemas adaptados a las aplicaciones, puede basarse en un soporte general al que se le incorporan funciones disponibles en un conjunto de módulos hardware y software.

La Arquitectura Modular para el Procesamiento y Despliegue de Imagen Acústica (AMPLIA) aborda este problema desde la perspectiva de dar soporte general a múltiples aplicaciones, desde simples detectores de ecos hasta sofisticadas técnicas con múltiples algoritmos encadenados y paralelos, procesos iterativos y recurrentes. Manteniendo unas altas prestaciones, AMPLIA pretende limitar la complejidad y coste de los sistemas y proporcionar una estructura que permita su propia evolución tanto con la incorporación de nuevas tecnologías como de nuevos métodos de procesamiento y aplicaciones.

REQUISITOS DEL PROCESAMIENTO DE SEÑAL ULTRASÓNICA

El planteamiento general de una arquitectura dirigida a cubrir un gran abanico de aplicaciones, requiere analizar las técnicas que debe soportar. Sin tratar de ser exhaustivos, pueden citarse:

- *Acondicionamiento de señal ultrasónica.* Donde se incluyen todos los elementos que permiten la generación, amplificación, pre-filtrado y detección de señal; en general, todas aquellas funciones que se realizan en el ámbito analógico: Excitación: impulsiva, lineal y trenes de pulsos codificados. Amplificación: lineal y logarítmica. Filtros: programables, adaptados a la frecuencia del transductor. Detectores: de señal Doppler, de envolvente. Funciones auxiliares: protecciones, multiplexado, compensación atenuación-distancia, etc.
- *Digitalización.* Se requieren frecuencias de muestreo desde unas decenas de KHz (velocimetría Doppler) hasta centenares de MHz, con diferentes resoluciones (8 a 16 bits) según las aplicaciones. Muchas de las que utilizan arrays requieren una digitalización simultánea de múltiples señales. En aplicaciones de velocimetría Doppler [1] y en ciertas aplicaciones de formación de imagen, una única señal se desdobra en sus componentes en fase y cuadratura, reduciendo el volumen de datos y la frecuencia de muestreo. Una alternativa interesante propone la utilización de conversores $\Delta\Sigma$ para facilitar el proceso de focalización con retardos digitales de 1 bit [2]. Otras alternativas actúan selectivamente sobre el espacio de muestras [3], [4].
- *Procesamiento digital.* Es en este aspecto donde existe una mayor variedad de técnicas. Desde el punto de vista de las aplicaciones de imagen ultrasónica pueden clasificarse en:
 - Técnicas de conformación del haz. Generalmente basadas en arrays, aunque en ocasiones se utiliza un transductor monoelemento con procesamiento SAFT [5]. Esta técnica también es habitual en el procesamiento con arrays [6], [7]. Sin embargo, las técnicas de focalización en emisión [8] y, especialmente, en recepción [9], [10], exigen una mayor complejidad y potencia de composición coherente de señales. Además, existen otras alternativas interesantes, como la técnica TMR (*Time Reversal Mirror*) [11], generación de haces de difracción limitada [12], focalización retrospectiva en emisión utilizando técnicas de deconvolución [13] y técnicas de apertura dispersa para generación de imágenes 3D con arrays bidimensionales [14]. Dentro de este apartado pueden incluirse los métodos propuestos para corregir las aberraciones de fase que aparecen como consecuencia de variaciones de velocidad de propagación [15], [16].
 - Incremento de la resolución. Además de las técnicas de conformación del haz descritas existen métodos específicos para incrementar la resolución de las trazas ultrasónicas. Destacan las técnicas de filtrado inverso [17], deconvolución homomórfica [18], [19], y diversos métodos de compresión de pulsos [20] y detectores adaptados [21].
 - Reducción de ruido estructural. Se han propuesto múltiples técnicas para la reducción del ruido estructural (speckle) tanto en el ámbito de las aplicaciones clínicas como para END.

