

## INTEGRATION OF GOLAY PULSE COMPRESSION IN A SYNTHETIC APERTURE IMAGING SYSTEM BASED ON MINIMUM REDUNDANCY COARRAY

David Romero-Laorden, Javier Villazón-Terrazas, Jordi Glez-Llinas, Oscar Martínez-Graullera

Centro de Acústica Aplicada y Evaluación No Destructiva – CAEND (CSIC)

Carretera de Campo Real, km 0.200, Arganda del Rey, Madrid.

{[david.romero@csic.es](mailto:david.romero@csic.es), [javier.villazon@csic.es](mailto:javier.villazon@csic.es), [jordiglezllinas@gmail.com](mailto:jordiglezllinas@gmail.com), [oscar.martinez@csic.es](mailto:oscar.martinez@csic.es)}

### Resumen

El desarrollo de sistemas de imagen basadas en la apertura sintética es una excelente solución para reducir los recursos electrónicos del sistema pero tiene inconvenientes dada la baja calidad de la imagen por la aparición de lóbulos de rejilla y el bajo nivel de señal. Un diseño más evolucionado analiza el modelo del coarray (respuesta pulso-eco) sobre el array pleno para planificar el modo de operación y evitar la aparición de estos lóbulos. A partir de este modelo y sobre una solución de mínima redundancia se ajusta el compromiso entre recursos, calidad y velocidad, ofreciendo soluciones óptimas para el desarrollo de sistemas portátiles. Desafortunadamente, la reducida capacidad de penetración en el material por el bajo nivel de señal emitido limita su área de aplicación. Con el objetivo de encontrar una solución a esta problemática se ha diseñado una solución apta al uso de pulsos codificados basados en secuencias de Golay complementarias. En base a esta codificación, siguiendo una secuencia de adquisición que garantice el solape de dos señales por elemento del coarray, hemos diseñado un modo de pre-focalización que decodifica y recompone el coarray de mínima redundancia en el sistema de adquisición, manteniendo las ventajas originales pero alcanzando niveles de calidad equivalentes a los de sistemas más complejos como el Total Focusing Method.

**Palabras-clave:** sistemas imagen ultrasónica, compresión de pulsos, SAFT.

### Abstract

The development of imaging systems based on synthetic aperture techniques is an excellent solution to reduce the system's electronic resources, but however its main drawback is the low image quality caused by the appearance of grating lobes. An evolutionary design analyzes coarray model (pulse-echo response) over the full array to plan the operation mode and avoid the occurrence of these artifacts. Based on this model and using a solution of minimum redundancy, we adjust the balance between resources, quality and speed, offering optimal solutions for the development of portable systems. Unfortunately, the low capacity to penetrate into the material limits its application area. In order to find a good solution to this problem, it has been designed a solution suitable for the use of coded pulse sequences based on Golay complementary pairs. Based on this encoding, and following a sequence of acquisition to ensure the overlap of two signals by each coarray element, we have designed a pre-focusing mode which decodes and reconstructs the coarray of minimum redundancy inside the acquisition system, maintaining its original advantages but achieving a quality level equivalent to more complex systems such as the Total Focusing Method.

**Keywords:** ultrasonic imaging systems, pulse compression, SAFT.

**PACS no.** 43.35.Zc

## 1 Introducción

Las técnicas Phased Array (PA) se han usado y continúan utilizándose ampliamente en todo tipo de aplicaciones relacionadas con sistemas de imagen ultrasónica. Junto con el uso de transductores (arrays) de gran tamaño compuestos por un gran número de elementos se incrementa muy significativamente la calidad de imagen, tanto en resolución como en contraste, pero como consecuencia se afecta también a la complejidad y el coste final de los sistemas de imagen. Debido a estos factores, las Técnicas de Apertura Sintética (SAFT), que tienen su origen en el campo del radar, surgieron como una solución muy adecuada para conseguir reducir los requisitos hardware, el consumo y el coste de los sistemas ultrasónicos [1][2].

