XIII Congresso Ibérico de Acústica
55º Congreso Español de Acústica
TECNIACÚSTICA 2024
Faro, 11 a 13 setembro 2024

SINGLE-DETECTOR PHOTOACOUSTIC TOMOGRAPHY

Irene Pi-Martín, Alejandro Cebrecos, Juan J. García-Garrigós, Noé Jiménez

Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (i3M), Universitat Politècnica de València-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Avenida de los Naranjos s/n, 46022 Valencia, Spain

irpimar@upv.es

Resumen

La codificación espacial, basada en el cálculo del tiempo de vuelo de las señales fotoacústicas registradas en múltiples posiciones, suele adoptarse para reconstruir imágenes de tomografía fotoacústica. También puede adoptarse una alternativa sencilla y provechosa basada en la codificación temporal, que permite reducir drásticamente el número de elementos sensores, incluso hasta un único elemento de registro. Para llevar a cabo el proceso de reconstrucción utilizando una única forma de onda, se necesitan réplicas de la señal original. Éstas pueden generarse mediante diferentes estrategias, como elementos dispersores o reflectantes, o a través de cavidades reverberantes. En este trabajo, se ha diseñado una cavidad reverberante equipada con difusores acústicos en sus paredes para maximizar el espectro angular de las señales registradas, mejorando así la resolución de la reconstrucción. Se ha realizado un estudio de simulación numérica sobre el efecto del tiempo de grabación y el tamaño del detector, analizando la resolución lateral y axial y la relación señal-ruido (SNR) de las reconstrucciones.

Los resultados muestran que un mayor tiempo de registro mejora tanto la resolución lateral como la SNR de las imágenes, sin embargo, no tiene un gran efecto sobre la resolución axial. Por otro lado, se observa que detectores más pequeños mejoran la resolución lateral de la imagen, aunque no parece tener tanta importancia sobre la resolución axial o la SNR.

Palabras clave: tomografía fotoacústica, difusores, monoelemento

Abstract

Spatial encoding, based on calculating the time-of-flight of photoacoustic signals recorded at multiple positions, is typically adopted to reconstruct photoacoustic tomography images. A simple and cost-effective alternative based on temporal encoding can also be adopted, allowing a dramatic reduction in the number of sensing elements, even up to a single registration element. To perform the reconstruction process using a single waveform, replicas of the original signal are required. These can be generated through different strategies, such as scattering or reflecting elements, or through reverberant cavities. In this work, a reverberant cavity equipped with acoustic diffusers on its walls has been designed to maximize the angular spectrum of the recorded signals, thus improving the resolution of the reconstruction. A numerical simulation study has been carried out regarding the effect of the recording time and the size of the detector, analyzing the lateral and axial resolution and the signal-to-noise ratio (SNR) of the reconstructions.

Results show that longer recording times improve both the lateral resolution and the SNR of the images until they become plateaued, however it has no great effect on the axial resolution. On the other hand, it is observed that smaller detectors improve the lateral resolution of the image, although it does not seem to have as much importance on the axial resolution or the SNR.

Keywords: photoacoustic tomography, diffusers, single element.

PACS nº. 43.35.Ud, 43.60.Tj, 43.20.El

1 Introducción

Para obtener imágenes de tomografía fotoacústica (PA), los cromóforos existentes en el tejido se excitan mediante pulsos láser y sufren una expansión termoelástica que genera ondas ultrasónicas. Dado que el tejido biológico es un medio elástico, el aumento de presión se propaga como un pulso ultrasónico y puede detectarse en el límite del tejido. La imagen de la distribución inicial de presión, proporcional a la densidad de energía óptica absorbida por cromóforos como la hemoglobina o la melanina, puede reconstruirse posteriormente a partir de estas mediciones resolviendo el problema inverso [1].

Las configuraciones tradicionales de tomografía PA requieren complejos arrays de transductores ultrasónicos para registrar la información necesaria para la reconstrucción, dando lugar a sistemas complejos y costosos [2].