Destacan la técnica *Split Spectrum Processing* [22], con diversas variantes, procesamiento de ondeletas [23], [24], técnicas de procesamiento espacial [25], estimadores de máxima verosimilitud [26], técnicas no lineales [27], etc.

- Velocimetría Doppler. Además de técnicas clásicas basadas en la estimación de las componentes frecuenciales mediante variantes de la STFT [28], existen numerosas propuestas que utilizan estimadores autoregresivos [29], técnicas adaptativas [30], distribuciones tiempo-frecuencia [31], etc.
- Análisis de señal. Muchas técnicas abordan la detección de defectos basados en el análisis bidimensional de las señales [32], aplicación de filtros no lineales a las imágenes [33] e identificación morfológica de las señales [34].
- Formación de imagen. Última etapa de procesamiento de señal ultrasónica, realiza las transformaciones requeridas entre los espacios de muestras adquiridas y de visualización que, normalmente, requieren procesos de interpolación [35], [36].

De una forma genérica las técnicas mencionadas pueden agruparse en tres categorías que no son mutuamente excluyentes (pueden darse varias simultáneamente):

1. Procesamiento encadenado: La inmensa mayoría de las aplicaciones, requieren una *secuencia* de operaciones sobre la señal digital. Estas operaciones pueden ser realizadas consecutivamente por un único procesador o simultáneamente por varios procesadores especializados que operan concurrentemente. Una arquitectura encadenada (*pipeline*), donde cada procesador realiza una función específica sobre los datos que le suministra el que le precede y entrega resultados al que le sigue es, generalmente, la más adecuada.
2. Procesamiento paralelo: Tanto las aplicaciones multicanal en END como las basadas en arrays, requieren adquirir y procesar *simultáneamente* múltiples señales (canales), que pueden llegar a varios centenares (p. ej., arrays 2D). En el caso de los arrays es preciso realizar una composición coherente de las señales adquiridas y preprocesadas por cada canal. Esto puede requerir una capacidad de procesamiento muy importante. Por ejemplo, un array sectorial de 128 elementos, que, para cada imagen, adquiera 200 líneas de 1000 muestras cada una, a 25 imágenes por segundo demanda una capacidad global de procesamiento de $128 \cdot 200 \cdot 1000 \cdot 25 = 640 \cdot 10^6$ muestras/s, sin contar con otras posibles operaciones. Una realización *directa* del sistema en paralelo, resultaría excesivamente costoso. Alternativamente, si \oplus denota la operación de composición coherente que posee la propiedad asociativa, puede ponerse:

$$x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus \dots x_{128} = (((x_1 \oplus x_2) \oplus x_3) \oplus \dots x_{128}) \quad (1)$$

dando lugar a una estructura encadenada recurrente en la que cada procesador entrega la composición entre su propia entrada y la que recibe a su entrada, composición coherente de las anteriores. Una arquitectura encadenada es, también aquí, una solución adecuada.

3. Procesamiento iterativo y recurrente: Muchos de los algoritmos descritos son iteraciones, donde una señal o un resultado se somete a múltiples procesamientos, quizás compuestos de varios específicos encadenados (1) y donde cada señal puede ser el resultado de una composición de múltiples trazas (2). Un ejemplo típico es el algoritmo SSP (*Split Spectrum Processing*) citado, que somete a la señal a N filtrados paso-banda cuyas salidas se componen de forma no lineal. Una alternativa es pasar N veces la señal $x(t)$ por un único filtro cuya respuesta al impulso $h_k(t)$ (su función de transferencia) se modifica en cada iteración k , recopilando los resultados mediante la función de composición no lineal \otimes :