El concepto fundamental del SAFT se basa en la activación secuencial en emisión y recepción de cada elemento del array. Repitiendo este proceso por cada elemento, y almacenando convenientemente todas las señales recibidas, se aplica a continuación una etapa de post-procesamiento para componer la imagen final. Para llevar a cabo esta operación, se debe realizar un proceso de conformación de haz o *beamforming* que focaliza dinámicamente cada punto de la imagen en emisión y recepción consiguiendo la máxima calidad a todas las profundidades. El principal inconveniente del SAFT convencional es la baja calidad de imagen que ofrece debido a la aparición de lóbulos de rejilla y el bajo nivel de señal. Por ello, durante los últimos años se han desarrollado soluciones más complejas que garanticen un buen balance entre recursos y calidad de imagen. El método conocido como Total Focusing Method (TFM) [3], atendiendo a la nomenclatura dada por los profesores Drinkwater y Wilcox, es la técnica con mayor calidad y a su vez la más costosa, pues implica trabajar con  $N^2$  señales (suponiendo un array de  $N$  elementos) frente a las  $N$  señales del SAFT convencional lo que incrementa no solo el volumen de datos a procesar, sino también el coste del sistema de adquisición, la transferencia de datos y el coste computacional.

Debido a estos motivos, la solución para el diseño de sistemas que operen en tiempo real atiende al modelo del coarray (respuesta pulso-eco) que permite planificar el modo de operación y evitar la aparición de estos lóbulos trabajando con un número reducido de señales. Se han realizado implementaciones basadas en estos conceptos junto con el uso de técnicas GPGPU [4] consiguiendo excelentes resultados respecto a la tasas de imagen 150 veces más rápido frente a implementaciones convencionales. Sin embargo, la reducida capacidad de penetración debido al bajo nivel de señal en el material con este tipo de soluciones limita su área de aplicación. En este trabajo, se propone resolver este problema por medio del uso de codificación por pulsos para conseguir disminuir la atenuación de la señales con la profundidad de inspección. Existen numerosos tipos de secuencias binarias que pueden aplicarse a las señales ultrasónicas, como los códigos Chirp o Barker [6]. En nuestro caso, se ha optado por el uso de pulsos codificados basados en secuencias de Golay complementarias [7][8] que en conjunto con el modelo de coarray, y en concreto el método 4R-SAFT, pueden integrarse dentro del sistema de adquisición manteniendo las ventajas originales del método y alcanzando unos niveles de calidad equivalentes a sistemas más avanzados como el TFM. En la última parte de artículo, se presentan imágenes B-Scan que pertenecen a un modelo experimental médico donde se validan las propuestas.

## 2 Códigos de Golay

Los códigos complementarios de Golay se han utilizado profundamente a lo largo de estos años aplicados al proceso de excitación de los transductores ultrasónicos. Los códigos de Golay se componen de dos secuencias binarias  $A[n] = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_{N-1}\}$  y  $B[n] = \{b_0, b_1, b_2, \dots, b_{N-1}\}$  que

tienen la misma longitud  $N$  tales que  $a_i, b_i \in \{-1, +1\}$ . Las funciones de auto-correlación de  $A[n]$  y  $B[n]$  tienen la característica de que sus lóbulos laterales son iguales en magnitud pero opuestos en signo. De este modo, la suma de estas funciones independientes proporciona una función delta ideal definida según la siguiente ecuación:

$$C_A[n] + C_B[n] = \begin{cases} 0, & n \neq 0 \\ 2N, & n = 0 \end{cases} \quad (1)$$

donde  $C_A[n]$  y  $C_B[n]$  son las funciones de auto-correlación de  $A[n]$  y  $B[n]$  respectivamente para cualquier  $n$ . La construcción de los códigos de Golay se hace de manera recursiva utilizando pares de códigos más cortos mediante la técnica usada por Golay conocida como “negación y concatenación”. A modo de ejemplo, suponiendo  $A[n]$  y  $B[n]$  la representación de un par de códigos de longitud  $N$ , un nuevo par de códigos  $\hat{A}[n]$  y  $\hat{B}[n]$  de tamaño  $2N$  se forma concatenando  $B[n]$  con  $A[n]$  y  $\sim B[n]$  con  $A[n]$  siendo  $\sim B[n]$  el complementario de  $B[n]$ . De este modo, se obtiene que  $\hat{A}[n] = A[n] | B[n]$  y  $\hat{B}[n] = A[n] | \sim B[n]$ .

Uno de los principales inconvenientes de los códigos de Golay está relacionado con el número de disparos de los elementos del array. El uso de esta técnica requiere de dos disparos por cada elemento del array para completar las secuencias de excitación de ambos códigos  $A$  y  $B$ . En este trabajo, se ha optado por usar códigos de 8 bits siendo  $A[8] = \{+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1\}$  y  $B[8] = \{+1 -1 +1 -1 +1 +1 -1 -1\}$  que nos proporcionan una ganancia teórica 16 veces mayor atendiendo a la ecuación 1 (que corresponde con 24dB). La figura 5 muestra los resultados experimentales obtenidos usando los códigos descritos y sus correspondientes imágenes que serán convenientemente analizados en la sección 4.