En este contexto, la tomografía con monoelemento empleando la codificación espaciotemporal, emerge como una solución innovadora para simplificar el sistema de adquisición [3]. La utilización de una cavidad reverberante permite que las ondas ultrasónicas generadas por la absorción de pulsos láser se reflejen múltiples veces dentro de la cavidad, creando patrones de interferencia complejos. Mediante la codificación espaciotemporal, es posible descomponer estas señales reverberantes en sus componentes originales, permitiendo así la reconstrucción de las imágenes a partir de un único transductor. Este enfoque no solo reduce significativamente la cantidad de hardware requerido, sino que también puede mejorar la accesibilidad y la portabilidad de los sistemas.

Considerando las simetrías de una cavidad rectangular, no es posible determinar unívocamente la localización de una fuente puntual para algunas posiciones del detector, ya que fuentes puntuales en dos posiciones diferentes pueden dar secuencias de pulsos y ecos idénticos. Así, para localizar las fuentes inequívocamente, se puede recurrir a medios ergódicos, donde la respuesta impulsiva de cada punto del espacio tenga una firma característica e irrepetible.

Recientemente se han propuesto diferentes configuraciones para lograr este tipo de medios para imagen PA, como hacer pasar el pulso PA a través de un medio caótico [4], aplicar un reflector a 45º del detector para duplicar la cobertura de detección [5] o encerrar la señal PA en cavidades de caras no paralelas [6].

Fuera del ámbito de la imagen médica, se ha propuesto el uso de metasuperficies para la mejora del espectro angular reflejado en una cámara reverberante electromagnética [7], demostrando una mejora en la uniformidad del campo al recubrir una de las paredes de la cámara con una metasuperficie. Este concepto puede ser aplicado a la tomografía PA con transductor monoelemento, posibilitando la obtención de imágenes cuya resolución espacial no dependa de la posición en la cámara, ya que, teóricamente, una cavidad reverberante ergódica sería equivalente a disponer de un sensor con una apertura efectiva infinita, permitiendo una reconstrucción óptima.

En este trabajo, se propone emplear difusores acústicos de tipo *Quadratic Residue Diffuser* (QRD) [8] que recubran las paredes de una cavidad rectangular, dotándola de la ergodicidad suficiente como para ser capaces de situar unívocamente fuentes puntuales en el interior de la cavidad. Para probar la viabilidad de este tipo de cavidades para tomografía fotoacústica empleando un único elemento sensor, se ha realizado un estudio numérico comparando las reconstrucciones obtenidas en una cavidad rectangular, una cavidad de Sinai (referencia de cavidad ergódica) [9] y una cavidad equipada con difusores QRD en sus paredes. Además, se ha estudiado el impacto de la longitud de la ventana temporal de registro y del tamaño del sensor monoelemento para los tres tipos de cavidades.

El trabajo se estructura de la siguiente manera, la Sección 2 describe el procedimiento seguido y las herramientas utilizadas para los dos estudios. La Sección 3 muestra y discute los resultados de los dos estudios realizados. Finalmente, la Sección 4 presenta las principales conclusiones del trabajo.

2 Métodos

2.1 Diseño de las cavidades

Se han simulado cavidades bidimensionales de 60.4 x 80 mm con paredes de material quasi-rígido, de velocidad de propagación $c = 5000$ m/s y densidad $\rho = 12000$ kg/m^3. En la parte superior (una de las caras de 60.4 mm) se ha situado el sensor monoelemento, marcado en azul en la Fig. 1 (a).

En la cavidad rectangular las cuatro paredes son lisas. Para la cavidad de Sinai, en la esquina inferior derecha se ha colocado un cuarto de billar de Sinai del mismo material que las paredes y de 28 mm de radio. Finalmente, para la cavidad equipada con los QRDs, se han diseñado 4 difusores siguiendo la ecuación de diseño

$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N}, \tag{1}$$

siendo d_n la profundidad de la n-ésima hendidura, λ_0 la longitud de onda de diseño, N el número de hendiduras y s_n la secuencia para la n-ésima hendidura, que viene definida por $s_n = n^2\ mod(N)$ [8].

