TÉCNICAS DE HOLOGRAFÍA ACÚSTICA PARA LA VALIDACIÓN RÁPIDA DE HOLOGRAMAS ACÚSTICOS

PACS: 43.35.c, 43.80.Sh, 43.60.Sx

Noé Jiménez, Alicia Carrión-García, Diana Andrés, Enrique González-Mateo, Claudia Hernández-López, Francisco Camarena

Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (i3M), Universitat Politècnica de València, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, València, Spain. nojigon@upv.es.

Palabras Clave: acoustic holograms, holography

ABSTRACT

Direct measurement of the acoustic field by point-to-point scanning results in very long acquisition times and, when volumetric data are required, the times are in many cases unaffordable from an experimental point of view. This is the case of the field produced by an acoustic hologram, where the generated acoustic image has in many cases a complex three-dimensional structure. In this paper we present the use of holography techniques for the rapid estimation of the acoustic field produced by holographic lenses over a whole volume of interest. We present an application case, reconstructing the field of an acoustic vortex, where the helical structure is correctly recovered along the entire ultrasound beam. This method provides volumetric information in a fast way that can also be used to check the correct functioning and uniformity of transducers, and thus validate therapeutic ultrasound devices.

RESUMEN

La medida directa del campo acústico mediante escaneado punto a punto resulta en tiempos de adquisición muy elevados y, cuando se precisan de datos volumétricos, los tiempos son en muchos casos inabordables desde el punto de vista experimental. Este es el caso del campo producido por un holograma acústico, en donde la imagen acústica generada tiene en muchos casos una compleja estructura tridimensional. En este trabajo presentamos el uso de técnicas de holografía para la estimación rápida del campo acústico producido por lentes holográficas sobre todo un volumen de interés. Aplicamos esta técnica en un ejemplo, reconstruyendo el campo de un vórtice acústico, donde la estructura helicoidal es recuperada correctamente a lo largo de todo el haz de ultrasonidos. Este método proporciona información volumétrica de manera rápida que, además, puede ser empleada para comprobar el correcto funcionamiento y uniformidad de transductores, y de esta manera validar dispositivos terapéuticos de ultrasonidos.

1. INTRODUCCIÓN

Los hologramas acústicos son lentes que codifican un frente de onda complejo, capaces de sintetizar un campo acústico determinado en modo de transmisión o reflexión [1]. Estas lentes pueden generar campos complejos con una distribución espacial nítida y han encontrado aplicación práctica en varias aplicaciones biomédicas. Por ejemplo, empleando ultrasonidos terapéuticos y hologramas, se pueden corregir las aberraciones introducidas por los huesos del cráneo durante la propagación transcraneal, generando un foco único de alta calidad, y generando un complejo acústico que coincida con un objetivo terapéutico en el cerebro [2], [3]. Los resultados de experimentos in vivo en ratones muestran que empleando hologramas se pueden dosificar fármacos en el sistema nervioso central [4]. Esta técnica permite incluso la focalización transtemporal con transductores de pequeña apertura [5].

Otras aplicaciones biomédicas de los hologramas incluyen tratamientos de hipertermia, donde el patrón de aumento de temperatura local en el interior del tejido se puede modular mediante un holograma acústico [6]. Por otro lado, puesto que los hologramas permiten la codificación de complejos frentes de onda, se pueden emplear para la generación de haces exóticos, como haces de vórtices para el atrapamiento de partículas y la interacción onda-materia [7][8].

El rendimiento de las lentes holográficas suele estimarse mediante mediciones directas punto a punto empleando un hidrófono en un tanque de agua. Esto proceso es sencillo en el caso de los haces focalizados puesto que son simétricos. Normalmente se escanea el campo a lo largo del eje del haz, y como mucho se caracteriza un plano transversal para medir el perfil lateral. Sin embargo, este no es el caso para campos acústicos tridimensionales muy complejos como los generados por los hologramas, ya que la medición directa del campo acústico empleando un escaneo punto a punto resulta en tiempos de adquisición muy largos y, cuando se requieren datos volumétricos, los tiempos y los requerimientos de almacenamiento son en muchos casos inasequibles desde el punto de vista práctico.