### 3 Técnicas de apertura sintética: sistemas basados en el coarray

Como se comentó anteriormente, el diseño de sistemas de imagen basados en técnicas de apertura sintética es una solución muy adecuada para reducir los recursos electrónicos de un sistema de imagen. Sin embargo, el método SAFT convencional, en el que un único elemento se usa para emitir y recibir tiene como inconvenientes una baja relación señal a ruido (SNR) y la aparición de lóbulos de rejilla que limitan seriamente la calidad y el contraste de las imágenes.

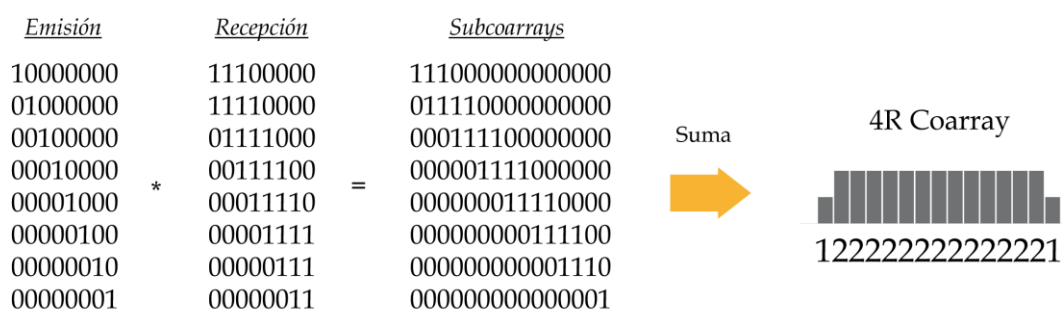


Figura 1 – Secuencia de disparos en emisión y recepción de la técnica 4R-SAFT

Para resolver estos problemas asociados, se analiza el modelo del coarray (respuesta pulso-eco, también conocido como apertura efectiva) para diseñar soluciones más sofisticadas. En este trabajo se ha optado por utilizar un método conocido como 4R-SAFT [5] en el que un elemento se utiliza para

emitir y cuatro elementos para recibir (sub-apertura centrada en torno al elemento emisor). Un esquema de la estrategia de disparos se puede ver en la figura 1, de manera que se obtienen dos señales por elemento del coarray asegurando su completitud.

En [5] se demuestra matemáticamente que, en condiciones de campo lejano, las señales involucradas en la composición del mismo elemento del coarray pueden considerarse prácticamente en fase, por lo que pueden ser sumadas directamente sin focalizar en la etapa de adquisición. Esto es una gran ventaja pues se reduce el número de señales a transmitir desde el sistema de adquisición a la memoria de  $(4N - 3)$  a  $(2N - 1)$  señales.