En este caso, para todos los difusores se ha seleccionado la misma frecuencia de diseño, $f_0 = 0.8$ MHz. El parámetro N se ha escogido para cubrir, en cada pared, la mayor superficie posible. Por tanto, se ha definido un valor de $N_A = 139$ para el fondo ($\mathrm{QRD_A}$ en Fig. 1 (c)), $N_{B,C} = 199$ para los lados ($\mathrm{QRD_B}$ y $\mathrm{QRD_C}$ en Fig. 1 (c)) y $N_D = 47$ para cada uno de los transductores que se han colocado a los lados del sensor en la cara superior ($\mathrm{QRD_D}$ en Fig. 1 (c)). Para evitar simetría lateral, al difusor de la pared derecha ($\mathrm{QRD_C}$) se le ha aplicado un salto de fase de 55 elementos.

2.2 Estudios numéricos

Se ha seleccionado un método numérico basado en el método pseudo-espectral, implementado en la toolbox de Matlab k-Wave. Este método permite simular la generación y propagación de ondas acústicas generadas como consecuencia del efecto fotoacústico. Una vez simulada la propagación y registrada la señal en el sensor, la reconstrucción de la distribución inicial de la presión se realiza mediante la técnica de inversión temporal, reemitiendo la señal registrada previamente invertida en el tiempo. En el interior de las cavidades se ha considerado un medio acuoso con velocidad $c = 1500$ m/s y densidad $\rho = 1000$ kg/m^3.

Para evaluar el impacto de la longitud temporal de la ventana de registro, se han simulado tiempos desde 50 hasta 800 µs. Se han colocado nueve fuentes puntuales de 1 mm de diámetro dispuestas en tres filas (ver Fig. 1 (a-c)). La primera columna está centrada en la cavidad, pero se ha forzado la no simetría de las otras dos columnas para evaluar la capacidad de las diferentes cavidades de localizar de forma unívoca las fuentes. Se ha optado por un diseño que permita observar las réplicas fantasmas de las fuentes centrales en caso de ser generadas. El sensor monoelemento simulado para este caso es de 2 mm.

En segundo lugar, para analizar la influencia del tamaño del monoelemento, se ha optado por colocar únicamente tres fuentes puntuales de 1 mm de diámetro (ver Fig. 1 (d-f)), ya que se prevé que la

resolución lateral se degrade al aumentar el tamaño del sensor, y previsiblemente se fusionarían las señales de varias fuentes paralelas colocadas a la misma profundidad. Se han considerado sensores desde 1 hasta 15 mm. En la cavidad equipada con difusores se ha optado por dejar libre la pared del sensor y no colocar dos difusores pequeños a los lados de este, para evitar diferencias en el área cubierta por difusores entre los diferentes casos. Como se puede ver en la Fig. 1 (f), para este caso, la cavidad de QRDs únicamente tiene los difusores $\mathrm{cQRD_A}$, $\mathrm{QRD_B}$ y $\mathrm{QRD_C}$. Para este estudio, se ha fijado una ventana de registro de $t = 500$ µs.

2.3 Criterios de evaluación

La evaluación de la resolución lateral y axial de las reconstrucciones se ha llevado a cabo mediante el parámetro ancho total a la mitad del máximo (*Full Width at Half Máximum*, FWHM). Para el cálculo de la relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio*, SNR) se ha considerado el ratio entre la intensidad reconstruida en el interior de las fuentes y la intensidad del fondo de ruido de la imagen. El área de ruido se ha definido como un rectángulo en la parte inferior izquierda de la imagen en todos los casos, como puede verse en la Fig. 1 (a).