$$y_k(t) = y_{k-1}(t) \otimes [x(t) * h_k(t)], \quad 1 \leq k \leq N \quad (2)$$

siendo $y_0(t)$ el elemento neutro de la operación de composición. Otro ejemplo clásico es la deconvolución van Cittert para estimar la respuesta al impulso de un sistema insonificado [37]. Este método utiliza la estimación anterior $h_{k-1}(t)$ para obtener una mejor aproximación $h_k(t)$ a partir de la señal emitida $x(t)$ y recibida $y(t)$, y una primera estimación arbitraria $h_0(t)$:

$$h_k(t) = h_{k-1}(t) + y(t) - h_{k-1}(t) * x(t) \quad (3)$$

En general, los algoritmos basados en técnicas de aproximaciones sucesivas (LMS, normas L1 y L2, filtros adaptados, etc.) pueden expresarse en forma iterativa o recurrente, como en los casos anteriores. Este tipo de algoritmos responden a una de las formas:

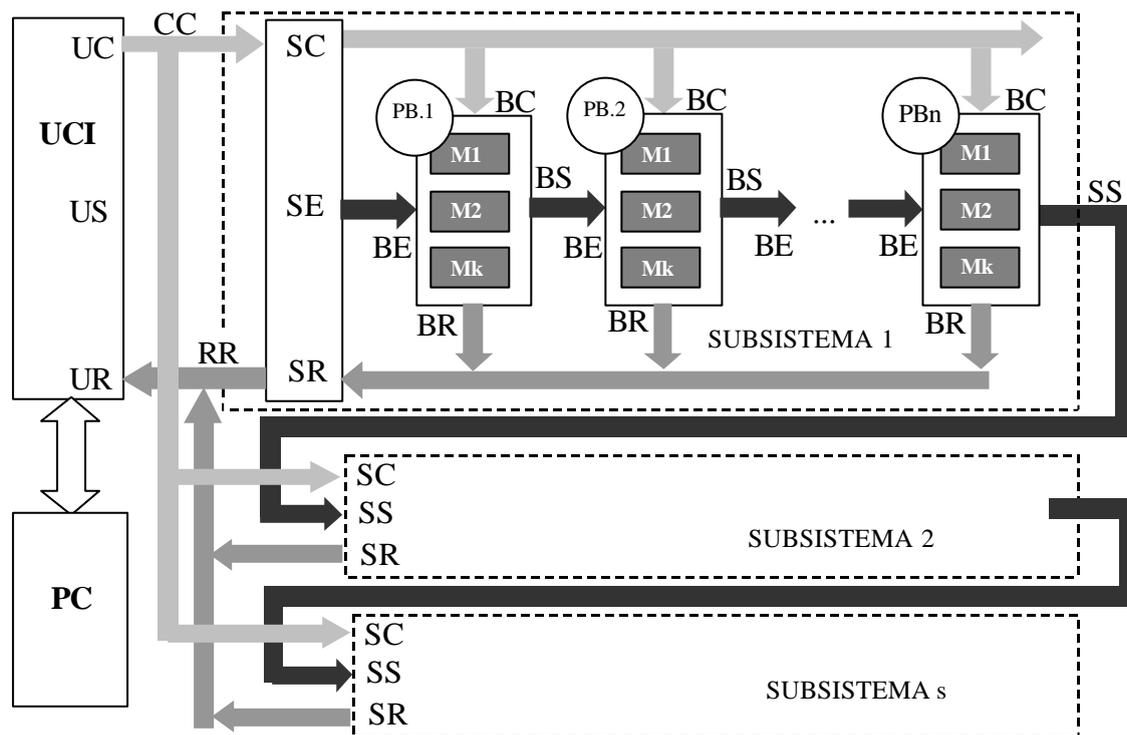
$$y_k = f_k(x) \quad (4)$$

$$y_k = f_k(x, y_{k-1}) \quad (5)$$

donde $f_k(\cdot)$ es la función aplicada en la iteración k-ésima. La Ec. (4) representa procesos iterativos, mientras que la (5) lo hace para procesos recurrentes. Una estructura encadenada con capacidad de iteración y recursión puede abordar este tipo de problemas.