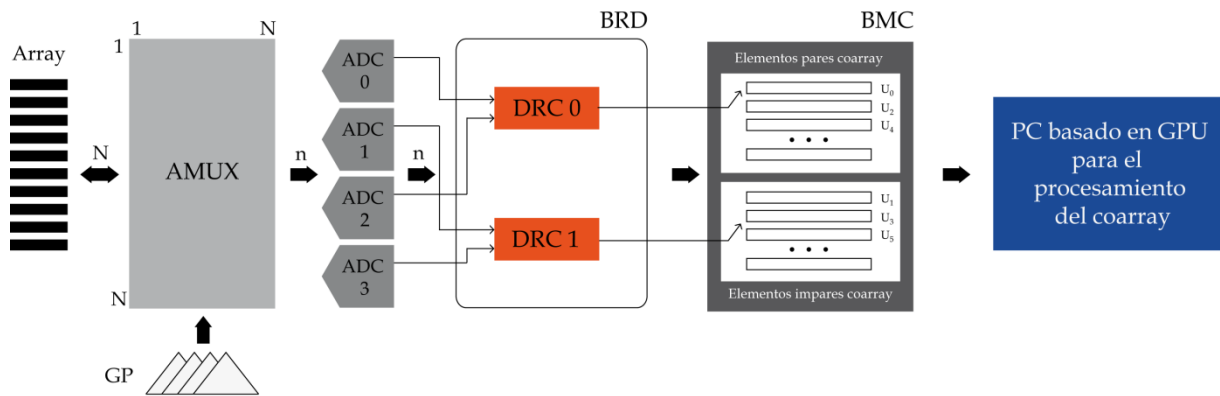


Figura 2 – Arquitectura electrónica de un sistema 4R-SAFT

La figura 2 muestra la arquitectura necesaria para implementar la técnica 4R-SAFT que puede encontrarse detalladamente en [5]. Como podemos observar, se incluyen bloques para el multiplexado analógico (AMUX), circuitos electrónicos para el procesamiento analógico y cuatro convertidores analógico digital (ADCs) y la generación de los pulsos (GP). Además, la introducción del bloque de reducción de datos (BRD) se incluye dentro de la arquitectura donde las señales de la misma frecuencia espacial son sumadas en fase justo cuando son adquiridas. Como vemos, el BRD tiene cuatro entradas que proceden de los ADCs. La suma en fase se hace por medio de dos circuitos de reducción de datos (CRD) que están formados por un sumador y una FIFO (figura 4). Los CRDs son las salidas del DRB, que proporcionan los datos para el siguiente bloque memoria del coarray BMC donde se almacenan las  $2N - 1$  señales. El BMC está dividido en dos partes donde las señales que pertenecen a elementos pares o impares del coarray se almacenan por separado. Una vez todo el conjunto de señales se ha almacenado en la memoria, los datos son transferidos a un ordenador convencional para realizar los procesos de conformación de haz a alta velocidad usando una GPU [4].

### 3.1 Incrementar SNR: integración de los códigos de Golay en el sistema de adquisición

La integración de los códigos de Golay descritos en la sección 2 en conjunto con el método 4R-SAFT puede ser implementada teniendo en cuenta la arquitectura presentada en la sección anterior. A lo largo del artículo se ha visto que la codificación de Golay necesita dos disparos por cada uno de los códigos. En base a esta codificación, siguiendo la secuencia de adquisición del 4R-SAFT los códigos de Golay pueden alternarse entre disparos como se muestra en la figura 3, de manera que un elemento del coarray estará compuesto por dos señales pertenecientes a los códigos  $A$  y  $B$  respectivamente. Los

extremos (primer y último elemento) del coarray son rechazados al estar compuestos únicamente por una señal y por tanto, el número total de señales será  $2N - 3$ .



<i>Emisión</i>	<i>Recepción</i>	<i>Subcoarrays</i>		
10000000	11100000	11100000000000	Cod A	Suma  4R Coarray Codificado  12222222222221
01000000	11110000	01111000000000	Cod B	
00100000	01111000	00011110000000	Cod A	
00010000	00111100	00000111100000	Cod B	
00001000	* 00011110	= 00000001111000	Cod A	
00000100	00001111	00000000011110	Cod B	
00000010	00000111	00000000000111	Cod A	
00000001	00000011	00000000000001	Cod B	

Figura 3 – Secuencia de disparos con codificación de Golay adaptada al modelo 4R-SAFT

En este sentido, la arquitectura descrita para el 4R-SAFT permitiría realizar el proceso de deconvolución dentro del CRD. De este modo, es posible introducir los códigos de excitación dentro del mismo, incluyendo un par de filtros FIR a cada uno de los canales para realizar la deconvolución y en el que se van alternando los códigos A y B en función de si el disparo es par o impar (figura 4) consiguiendo reducir el número de disparos de  $2N$  a  $N$ .

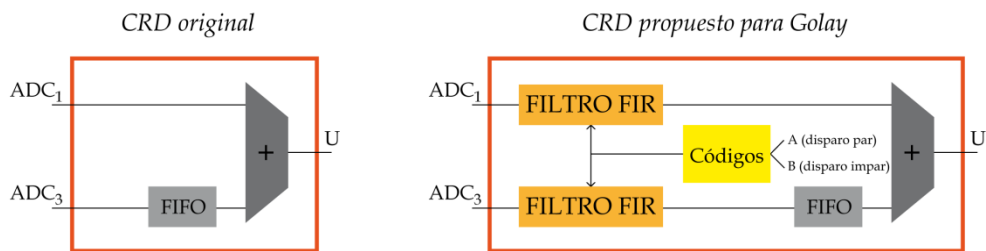


Figura 4 – CRD original y el propuesto para la integración de los códigos dentro de la arquitectura

## 4 Resultados experimentales

A continuación se presentan unas pruebas experimentales sobre el uso de códigos con técnicas de apertura sintética demostrando que el uso de ambas soluciones en conjunto permite obtener imágenes con mayor profundidad de penetración adecuadas para imágenes en el campo médico o industrial.

