



ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE FIJACIÓN EN LA RADIACIÓN DE UNA SUPERFICIE DE POLYCARBONATO

PACS: 43.38.Ar

Escuder, E.; Ramis, J.; Alba, J.; Hernández, F.; Ardid, M.; Picó, R.; Redondo, F.J.

Escuela Politécnica Superior de Gandía

Universidad Politécnica de Valencia

Carretera Nazaret-Oliva s/n

46730 Grao de Gandía. España

Tel: 962 849 300

Fax: 962 849 309

E-Mail: evescude@fis.upv.es, jramis@fis.upv.es, jesalba@fis.upv.es, ferherga@fis.upv.es

ABSTRACT

In this paper, radiation efficiency and vibration characteristics of a polycarbonate flat surface used like a mechanic-acoustic transducer are analyzed. The flat surface is excited with a electro-mechanic transducer of small dimensions. Pressure level measures are done at small distance of the source, and the vibration speed at the surface of the source is calculated by means of the technique of acoustic holography of nearfield (NAH) [1]. The behaviour of the system formed by the surface and the excitatory transducer is similar to that of the Distributed Modes Loudspeaker (DML), which will also be described.

RESUMEN

En este artículo, se analizan la eficiencia de la radiación y las características de vibración de una superficie plana de policarbonato utilizada como transductor mecánico-acústico, excitada con un transductor electro-mecánico de pequeñas dimensiones. Para ello se realizan medidas de nivel de presión a cierta distancia de la fuente, para posteriormente calcular la velocidad de vibración en la superficie de la fuente mediante la técnica de holografía acústica de campo cercano (NAH) [1]. El comportamiento del sistema formado por la superficie y el transductor excitador es el propio de un altavoz de modos distribuidos (DML) que también se describe.

INTRODUCCION

Técnica NAH

La técnica Holografía Acústica de campo cercano (NAH, Nearfield Acoustical Holography), describe un procedimiento holográfico para reconstruir el campo sonoro y la velocidad de vibración de un objeto o fuente sonora, a partir de presiones medidas en un array de micrófonos, en un plano paralelo y cercano a la fuente. Desde 1950, la holografía ha sido una poderosa herramienta. Su gran utilidad se debe a que a partir de valores registrados en una superficie 2-D del holograma, se puede reconstruir el campo en cualquier otro plano.

Esta técnica comprende la grabación de la amplitud y la fase de la presión sonora con un array plano de micrófonos, para calcular mediante técnicas de reconstrucción digital la estructura de la fuente de sonido objeto.

Altavoz de modos distribuidos

Un altavoz de modos distribuidos tiene dos partes: el transductor electromecánico, que puede ser dinámico o piezoeléctrico, y el mecánico-acústico que, en este caso, consiste en una superficie de policarbonato que está en conexión con el transductor citado y radia la energía acústica generada al vibrar. Su eficiencia depende de muchos factores, entre otros de las distintas configuraciones de montaje que aportan condiciones de contorno al problema. Estos altavoces generan el campo acústico mediante la vibración de una superficie rectangular, y se puede suponer, en primera aproximación, que todos los puntos sobre su superficie se mueven con la misma amplitud y fase, [2], [3] y [4].

La superficie de policarbonato, totalmente transparente, tiene un comportamiento acústico similar al del panel utilizado en el altavoz de modos distribuidos, el principio de funcionamiento es idéntico, se basa en la generación del máximo número posible de modos (principio de modos distribuidos), [5], [6], [7], [8], [9] y [10].

El objeto del presente trabajo es evaluar la influencia de distintas condiciones de montaje en la radiación de este tipo de altavoces de policarbonato, determinando la velocidad de vibración en la superficie de la fuente mediante la técnica Holografía Acústica de campo cercano.

FUNDAMENTOS DE NAH

A partir del teorema de Green, se puede derivar una integral que describe la presión acústica en cualquier lugar del espacio medio entre la fuente y un plano de medida, si se considera que la fuente está localizada en $z = d$, [11], véase figura 1, la fuente se localiza en $z=d$ y el array de micrófonos en el holograma $z=h$:

$$p(x, y, z) = -\frac{1}{2\rho} \iint_{-\infty}^{\infty} p(x', y', d) \times \frac{\partial}{\partial z'} \left(\frac{e^{ikR}}{R} \right)_{z=d} dx' dy' \quad (1)$$

donde $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$, $k = 2\pi / \lambda$, $z \geq d$, y la dependencia temporal $e^{-i\omega t}$ no