EL CONCEPTO AMPLIA

AMPLIA pretende dar soporte a estos tipos de procesamiento digital de señales ultrasónicas mediante una estructura que admite *varias cadenas* en paralelo de procesadores que operan a su vez en paralelo, y con facilidades para realizar *iteraciones* y *recursiones* a alta velocidad de forma prácticamente automática. Los elementos básicos son el Procesador Central (PC) y la UCI (Unidad de Control e Interfaz) que se ocupa de realizar la comunicación entre el PC y el Sistema Amplia configurado para una aplicación (figura adjunta).



Un Sistema AMPLIA se estructura en niveles jerárquicos. Cada nivel se caracteriza por mantener coherencia temporal, esto es, todos los elementos en un mismo nivel operan con la misma base de tiempos (33 MHz) con transferencias de datos en 16 bits. En el nivel superior, los Subsistemas contienen Placas Base (PB) que albergan Módulos (MOD) de procesamiento de señal. El conjunto puede configurarse como una única cadena (*pipeline*) o como múltiples subcadenas. Un Sistema AMPLIA admite hasta 255 procesadores operando concurrentemente. La UCI se comunica con AMPLIA a través de dos buses unidireccionales: CC y RR. El primero se utiliza para enviar Comandos y Señales en las fases de programación y procesamiento, respectivamente. El bus RR aporta resultados para su almacenamiento en la UCI o para su envío al PC, tanto durante la fase de programación como de procesamiento. Entre módulos, placas base y subsistemas, existe el bus SS (señal digital) que transfiere datos de un elemento

al siguiente durante la fase de procesamiento. Estos datos pueden ser capturados por la UCI y por las Placas Base en tiempo real. Una cadena puede romperse en cualquier lugar, de modo que los elementos sucesivos formen parte de otra cadena; ambas operan en paralelo.

Los resultados recibidos por la UCI durante la fase de procesamiento por el bus RR proceden de cualquiera de los módulos configurados y pueden ser re-enviados al Sistema, (o a una subcadena) a través del bus CC en la siguiente fase de procesamiento, posibilitando la ejecución de procesos recurrentes. Asimismo, almacenando dichos resultados en una memoria local, pueden ser repetidamente reenviados para realizar procesos iterativos en sucesivas fases de procesamiento. En ambos casos, pueden modificarse arbitrariamente los parámetros del sistema (coeficientes de filtros, algoritmos, etc.) entre dos fases de procesamiento.

Un aspecto esencial en un sistema distribuido como es AMPLIA es el mantenimiento del sincronismo entre operaciones realizadas por módulos desacoplados entre sí y ubicados en posiciones diferentes. Para ello, la UCI puede enviar comandos globales que son atendidos por múltiples elementos simultáneamente. Un factor que ayuda a conseguir este objetivo es la posibilidad de enviar comandos, programar parámetros, iniciar y detener procesos y recabar resultados automáticamente sin intervención del PC. Además AMPLIA soporta la identificación automática de una configuración, determinando la naturaleza de los módulos instalados.

AGRADECIMIENTOS

La arquitectura AMPLIA forma parte del proyecto "Métodos Avanzados de Generación de Imágenes Acústicas, MAGIAS", propuesto por once grupos de la Red RITUL (CYTED): CNEA (AR), INAUT (AR), COPPE-UFRJ (BR), USP (BR), ICIMAF (CU), IA (ES), IAI (ES), IIMAS (MX), IMP (MX), UCEH (PT), LAU (UY). Más información en <http://www.iai.csic.es/ritul>. Sin embargo, este trabajo ha sido realizado con financiación del proyecto CICYT TAP99-0945.