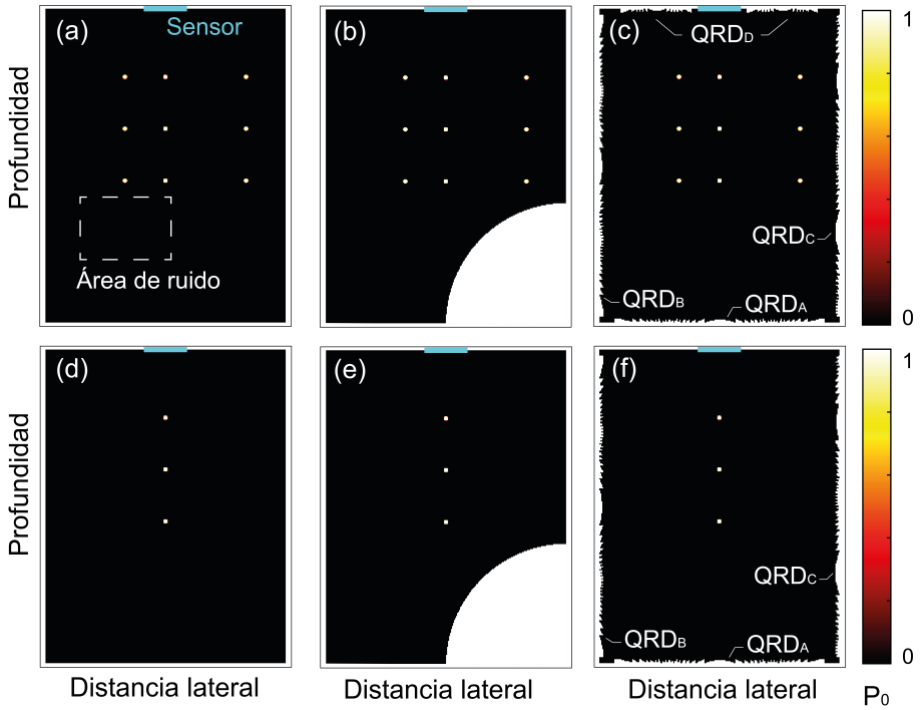


Figura 1. Representación de las geometrías de los tres tipos de cavidades estudiadas: rectangular (a, d), de Sinai (b, e) y equipada con difusores (c, f). En el interior de las cavidades se muestran las distribuciones de presión inicial empleadas para evaluar el impacto de la ventana de registro (a-c) y del tamaño del monoelemento (d-f).

3 Resultados

3.1 Ventana temporal de registro

En la Fig. 2 (a-c) se muestran los mapas de presión inicial reconstruidos empleando un registro de 50 µs. Los resultados son similares para los tres tipos de cavidades, ya que el tiempo de registro es demasiado

corto como para permitir que se dé la codificación espaciotemporal de las señales. Para este caso, los resultados son similares a los que se obtendrían sin cavidad reverberante.

El resultado de aumentar el registro temporal hasta 500 μs se muestra en la Fig. 2 (d-f). Para este caso, sí se observan grandes diferencias entre la cavidad rectangular y los otros dos tipos. Debido a la simetría de las paredes de la cavidad rectangular, se generan réplicas fantasmas de las fuentes (Fig. 2 (d)), apareciendo puntos brillantes donde inicialmente no había fuente, como puede verse en la Fig. 1 (a), donde se muestra la distribución espacial inicial de las fuentes.