En este trabajo presentamos el uso de técnicas de proyección holográfica para la estimación rápida del campo acústico producido por lentes holográficas en todo un volumen de interés. Presentamos dos casos de aplicación. En el primer caso de aplicación, demostramos cómo las técnicas de proyección holográfica pueden reconstruir la imagen acústica generada por un holograma acústico, diseñado con fines terapéuticos en el rango de los ultrasonidos, permitiendo la estimación del volumen focal incluso dentro del cráneo de un macaco. En un segundo ejemplo, reconstruimos el campo de un vórtice acústico, donde la estructura helicoidal se recupera correctamente a lo largo de todo el haz de ultrasonidos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Si consideramos una fuente plana, situada en las coordenadas $\mathbf{r}_0$ vibrando con un perfil de velocidad de partícula dado por $\mathbf{v}_0(\mathbf{r}_0)$, el campo de presión resultante en un punto arbitrario $\mathbf{r}$ viene dado por

$$p(\mathbf{r},t) = i\rho_0 c_0 k e^{i\omega t} \int_S \mathbf{v}_0(\mathbf{r}_0) \frac{e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}}{2\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|} dS_0 \quad (1)$$

donde ρ_0 es la densidad, c_0 es la velocidad del sonido, k es el número de onda, y ω es la frecuencia angular. Esta integral es de hecho una convolución en dos dimensiones entre el patrón de radiación sobre el plano de la fuente y la función de Green

$$G(r) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r}. \quad \text{ZEqn5} \quad (2)$$

Por lo tanto, utilizando las propiedades del operador de convolución podemos resolver eficientemente esta operación en el dominio de la frecuencia espacial. Calculando las transformadas espaciales de Fourier en 2D tanto del campo fuente como de la función de Green, podemos escribir la convolución dada por la ec. (1) como un producto en el espacio-*k*

$$P(k_x,k_y,z,t) = i\rho_0 c_0 k e^{i\omega t} V(k_x,k_y) H(k_x,k_y,z), \quad (3)$$

donde $V(k_x,k_y)$ es el espectro angular del campo fuente y $H(k_x,k_y,z)$ es el espectro angular del campo fuente y z, conocido como el propagador. La transformada espacial de Fourier 2D de la fuente es físicamente una descomposición de onda plana del campo de la fuente, cada componente representa una onda plana que viaja a un ángulo diferente, por lo tanto, se conoce como el espectro angular del campo. Cada onda plana en el espacio-*k* presenta un vector de onda $\mathbf{k} = k_x\hat{x} + k_y\hat{y} + k_z\hat{x}$, por lo tanto, las componentes transversales del número de onda k_x y k_y vienen dadas por

$$k_x = \cos(\theta)\cos(\phi)k,$$
$$k_y = \sin(\theta)\cos(\phi)k, \quad (4)$$

donde θ es el acimut y ϕ el ángulo de elevación. Las componentes no evanescentes del espectro angular de la función de Green vienen dadas por

$$H(k_x, k_y, z) = \frac{\exp(-izk_z)}{ik_z}, \quad (5)$$

donde el número de onda axial viene dado por $k_z^2 = k^2 - k_x^2 - k_y^2$ para los modos de propagación, es decir, $k_x^2 + k_y^2 \leq k^2$, y $(-ik_z)^2 = k^2 - k_x^2 - k_y^2$ para los modos evanescentes, cuando se cumple $k_x^2 + k_y^2 > k^2$. La restricción angular se aplica para superar el aliasing de las ondas que oscilan rápidamente al propagarse en ángulos rasantes [9]. Finalmente, el campo se reconstruye mediante la transformada inversa de Fourier de la ecuación (2). Utilizando el espectro angular se puede proyectar el campo hacia adelante, para conocer el campo generado por una fuente. Ello es muy útil para predecir el campo que produciría un sistema de radiación conocido.

Además, la proyección se puede realizar de manera inversa, desde un plano de imagen hacia el plano de la fuente. Ello permite conocer la fuente que generó un determinado campo. Esta última modalidad puede utilizarse para diseñar hologramas. Por ejemplo, si imponemos un campo en un plano de imagen, por ejemplo, una forma que se ajuste a un objetivo terapéutico, podemos proyectar hacia atrás al plano de la fuente para obtener un holograma. Este holograma codifica la información del frente de onda, de tal manera que cuando el tiempo corre hacia adelante utilizando una proyección hacia adelante recuperamos una versión limitada por difracción de la imagen original.