Las medidas se han realizado usando un *phantom* médico (Modelo 040GSE – CIRS Inc.) con 0.5dB/cm de atenuación, donde una serie de alambres de 0.1mm de diámetro han sido examinados utilizando un array de  $N = 64$  elementos, 0.28 mm de separación entre los elementos (*pitch*). Usaremos el Total Focusing Method como el modelo de referencia sobre el que validar nuestros resultados y ver los efectos de la atenuación. La región de interés se encuentra a una profundidad de 50 mm hasta 120 mm. Los resultados obtenidos para el TFM y el 4R-SAFT sin codificación y con ella pueden verse en la figura 5. En el primer caso (5a), la imagen TFM se ha compuesto usando el conjunto completo de señales que para  $N = 64$  corresponde con  $N^2 = 4096$  señales. En los otros dos casos 4R-SAFT sin códigos (5b) y 4R-SAFT con códigos (5c) sin embargo sólo se han utilizado  $2N - 1 = 127$  señales y  $2N - 3 = 125$  señales respectivamente.

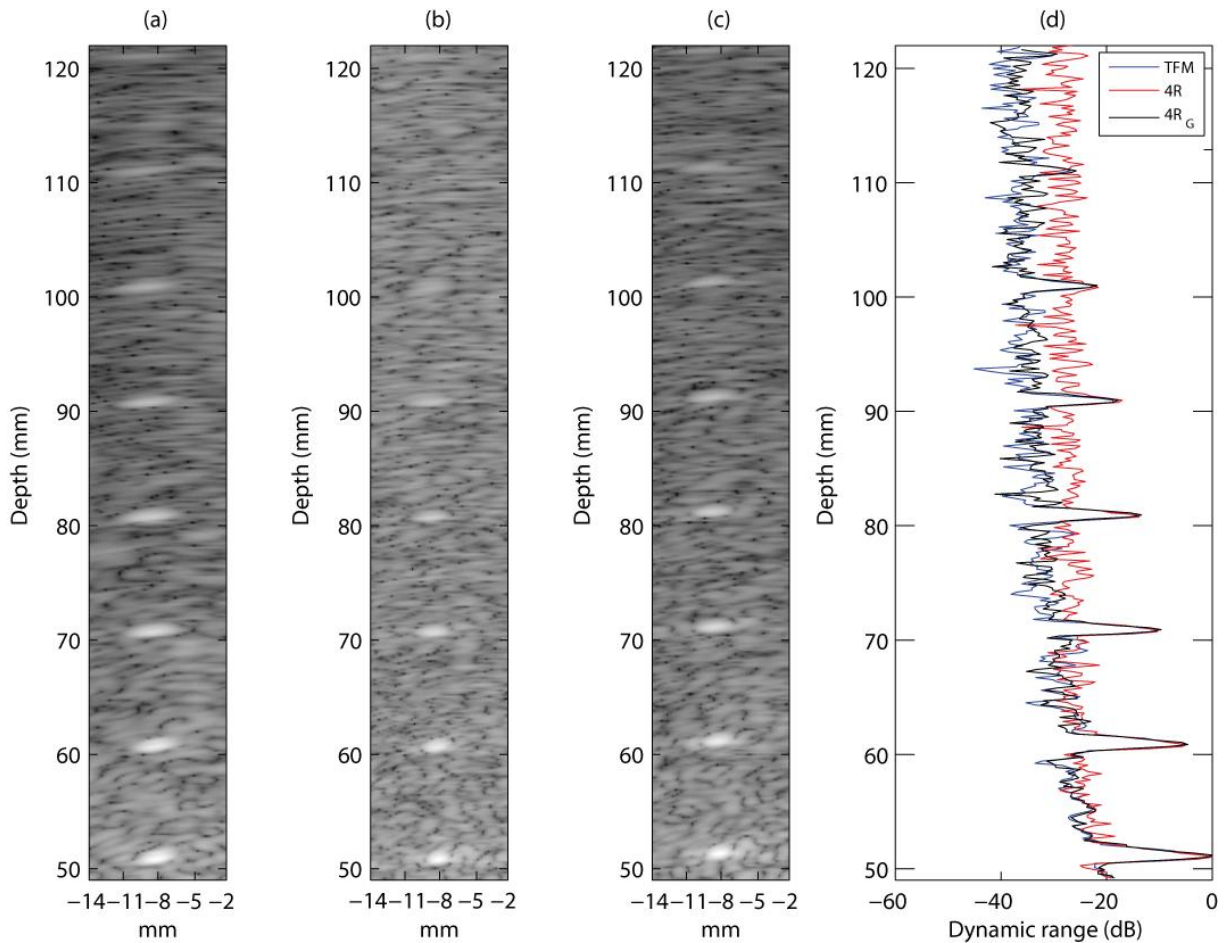


Figura 5 – Resultados experimentales (a) TFM sin códigos, (b) 4R-SAFT sin códigos, (c) 4R-SAFT con códigos y (d) Perfiles laterales en profundidad (desde 50 mm a 120 mm). Rango dinámico 70 dB

Analizando la primera de las imágenes (5a), correspondiente al caso del TFM, podemos observar fácilmente que todos los hilos son detectados con claridad. La relación señal a ruido de la imagen es de 20dB en la zona más cercana (50 mm) y va decreciendo a medida que aumenta la profundidad hasta llegar a los 5dB (120 mm), donde el ruido de fondo se ha reducido de los -20dB iniciales a -40dB. En el segundo de los casos (5b) donde se ha aplicado 4R-SAFT se aprecia que sólo 6 de los hilos pueden detectarse con claridad y el SNR es peor en relación al TFM, con un ruido de fondo que se mantiene en -30dB a una profundidad de 60 mm.

Más interesante es el tercer caso (5c) donde se muestra el 4R-SAFT con códigos de Golay, donde se observa como el nivel de detección ha aumentado sustancialmente alcanzando los niveles de calidad del TFM. Estos resultados se hacen mucho más evidentes si miramos los perfiles laterales descritos en la figura 5d. Por tanto, los resultados obtenidos con esta unión son importantes debido principalmente a dos factores: (1) el SNR conseguido es comparable al del TFM lo que se traduce en un gran incremento de la calidad de imagen en toda la región inspeccionada; y (2) el número de señales es mínimo comparado con el TFM (de  $N^2$  a  $2N - 1$ ) que permite acelerar la etapa de adquisición de los datos y las velocidades de procesamiento, consiguiendo un gran incremento en la tasa de imagen del sistema final.