se considera. En NAH plana, se mide $p(x, y, z)$ en un plano $z = h$ denominado plano del holograma, y se retropropaga el campo de presión para determinar la presión $p(x, y, d)$ en otro plano $z = d$, esto se obtiene invirtiendo la ecuación (1). Si z es una constante, entonces la ecuación (1) es una convolución y puede invertirse mediante transformadas de Fourier, que se definen en dos dimensiones como:

$$\hat{P}(k_x, k_y, d) \equiv \iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y, d) e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dx dy \quad (2)$$

tomando la transformada de Fourier en ambas caras de la ecuación (1), se obtiene:

$$\hat{P}(k_x, k_y, h) = \hat{P}(k_x, k_y, d) e^{ik_z(h-d)} \quad (3)$$

Figura 1. Holograma y fuente

La presión en el espacio k en el holograma sería simplemente la presión en el espacio k en la fuente por una exponencial que depende de k_z y de la distancia entre la fuente y el holograma,

es decir, de un plano a otro sólo se produce un cambio de fase. k_z se define de la siguiente forma:

$$k_z = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 \leq k^2; \quad c_x, c_y > c; \quad k_z \text{ real} & (a) \\ \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 > k^2; \quad c_x \text{ o } c_y < c; \quad k_z \text{ imaginario} & (b) \end{cases} \quad (4)$$

Cualquier distribución de presión puede expresarse únicamente y completamente mediante una suma de ondas planas y evanescentes. La transformada de Fourier, en la ecuación (2), representa una descomposición del campo sonoro en ondas planas y ondas evanescentes con direcciones dadas por k_x y k_y , entonces las ecuaciones (3) y (4a) muestran que una onda plana experimentará un cambio de fase dado por el argumento de la exponencial como si se propagara a partir de $z = d$.

La ecuación (3) y la (4b) muestran que las ondas evanescentes se propagan con un decaimiento exponencial fuera del plano $z = d$. Las ondas evanescentes contienen información de alta resolución de las fuentes y no pueden ignorarse.

Invirtiendo la ecuación (3), se obtiene:

$$\hat{P}(k_x, k_y, d) = \hat{P}(k_x, k_y, h) e^{-ik_z(h-d)} \quad (5)$$

Calculando la transformada inversa de Fourier de (5) se llega a la ecuación (6) que es la base de NAH, y permite retropropagar la presión a partir de medidas en un plano (holograma) a un plano paralelo $z = d$.

$$p(x, y, d) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^2 \iint_{-\infty}^{\infty} P(k_x, k_y, h) x e^{-ik_z(z-d)} e^{ik_x x} e^{ik_y y} dk_x dk_y \quad (6)$$

Una vez determinada la presión, se puede determinar el vector velocidad a partir de la ley de Newton para fluidos:

$$\nabla p = i\omega \mathbf{r} v \quad (7)$$

Tomando la transformada de Fourier de la ecuación (7) se obtiene:

$$\hat{V}(k_x, k_y, d) = \frac{1}{i\omega \mathbf{r}} \left(k_x e_x + k_y e_y - i e_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \hat{P}(k_x, k_y, d) \quad (8)$$

donde $\hat{P}(k_x, k_y, d)$ se encuentra a partir de la ecuación (5). La componente normal de la velocidad se convierte en:

$$\hat{V}(k_x, k_y, d) = (1/i\omega \mathbf{r}) \hat{P}(k_x, k_y, z) \left(k_z e^{-ik_z(z-d)} \right) \quad (9)$$

La transformada inversa de la ecuación (8) proporciona el vector velocidad reconstruido. Si $z = d$ corresponde a la superficie de un radiador plano, entonces la componente normal $v_z(x, y, d)$ proporciona la amplitud y fase de esa superficie.

El método NAH requiere las siguientes consideraciones, [12]:

- El máximo número posible de micrófonos, ya que disminuye el tiempo y el error de medida.
- La presión debe aproximarse a cero en los límites del array de micrófonos para evitar errores en la resolución espacial con la FFT 2D, para ello resulta necesario extender la superficie de medida sobre la superficie a medir (L_x, L_y) al doble en cada dirección ($2L_x, 2L_y$).
- El espaciado entre micrófonos define la resolución de la fuente y está relacionado con la frecuencia máxima de interés. El máximo espaciado entre micrófonos debe ser menor o igual que $\frac{1}{2}$ longitud de onda de la frecuencia de interés más alta. La distancia entre el array de medida y la fuente debería ser de 1 ó 2 veces el espaciado mínimo de micrófonos.

$$\max(dx, dy) \leq I / 2, \quad \min(dx, dy) \leq d \leq 2 \min(dx, dy),$$

donde dx y dy son el espaciado entre micrófonos en dirección x e y respectivamente.