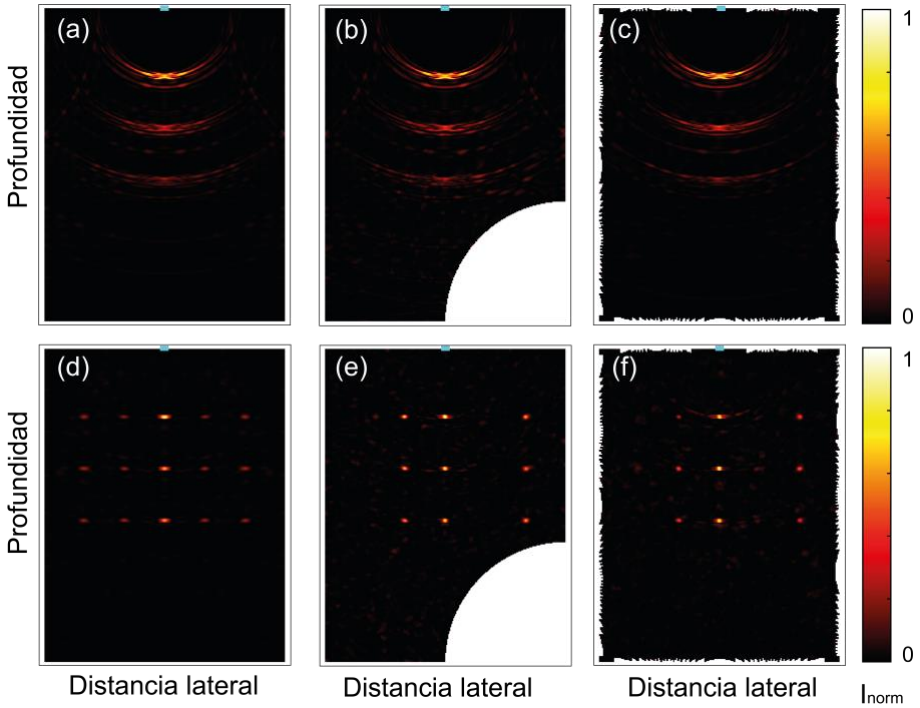


Figura 2. Reconstrucción de la presión inicial empleando 50 μs (a-c) y 500 μs (d-f) de tiempo de registro, para cavidades rectangulares (a, d), de Sinai (b, e) y equipada con difusores (c, f).

Los resultados de resolución lateral y axial y de SNR para los diferentes tiempos de registro estudiados se muestran en la Fig. 2 (a-c), respectivamente. Los marcadores representan los valores promedio de las nueve fuentes y las barras de error ilustran la desviación típica entre ellas.

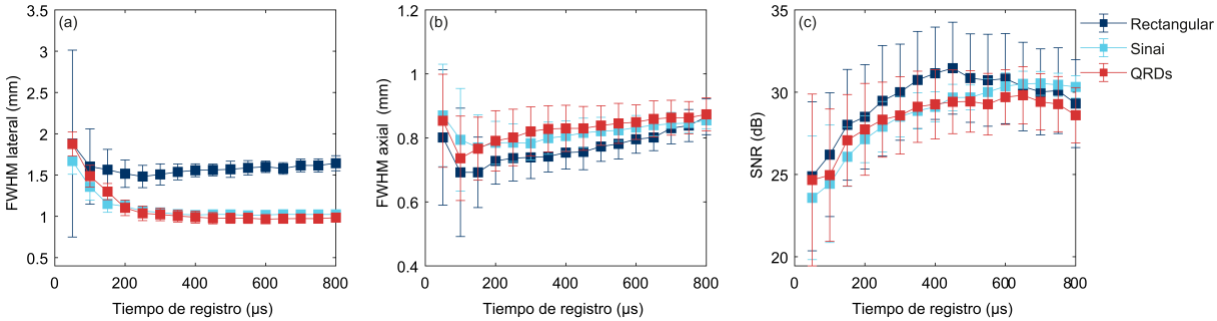


Figura 3. FWHM lateral (a) y axial (b) y SNR (c) para los tres tipos de cavidades en función del tiempo de registro.

Como se puede observar en la Fig. 3 (a), para ventanas de registro cortas, una pequeña ampliación del tiempo de registro produce mejoras sustanciales en la resolución. Este comportamiento es esperable, ya que el punto clave de poder reconstruir imagen tomográfica con un único elemento es precisamente poder registrar los ecos que se producen con las interacciones de la cavidad. Sin embargo, para todos los casos, en torno a 350 μs se estabiliza la resolución lateral. Este tiempo vendrá determinado por el tamaño de la cavidad, ya que se corresponde con el tiempo que han tardado las señales en alcanzar el sensor tras un número de rebotes suficientes para recuperar el espectro angular.

La Fig. 3 (b) muestra cómo la resolución axial de los tres tipos de cavidades es similar, ya que depende principalmente de la frecuencia de las señales registradas y no de la geometría de la cavidad. La apertura efectiva de un sensor dentro de una cavidad ergódica, idealmente, es total. Esto permite que la resolución quede limitada únicamente por la frecuencia de la señal. La resolución lateral y axial en cavidades que recuperan todo el espectro angular coinciden. Tras la estabilización, la resolución lateral y axial de las cavidades de Sinai y QRDs es muy similar (ver Fig. 3 (a, b). La diferente apertura efectiva entre la cavidad rectangular y los otros dos tipos conlleva una estabilización de la resolución lateral a un valor diferente.