Además, si medimos el campo en un plano de imagen, podemos proyectar el campo sobre cualquier otra posición, lo que permite la evaluación rápida del campo sobre un volumen sin necesidad de medirlo. Esta es la modalidad que emplearemos en este trabajo para reconstruir el campo acústico tridimensional en todo un volumen a partir de la medida experimental del campo acústico en un plano.

El transductor bajo análisis consta de dos elementos activos diferentes, un disco piezoeléctrico y un anillo concéntrico. Sobre ambos, se coloca una lente que tiene dos zonas que se corresponden con los dos transductores. Cada lente tiene un perfil en espiral que genera un haz de Bessel de orden superior, de cargas topológicas diferentes. La superposición de ambos generará sobre la zona de interés una estructura de forma helicoidal [10]. Esta estructura se analizará mediante la técnica de holografía propuesta, únicamente procesando el campo medido sobre un plano de 100 x 100 mm^2 a una distancia de 60 mm.

3. RESULTADOS

En primer lugar, mostramos el campo medido a una distancia alejada del foco del sistema, a 60 mm de la superficie del transductor. La fig. 1 (a) muestra el campo medido estando el disco interior activo, y la fig. 1 (b) muestra el campo cuando únicamente está activo el anillo exterior. La superposición de los campos viene dada por la fig. 1 (c). El campo muestra la dislocación de los vórtices con el característico nulo en el eje del sistema. Sin embargo, la complejidad de la estructura tridimensional del campo helicoidal no se puede apreciar debido a que la medida se ha realizado en un único plano.

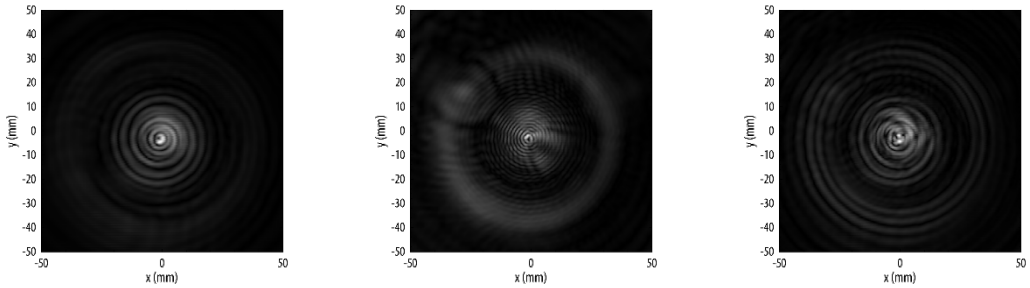


Figura 1. (a) Campo medido activando únicamente el transductor circular interno. (b) campo medido empleando únicamente el transductor anular externo. (c) Superposición de los dos campos.

Empleando el espectro angular podemos proyectar el campo medido sobre una distancia arbitraria, por lo que podemos reconstruir de manera muy eficiente el campo en cualquier punto. Si proyectamos sobre la superficie del transductor podemos evaluar la vibración de la lente. La fig. 2 muestra Campo proyectado sobre la fuente cuando activamos el transductor interno. (b) activando únicamente el transductor externo, y (c) activando ambos. Observamos como se aprecia claramente el perfil en forma de espiral de ambas lentes, con la apertura de cada uno de los transductores claramente delimitada. En el caso del transductor exterior, observamos un defecto en la parte superior izquierda, que puede estar debido a un mal acoplo de la lente y el transductor, o una soldadura defectuosa. Como vemos, esta proyección ofrece la posibilidad de analizar el perfil de radiación de la fuente y su calidad.

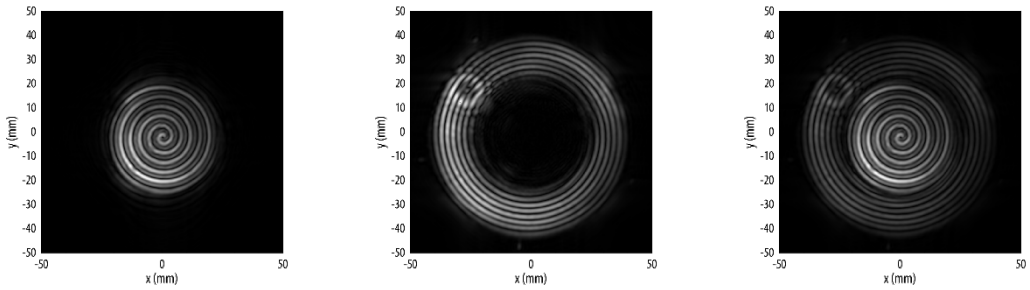


Figura 2. (a) Campo proyectado sobre la fuente cuando activamos el transductor interno. (b) activando únicamente el transductor externo, y (c) activando ambos.