REFERENCIAS

- [1] P. Atkinson, J.P. Woodcock, Doppler Ultrasound and its use in Clinical Measurement, AP, 1982.
- [2] S.R.Freeman, M.K. Quick et al.: Delta-Sigma Oversampled Ultrasound Beamformer with Dynamic Delays, IEEE Trans. on UFFC, 46, 2, pp. 320-332, 1999.
- [3] T.K. Song, F. Greenleaf: Ultrasonic Dynamic Focusing using an Analog FIFO and Asynchronous Sampling, IEEE Trans. on UFFC, 41,3, pp. 326-332, 1994.
- [4] C. Fritsch, M. Parrilla, D. Jiménez, T. Sánchez: Técnica de Muestreo Selectivo: Una alternativa para la visualización de imágenes sectoriales. Acústica 2000, Madrid, Oct. 2000.
- [5] P.J. Howard, R. Y. Chiao: Ultrasonic maximum aperture SAFT imaging, Rev. Progress in QNDE, 14A, pp. 901-908, 1995.
- [6] D.K. Peterson, G.S. Kino: Real-Time Digital Image Reconstruction: A Description of Imaging Hardware and an Analysis of Quantization Errors. IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, 31, pp. 337-351, 1984.
- [7] O.Martínez, M. Parrilla, M.A.G.Izquierdo, L.G. Ullate: Application of digital signal processing techniques to synthetic aperture focusing technique images. Sensors and Actuators, 76, pp. 448-456, 1999.
- [8] G.Cincotti, G. Cardone, P. Gori, M. Pappalardo: Efficient Transmit Beamforming in Pulse-Echo Ultrasonic Imaging, IEEE Trans. on UFFC, 46, 6, pp. 1450-1458, 1999.
- [9] C.M.Ligtvoet, J. Ridder, F. Hagensijer, J.W. Wladimiroff: A Dynamically Focused Ultrasound System. Ultrasonics International, pp. 111-120,1977.
- [10] T. K. Song, S. B. Park: A new digital phased array system for dynamic focusing and steering with reduced sampling rate. Ultrasonic Imaging, 9, pp. 1-6, 1987.
- [11] N. Chakroun, M. A. Fink, F. Wu: Time Reversal Processing in Ultrasonic Nondestructive Testing, IEEE Trans. on UFFC, 42,6, 1995.
- [12] J. Lu: Experimental Study of High Frame Rate Imaging with Limited Diffraction Beams, IEEE Trans. on UFFC, 45, 1, pp. 84-97, 1998.