Por último, la Fig. 3 (c) muestra la evolución del SNR. Al incrementar el tiempo de registro, aumenta la información de la que se dispone para reconstruir la imagen. No obstante, si la ventana de registro es demasiado larga, la señal puede verse degradada y la SNR decrece ligeramente.

3.2 Tamaño del sensor

Si se utiliza un tiempo de registro suficientemente largo y un sensor pequeño con una baja directividad, como puede verse en la Fig. 4 (a-c), se obtienen buenas reconstrucciones independientemente de la geometría de la cavidad en la que se encierre la fuente y el sensor. No obstante, es importante notar que la distribución de fuentes escogida en este caso no provocará la aparición de replicas fantasma, más relevante en la cavidad rectangular, como se ha visto en la sección 3.1. Sin embargo, los resultados de la Fig. 4 (e-g) muestran cómo, al aumentar el tamaño del sensor monoelemento hasta 15 mm, la resolución lateral empeora drásticamente para la cavidad rectangular, mientras que la codificación espaciotemporal de las cavidades ergódicas permiten mantener un nivel de apertura numérica efectiva suficientemente bueno como para resolver las tres fuentes, a pesar de sufrir una ligera pérdida de resolución lateral (ver Fig. 4 (h)).

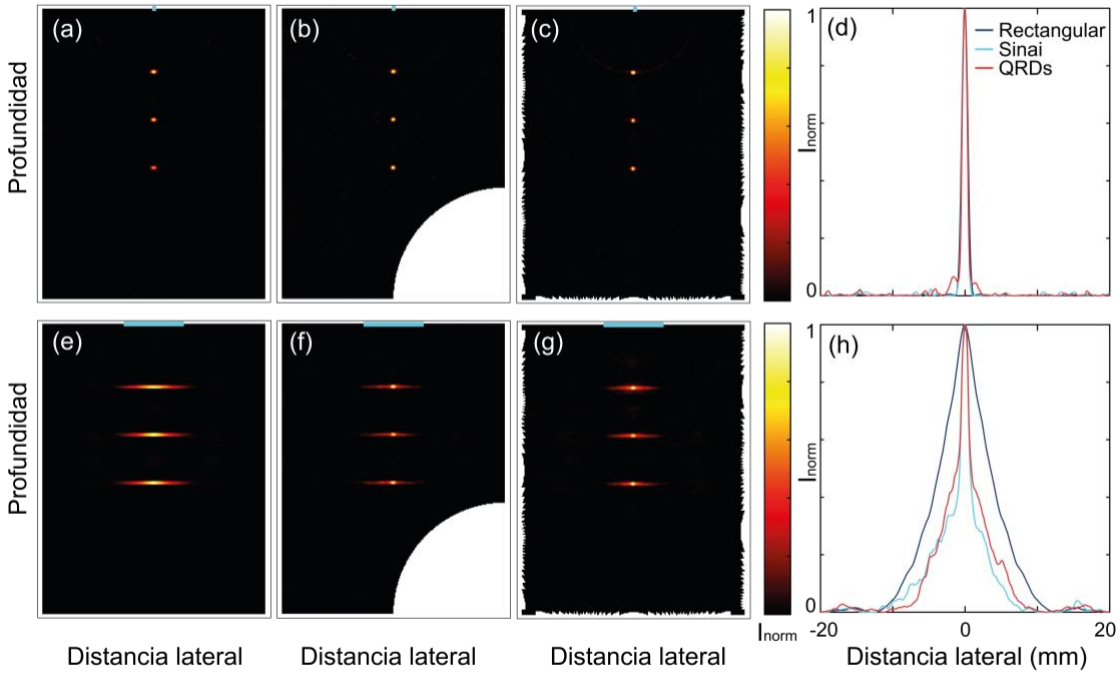


Figura 4. Distribución inicial de presiones empleando un sensor de 1 mm (a-c) y de 15 mm (e-g), para cavidades rectangulares (a, e), de Sinai (b, f) y rectangular equipada con difusores QRDs (c, g). Perfiles laterales de la fuente central empleando un sensor de 1 mm (d) y 15 mm (h).