Finalmente, podemos emplear el espectro angular del campo medido para calcular el campo sobre todo un volumen de interés. La Figura 3 muestra una imagen de la proyección de máxima intensidad sobre al valor absoluto del campo, calculado desde la superficie del transductor hasta una distancia de 120 mm. Se observa la estructura tridimensional del campo, donde la forma helicoidal con tres ramas enlazadas emerge sobre la zona focal. En particular, estos haces de taladro alargados se obtienen mezclando dos haces de Bessel de alto orden, conformando una estructura helicoidal donde la distribución de intensidad gira con una frecuencia angular controlada.

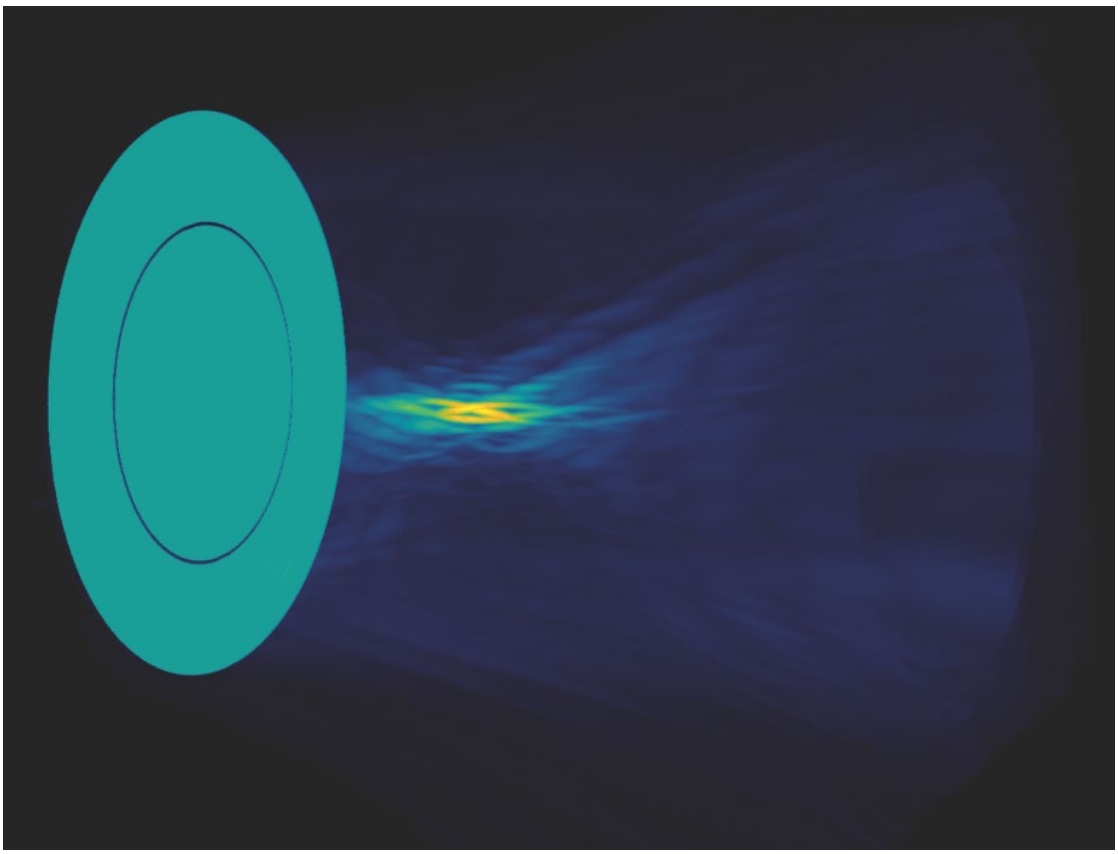


Figura 3. Campo generado por la interferencia de dos haces de Bessel desintonizados, conformado un campo en forma de hélice de tres ramas. Este campo ha sido calculado únicamente a partir de los datos medidos experimentalmente a una distancia de 60 mm.

