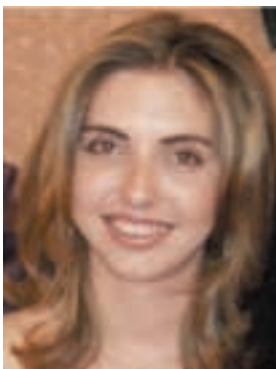


Análisis de la influencia de las condiciones de sujeción en la radiación de una superficie de policarbonato



Escuder, E. ; Hernández, F.; Ardid, M.; Martínez, J. M.; Picó, R. y Redondo, J.
Escuela Politécnica Superior de Gandía.
Universidad Politécnica de Valencia.
Carretera Nazaret-Oliva (S/N)
46730 Grao de Gandía
España
Tel: 96-2849300
Fax: 96-2849309
E-Mail: evescude@fis.upv.es

PACS: 43.38.-p

Resumen

En este artículo, se analizan la eficiencia de la radiación y las características de vibración de una superficie plana de policarbonato en función de distintas condiciones de sujeción. Esta superficie se utiliza como transductor mecánico-acústico, y es 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]. Se observa que, 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. La superficie de policarbonato es más uniforme cuando se fija por cuatro lados en lugar de tres.

Summary

In this paper, radiation efficiency and vibration characteristics of a polycarbonate flat surface used like a mechanic-acoustic transducer are analyzed depending of different conditions. The flat surface is excited with a electro-mechanic transducer of small dimensions. Pressure level measures are done at small distance of the source. The vibration

speed on the surface of the source is calculated by means of the technique called nearfield acoustical holography (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. The polycarbonate surface is more uniform when it is fixed for four sides instead of three.

1.Introduccion

1.1. Técnica NAH

La 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 mediante 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 denominada 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 el comportamiento de la fuente de sonido objeto.

1.2. 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.

2. 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, y el array de micrófonos en el plano del holograma $z=h$

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

donde $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (h-d)^2}$, $k = 2\pi/\lambda$, $h \geq d$, y la dependencia temporal $e^{-i\omega t}$ no se considera. En NAH plana, se mide $p(x, y, h)$ 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 $z=d$, invirtiendo la ecuación (1). Si z es una constante, entonces la ecuación (1) describe un producto de convolución entre la presión en el plano de la fuente y la función de Green, y puede invertirse mediante transformadas de Fourier, que se definen en dos dimensiones como:



Figura 1. Holograma y fuente

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

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

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

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:

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

Cualquier distribución de presión puede expresarse únicamente y completamente mediante una suma de ondas planas (4a) y evanescentes (4b). La transformada de Fourier, en la ecuación (2), representa una descomposición del campo sonoro



Figura 2. Montaje de medida de NAH



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 $z=d$.

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

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

$$\nabla p = i\omega\rho v \quad (7)$$

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

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

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:

$$\hat{V}(k_x, k_y, d) = (1/\omega\rho) \hat{P}(k_x, k_y, h) (k_z e^{-ik_z(h-d)}) \quad (9)$$

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 media 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.