- El límite de frecuencia más bajo depende de las dimensiones del array

$$f_{\min} = c / I_{\max}, \quad I_{\max} = \max(L_x, L_y)$$

MÉTODO EXPERIMENTAL

Para la adquisición de medidas, se ha utilizado la configuración de la figura 2, en la que se puede observar una torre compuesta por un PC Pentium III, dos tarjetas de sonido profesionales, y un amplificador de 16 canales. Se dispone de cuatro micrófonos de $\frac{1}{4}$ " de alimentación por lazo de corriente, estos se introducen en una varilla agujereada cada 2.5 cm de forma que se tiene un array lineal de micrófonos.

El altavoz transparente de $20 \times 26 \text{ cm}^2$ se instaló en una caja de madera de $21 \times 28 \times 5 \text{ cm}^3$, en función de diferentes condiciones de sujeción, 4 lados y 3 lados sujetos, véase figura 3.

Para la grabación de las señales se ha utilizado un programa de grabación de audio multipistas. Se genera una señal conocida, en nuestro caso un seno puro a 1 kHz., y se capturan las 4 señales recibidas, y así sucesivamente se toman medidas cada 2.5 cm en x e y , moviendo el array lineal de micrófonos por toda la superficie a medir. Cada señal grabada se compara con la señal emitida y se calcula la diferencia de fase entre ellas, es decir, la señal emitida se utiliza como señal de referencia. El tiempo de medida es de 6 s y posteriormente las señales se recortan de 2 a 4 s, para evitar errores de principio y fin de grabación. Se consideró una distancia array-fuente de 3.5 cm. Se realizaron medidas para el doble de superficie del objeto, en total se realizaron 196 medidas, un array cuadrado de 14×14 medidas. También se realizaron medidas de un altavoz dinámico para comparar.



Figura 2. Montaje de medida de NAH



Figura 3. Altavoz de policarbonato y array de micrófonos

RESULTADOS

Se realizó un programa en MATLAB 6.1 que calculaba la velocidad V_z en la superficie de la fuente, a partir de los niveles de presión medidos en el holograma.

En la figura 4a se puede observar el valor absoluto de la presión en el holograma para el caso del altavoz pequeño, véase figura 4b.

En las figuras 5, 6 y 7, se observan las representaciones obtenidas en tres casos diferentes, el altavoz transparente con 4 sujeciones, el altavoz transparente con 3 sujeciones y el altavoz dinámico pequeño.

En las figuras 5a y 5b, se observa para cuatro lados una distribución uniforme de los niveles de presión, sin embargo en 3 lados también se produce una distribución uniforme de LP aunque con un mayor número de zonas con niveles altos y además también aparece un mayor número de zonas con niveles más bajos. Comparando estas dos figuras con el altavoz dinámico, se observa que en este último se concentra la radiación en una determinada zona central, y en el caso del altavoz transparente para 4 lados y 3 lados se ve, en general, una mayor uniformidad en la radiación, demostrando que se comporta según el principio de modos distribuidos, en el que cada punto radia con una intensidad y fase distintas pero generando, en conjunto, un campo difuso.

Si calculamos la varianza y la desviación típica de las figuras 5a y 5b, véase figuras 6a y 6b, se observa que la respuesta del altavoz plano parece más uniforme para 4 sujeciones que para tres. En las figuras 7a y 7b se representa Vz para 4 y 3 lados, observándose una distribución diferente de velocidades de 4 sujeciones a 3 sujeciones, y más uniforme respecto a la velocidad del altavoz dinámico.