4. CONCLUSIONES

Este método proporciona información volumétrica de forma rápida que también puede utilizarse para comprobar el correcto funcionamiento y la uniformidad de los transductores, y así validar los dispositivos de ultrasonidos terapéuticos. Ello abre las puertas al análisis de dispositivos terapéuticos basados en hologramas, pues disminuye en gran medida el tiempo de medida y los requerimientos de almacenamiento de datos experimentales. Además, puesto que muchos de los campos acústicos con interés terapéutico tienen una estructura tridimensional compleja, el método permite la visualización de los detalles del campo empleando técnicas de visualización de renderizado volumétrico. De esta manera, las técnicas de holografía emergen como excelentes candidatas para analizar de manera muy rápida y eficiente el campo generado por hologramas acústicos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido apoyada por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el Ministerio de Universidades a través de los contratos Ramón y Cajal RYC2021-034920-I, Juan de la Cierva - Incorporación: IJC2018-037897-I, Juan de la Cierva - Formación FJC2019-040453-I, la beca FPU19/00601, y el proyecto Plan Nacional Retos PID2019-111436RB-C22; por la Agencia Valenciana de la Innovació a través de las subvenciones INNVAL10/19/016, INNCON/2021/8 e INNVA1/2020/92; y por la Generalitat Valenciana con las subvenciones ACIF/2017/045, FDEGENT/2019/004. Actuación cofinanciada por la Unión Europea a través del Programa Operativo del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Comunitat Valenciana 2014-2020 (IDIFEDER/2018/022).

REFERENCIAS

[1] K. Melde, A. G. Mark, T. Qiu, and P. Fischer, “Holograms for acoustics,” *Nature*, vol. 537, no. 7621, p. 518, 2016.

[2] S. Jiménez-Gambín, N. Jiménez, J. M. Benlloch, and F. Camarena, “Holograms to Focus Arbitrary Ultrasonic Fields through the Skull,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 12, no. 1, p. 014016, Jul. 2019, doi: 10.1103/PhysRevApplied.12.014016.

[3] G. Maimbourg, A. Houdouin, T. Deffieux, M. Tanter, and J.-F. Aubry, “3D-printed adaptive acoustic lens as a disruptive technology for transcranial ultrasound therapy using single-element transducers,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 63, no. 2, p. 25026, 2018.

[4] S. Jimenez-Gambin, N. Jimenez, A. Pouliopoulos, J. M. Benlloch, E. Konofagou, and F. Camarena, “Acoustic Holograms for Bilateral Blood-Brain Barrier Opening in a Mouse Model,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 69, no. 4, 2022, doi: 10.1109/TBME.2021.3115553.

[5] D. Andrés, N. Jiménez, J. M. Benlloch, and F. Camarena, “Numerical Study of Acoustic Holograms for Deep-Brain Targeting through the Temporal Bone Window,” *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 48, no. 5, 2022, doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2022.01.010.

[6] D. Andrés, J. Vappou, N. Jiménez, and F. Camarena, “Thermal holographic patterns for ultrasound hyperthermia,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 120, no. 8, 2022, doi: 10.1063/5.0081565.

[7] S. Jiménez-Gambín, N. Jiménez, and F. Camarena, “Transcranial Focusing of Ultrasonic Vortices by Acoustic Holograms,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 14, no. 5, p. 54070, 2020, doi: 10.1103/PhysRevApplied.14.054070.

[8] S. Jiménez-Gambín, N. Jiménez, J. M. Benlloch, and F. Camarena, “Generating Bessel beams with broad depth-of-field by using phase-only acoustic holograms,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 20104, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-56369-z.

[9] X. Zeng and R. J. McGough, “Evaluation of the angular spectrum approach for simulations of near-field pressures,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, no. 1, pp. 68–76, Jan. 2008, doi: 10.1121/1.2812579.

[10] G. Kontenis, D. Gailevicius, N. Jiménez, and K. Staliunas, “Optical Drills by Dynamic High-Order Bessel Beam Mixing,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. In press, 2022.