La Fig. 5 muestra los resultados de resolución y SNR para diferentes tamaños de sensor. Los marcadores representan los valores promedio de las tres fuentes y las barras de error ilustran la desviación típica entre ellas.

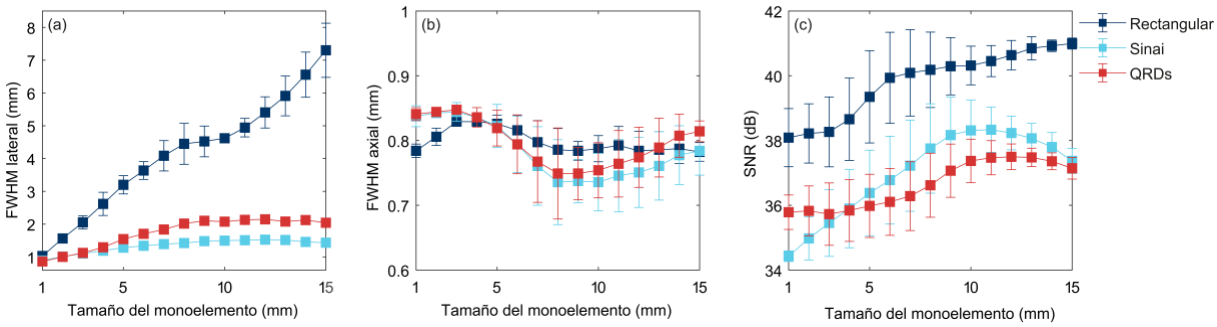


Figura 5. FWHM lateral (a) y axial (b) y SNR (c) para los tres tipos de cavidades en función del tamaño del sensor.

La resolución lateral depende de la apertura efectiva del sensor y de la frecuencia de la señal. La directividad del sensor aumenta con el tamaño, disminuyendo así su apertura numérica. Como puede verse en la Fig. 5 (a), la cavidad de Sinai y la equipada con QRDs permiten recuperar el espectro angular y, por tanto, aunque al crecer en tamaño el sensor pierde apertura numérica real, puede mantener su apertura efectiva y, así, sostener la resolución lateral. Por contra, en las cavidades rectangulares, la

pérdida en apertura numérica real es irrecuperable y, por tanto, la resolución empeora. El FWHM lateral empeora a medida que aumenta el tamaño del sensor, drásticamente para la cavidad rectangular y ligeramente para la cavidad Sinai y la cavidad equipada con QRDs.

De forma análoga al efecto del tamaño de ventana temporal, la Fig. 5 (b) muestra cómo la resolución axial es independiente al tamaño del sensor para todas las cavidades. El ancho de banda de las señales es independiente al tamaño del sensor, por tanto, también lo es la resolución axial. Para los tres casos, la resolución axial oscila en torno a su valor de referencia. La Fig. 5 (c) muestra cómo la SNR aumenta a medida que aumenta el tamaño del sensor, debido al incremento en la amplitud de la señal registrada, hasta su estabilización.

4 Conclusiones

Se ha demostrado numéricamente la viabilidad de la tomografía fotoacústica utilizando una cavidad reverberante ergódica incorporando difusores y empleando un sensor monoelemento. Este sistema permite incrementar el espectro angular del campo reflejado por los difusores, facilitando la detección desde múltiples ángulos con un solo elemento. Se necesitan cavidades ergódicas, como la de Sinai o los QRDs, para tener reconstrucciones estables en todos los ángulos, y evitar tanto los artefactos de apertura finita como la aparición de fuentes fantasma provocadas por la simetría. Esto se traduce en una adquisición de datos más eficiente y una reconstrucción de imágenes precisa, comparable a la obtenida con dispositivos multielemento.

La apertura efectiva de estos sistemas puede llegar a ser completa, pero es necesario adecuar el tamaño de la ventana de registro para recoger ecos provenientes de rebotes de hasta 2π estereorradianes. Si se emplean cavidades ergódicas, el tamaño del sensor no es una limitación muy restrictiva para la resolución y, previsiblemente, aumentar el tamaño del sensor permitiría, para una misma geometría de la cavidad, reducir la longitud de registro, ya que habría más superficie sobre la cual se podría registrar la señal. Nos planteamos estudiar este caso en un futuro, buscando establecer una relación de compromiso entre tiempo de registro y tamaño del sensor.