- [13] S. Freeman, Pai-Chi Li, M. O'Donnell, Retrospective Dynamic Transmit Focusing, *Ultrasonic Imaging*, 17, pp. 173-196, 1995.
- [14] G.R. Lockwood, J.R. Talman, S.S. Brunke: Real-Time 3D Ultrasound Imaging Using Sparse Synthetic Aperture Beamforming, *IEEE Trans. on UFFC*, 45, 4, pp. 980-988, 1998.
- [15] P.D. Freiburger, G. E. Trahey: Parallel Processing Techniques for the Speckle Brightness Phase Aberration Correction Algorithm. *IEEE Trans. on UFFC*, 44, 2, pp. 431-444, 1997.
- [16] S. Krishnan, K.W. Rigby, M. O'Donnell: Efficient Parallel Adaptive Aberration Correction, *IEEE Trans. on UFFC*, 45,3, pp. 691-703, 1998.
- [17] S.K. Alam, J. Ophir, I. Céspedes, T. Varghese: A Deconvolutin Filter for Improvement of Time-Delay Estimation in Elastography, *IEEE Trans. on UFFC*, 45,6,pp. 1565-1572, 1998.
- [18] T. Taxt, G. V. Frolova: Noise Robust One-Dimensional Blind Deconvolution of Medical Ultrasound Images, *Trans. on UFFC*, 46, 2, pp. 291-299, 1999.
- [19] K.F. Kaaresen, E. Bolviken: Blind Deconvolution of Ultrasonic Traces Accounting for Pulse Variance, *Trans. on UFFC*, 46, 3, pp. 564-573, 1999.
- [20] L. R. Welch, M.D. Fox: Practical Spread Spectrum Pulse Compression for Ultrasonic Tissue Imaging, *IEEE Trans. on UFFC*, 45, 2, pp. 349-355, 1998.
- [21] B. Haider, P.A. Lewin, K.E. Thomenius: Pulse Elongation and Deconvolution Filtering for Medical Ultrasonic Imaging, *IEEE Trans. on UFFC*, 45, 1, pp. 98-113, 1998.
- [22] V.L. Newhouse, N.M. Bilgutay: Flaw to grain echo enhancement by Split Spectrum Processing, *Ultrasonics*, pp. 59-68, 1982.
- [23] A. Abbate, J. Koay, J. Frankel, S.C. Schroeder, P. Das: Signal Detection and Noise Suppression Using a Wavelet Transform Signal Processor: Application to Ultrasonic Flaw Detection, *IEEE Trans. on UFFC*, 44, pp. 14-26, 1997.
- [24] A.V.Nevel, B. Defacio, S.P. Neal: An Application of Wavelet Signal Processing to Ultrasonic Nondestructive Evaluation, *Rev. Progress QNDE*, 15A, pp. 733-740, 1996.
- [25] N.M. Bilgutay, J. Saniie: Spectral and spatial processing techniques for improved ultrasonic imaging of materials, *NATO ASI Series*, 44, pp. 71-85, 1988.
- [26] K.D. Donohue: Coherent flaw reflectivity estimation in nonstationary noise, *Rev. Progress QNDE*, 11, pp. 951-958, 1992.
- [27] J. Saniie, D.T. Nagle: Analysis of order statistic CFAR threshold estimators for improved ultrasonic flaw detection, *IEEE Trans. on UFFC*, 39, 5, pp. 618-629, 1992.
- [28] S. Marple: A tutorial overview of modern spectral estimation, *Proc. IEEE ICASSP*, pp.2152-2157, 1989.
- [29] F.Sclindwein, D.Evans: Selection of the order of autoregressive models for spectral analysis of Doppler ultrasound signals, *Ultrasound in Medicine & Biology*, Vol. 16, N° 1, pp. 661-672, 1990.
- [30] A. Herment, J.F. Giovannelli: An adaptive approach to computing the spectrum and mean frequency of Doppler signals. *Ultrasonic Imaging* 17, pp. 1-26, 1995.
- [31] Z. Guo, L. G. Durand, and H.C. Lee, 'The time-frequency distributions of nonstationary signals based on a Bessel kernel', *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 42, pp. 1700-1707, 1994.
- [32] G. Corneloup, J. Moysan, D. Francois: Improvement to defect detection by ultrasonic data processing: the DTVG method. *Rev. Progress in QNDE*, 15A, pp. 917-924, 1996.
- [33] M. Belhhlavek, J.F. Greenleaf: Detection of Cardiac Boundaries in Echocardiographic Images Using a Customized Order Statistis Filter, *Ultrasonic Imaging*, 19, pp. 127-137, 1997.
- [34] K. Srinivasan, C. P. Chiou, R. B. Thompson: Ultrasonic Flaw Detection using Signal Matching Techniques, *Rev. Progress QNDE*, 14A, pp. 711-718, 1995.
- [35] C. Basoglu, Y. Kim, V. Chalana: A Real-Time Scan Conversion Algorithm on Commercially Available Microprocessors, *Ultrasonic Imaging*, 18, pp. 241-260, 1996.
- [36] C. Fritsch, M. Parrilla, O. Martínez, D. Jiménez: A multirate scan conversion method, *Ultrasonics*, 38, pp. 179-182, 2000.
- [37] P.B. Crilly, A Quantitative Evaluation of Various Iterative Deconvolution Algorithms, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 40,3, pp. 558-562, 1991.