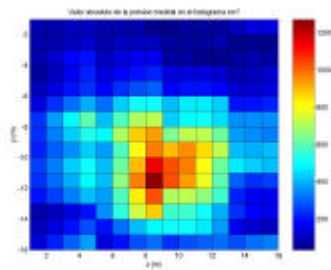


Figura 4a. LP para el altavoz pequeño a 1 kHz

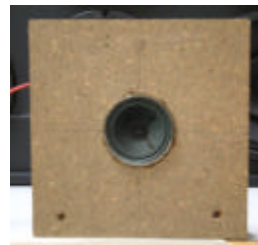


Figura 4b. Zona de medida para el altavoz pequeño

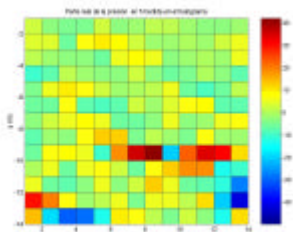


Figura 5a. Parte real P en holograma, altavoz polycarbonato con 4 lados, 1kHz

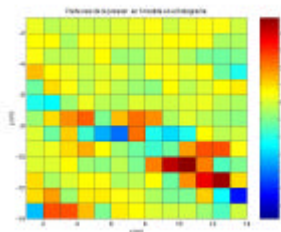


Figura 5b. Parte real P en holograma, altavoz polycarbonato con 3 lados, 1kHz

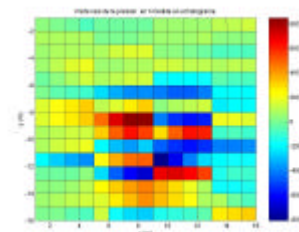


Figura 5c. Parte real P en holograma del altavoz pequeño, 1kHz

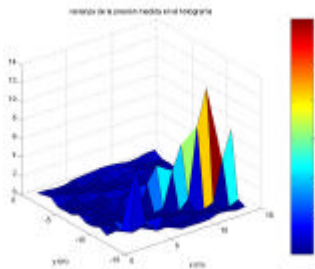


Figura 6a. Varianza de la figura 5a para 4 lados

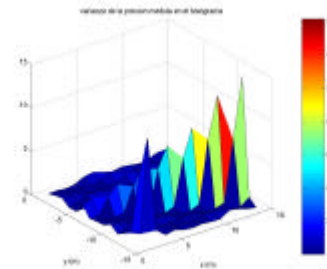


Figura 6b. Varianza de la figura 5b para 3 lados

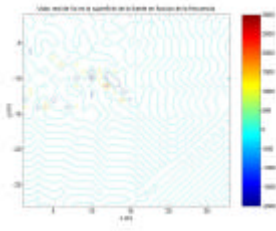


Figura 7a. Parte real Vz en la superficie de la fuente altavoz policarbonato para 4 lados, 1kHz

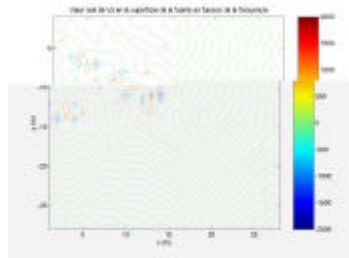


Figura 7b. Vz en la superficie de la fuente altavoz policarbonato para 3 lados, 1kHz

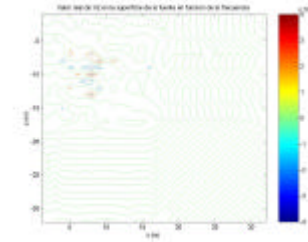


Figura 7c. Vz en la superficie de la fuente para altavoz pequeño, 1kHz

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El altavoz de policarbonato muestra un comportamiento que sigue el principio de modos distribuidos. Se aprecian diferencias notables en función de las condiciones de contorno (sujeción).

El campo sonoro de la superficie de policarbonato en el plano del holograma es más uniforme cuando se fija por cuatro lados.

El campo de velocidades de la superficie de policarbonato es más uniforme que el del altavoz dinámico.

Se pretende continuar estudiando la radiación del altavoz de policarbonato en función de diferentes espesores y tamaños de policarbonato, así como de diferentes condiciones de sujeción, modificando la posición del transductor electromecánico e incluso cambiando el tipo de transductor. Paralelamente, se quiere completar la técnica NAH con la técnica de elementos finitos.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra, Susan Declercq de la Universidad de Cincinnati por su apoyo.

REFERENCIAS

- [1] J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, "Nearfield acoustic holography: Theory of generalized holography and the development of NAH", *Journal of the Acoustical Society of America*, 78 (4), octubre 1985, 1395-1413
- [2] "Radiación acústica por superficies planas: aplicación a altavoces", Jesús Alba Fernández, Jaime Ramis Soriano, Víctor Espinosa Roselló, Víctor Sánchez Morcillo, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. ISSN: 0213-1315 (aceptado y pendiente de publicación)
- [3] "Caracterización de un altavoz de modos distribuidos", Juan Venero, Proyecto Final de Carrera, Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica Superior de Gandía, abril 2002
- [4] Escuder, E.; Alba, J.; Ramis, J., "Influencia de las condiciones de fijación en la radiación de un altavoz de modos distribuidos", *TECNIACÚSTICA* 2002
- [5] <http://213.86.36.8/nxtsound/technology/SoundVU/index.asp>
- [6] <http://www.designinsite.dk/htmsider/k0072.htm>
- [7] http://www.ammagazine.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP_Features_Item/0.2606.69429.00.html
- [8] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/2877205.stm>
- [9] "Transparent panel-form loudspeaker", patent US2002118847
- [10] "Mobile telephone with transparent loudspeaker panel", UK Patent Application GB 2330980 A
- [11] "Fourier Acoustics Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography", Earl G. Williams, Ed. Academic Press, 1999
- [12] "Practical Aspects of making NAH Measurements", S. M. Dumbacher and D. L. Brown, J. R. Blough, R. W. Bono.