Idealmente, las paredes de las cavidades deberían ser completamente rígidas, pero, experimentalmente, y considerando que el medio de propagación es agua, es difícil construir una cavidad de estas características. Esto provoca una reducción del coeficiente de reflexión de las paredes, que puede ser interpretada como la presencia de pérdidas en el sistema. Así, la anchura de los modos de resonancia de la cavidad se verá incrementada, incrementando el número de modos degenerados, que reducen la calidad de la reconstrucción. Esta limitación no puede resolverse para el caso de las cavidades rectangular y de Sinai. Sin embargo, los difusores propuestos, que han sido diseñados asumiendo que no se produce propagación de ondas en su interior, pueden ser rediseñados considerando la penetración de la onda, lo que permitiría una mejora adicional en la calidad de las reconstrucciones mostradas en este trabajo.

Es evidente que es necesario crear ergodicidad en el interior de la cavidad para poder hacer tomografía monoelemento. Con este estudio queda probado que no es necesario recurrir a la cavidad de Sinai, cuyo espacio interior se ve limitado por el cuarto de bola que causa la caoticidad, sino que es viable la reconstrucción estable empleando elementos difusores, como los QRDs, en las paredes de una cavidad rectangular. La selección y disposición de los difusores para este caso ha seguido el único criterio de cubrir las paredes de la cavidad, pero es altamente probable que haya otras configuraciones que mejoren la ergodicidad de la cavidad equipada con difusores y, por tanto, la calidad de la imagen reconstruida.

Este enfoque únicamente es aplicable a objetivos que puedan ser introducidos en la cavidad cerrada o semi cerrada, pero simplifica el sistema de imagen tomográfica evitando tanto el uso de una matriz de transductores grande y costosa, como la exploración de escáner punto por punto, que suele emplear tiempos de adquisición largos. Las aplicaciones médicas de este dispositivo son prometedoras, particularmente en el campo de la imagen de mama, donde la tomografía fotoacústica puede ofrecer una detección temprana y no invasiva de tumores.

Agradecimientos

Irene Pi agradece el apoyo financiero de la Generalitat Valenciana a través del programa CIACIF/2021/403.

Referencias

[1] Beard, P. (2011). Biomedical photoacoustic imaging. *Interface focus*, *1*(4), 602-631.

[2] Tian, C., Pei, M., Shen, K., Liu, S., Hu, Z., & Feng, T. (2020). Impact of system factors on the performance of photoacoustic tomography scanners. *Physical Review Applied*, *13*(1), 014001.

[3] Cox, B. T., & Beard, P. C. (2009). Photoacoustic tomography with a single detector in a reverberant cavity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *125*(3), 1426-1436.

[4] Deán-Ben, X. L., Özbek, A., López-Schier, H., & Razansky, D. (2019). Acoustic scattering mediated single detector optoacoustic tomography. *Physical review letters*, *123*(17), 174301.

[5] Huang, B., Xia, J., Maslov, K., & Wang, L. V. (2013). Improving limited-view photoacoustic tomography with an acoustic reflector. *Journal of biomedical optics*, *18*(11), 110505-110505.

[6] Li, Y., Li, L., Zhu, L., Maslov, K., Shi, J., Hu, P., ... & Wang, L. V. (2020). Snapshot photoacoustic topography through an ergodic relay for high-throughput imaging of optical absorption. *Nature Photonics*, *14*(3), 164-170.

[7] Sun, H., Li, Z., Gu, C., Xu, Q., Chen, X., Sun, Y., ... & Martin, F. (2018). Metasurfaced reverberation chamber. *Scientific reports*, *8*(1), 1577.

[8] Cox, T. J. (2009). D'Antonio. *P. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*.

[9] Sinai, Y. G. (1970). Dynamical systems with elastic reflections. *Russian Mathematical Surveys*, *25*(2), 137.