## 5 Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una solución que integra técnicas de apertura sintética de mínima redundancia en conjunto con la codificación de Golay para conseguir optimizar la relación entre los recursos, velocidad y calidad de imagen del sistema. Arquitecturalmente se ha descrito la integración de los códigos de Golay dentro del sistema de adquisición para la técnica 4R-SAFT, con un mínimo incremento de la complejidad hardware, consiguiendo dividir a la mitad el número de disparos y evitando por tanto el doble disparo característico del proceso de excitación con códigos de Golay. Los resultados experimentales muestran que es posible alcanzar niveles de calidad equivalentes a los de sistemas más complejos como el Total Focusing Method. Como conclusión, esta solución permite desarrollar sistemas sofisticados con una alta calidad de imagen y bajos requerimientos hardware, englobando todo ello en una arquitectura muy compacta.

## Agradecimientos

Este trabajo está apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España a través del proyecto DPI2010-19376 y la beca BES-2008-008675.

## Referencias

- [1] B.D. Steinberg, "Principles of aperture and array system design", New York: Willey and Song, (1976)
- [2] J.A. Jensen et al, "Synthetic aperture ultrasound imaging", *Ultrasonics*, 44, pp. 515, (2006)
- [3] Caroline Holmes, Bruce W. Drinkwater, Paul D. Wilcox, Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmitreceive array data for nondestructive evaluation, *NDT & International*, Volume 38, Issue 8, December 2005, Pages 701-711
- [4] C. J. Martín-Arguedas, D. Romero-Laorden, O. Martínez-Graullera, M. Pérez-Lopez, and L. Gómez-Ullate, "An Ultrasonic Imaging System Based on a New SAFT Approach and a GPU Beamformer", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 59, no. 7, pp. 1402-1412, 2012.
- [5] Martín-Arguedas, C.J. , "Synthetic aperture techniques for ultrasonic image generation", Thesis, 2010. ISSN: 978-84-693-2364-9
- [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] Golay, M.: Complementary Series. *IRE Transactions on Information Theory*, 1961.
- [8] Nowicki A, Secomski W, Litniewski J, Trots I., "On the application of signal compression using Golays codes sequences in ultrasound diagnostic" *Archives of Acoustics*. 2003. vol. 28. 31324
- [9] 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)