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

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

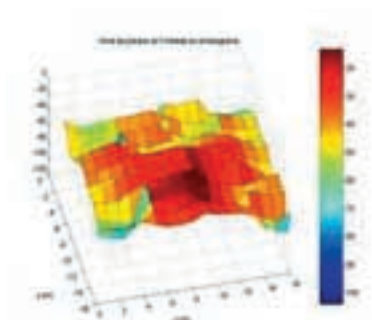


Figura 3a. SPL Caja acústica a 1kHz

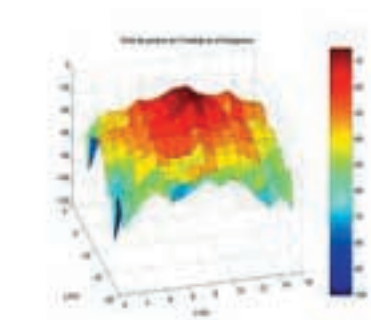


Figura 3b. SPL Caja acústica a 3kHz



Figura 3c. SPL Caja acústica

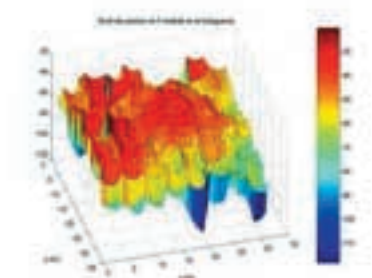


Figura 4a. SPL DML a 500 Hz

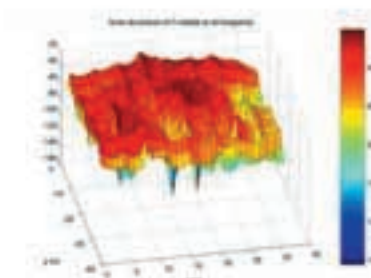


Figura 4b. SPL DML a 1kHz



Figura 4c. Altavoz DML

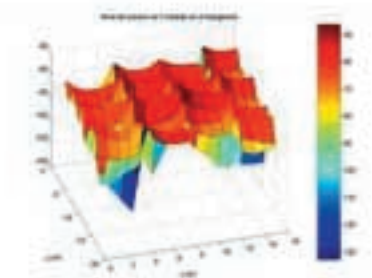


Figura 5a. SPL Policarbonato 500 Hz

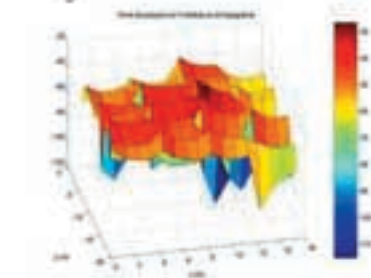


Figura 5b. SPL Policarbonato a 1kHz



Figura 5c. Altavoz policarbonato

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

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

3. Método experimental

Para la adquisición de medidas, se ha utilizado la configuración de la figura 2, en la que se puede observar la configuración técnica de medida, compuesta por un PC Pentium III, una tarjeta de sonido de cuatro canales de entrada y un acondicionador microfónico de 16 canales. Se dispone de cuatro micrófonos de alimentación por lazo de corriente con cápsula de 1/4", que se colocan en una varilla agujereada cada 2.5 cm. formando un array lineal de micrófonos. El altavoz transparente de 20x26 cm² se instaló en una caja de madera de 21x28x5 cm³, en función de diferentes condiciones de sujeción, 4 lados y 3 lados sujetos.

Para la grabación de las señales se ha utilizado un programa de grabación de audio multipistas. Se genera una señal conocida, en nuestro caso ruido blanco, 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 2 s y posteriormente las señales se recortan de 1 a 1.2 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 256 medidas, un array cuadrado de 16x16 medidas. También se realizaron medidas de una caja acústica y de un altavoz DML para comparar.

4. Resultados

Se realizó un programa en MATLAB 6.1 que calcula la velocidad Vz en la superficie de la fuente, a partir de

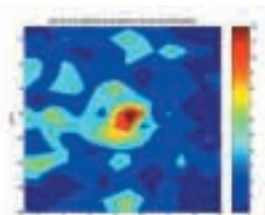


Figura 6a. Vz policarbonato con 4 sujeciones a 1 kHz

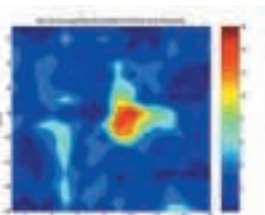


Figura 6b. Vz policarbonato con 3 sujeciones a 1 kHz

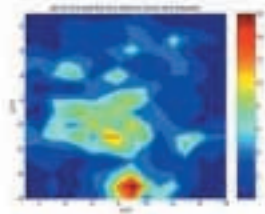


Figura 7a. Vz policarbonato con 4 sujeciones a 2 kHz

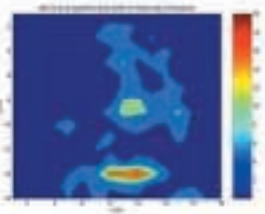


Figura 7b. Vz policarbonato con 3 sujeciones a 2 kHz

los niveles de presión sonora (SPL) medidos en el holograma.

En las figuras 3a a 5c, se representa el nivel de presión sonora en dB a 3.5 cm de la fuente para la caja acústica (figuras 3a a 3c), para el altavoz de modos distribuidos (figuras 4a a 4c) y para el altavoz de policarbonato (figuras 5a a 5c). Se observa que en el caso de la caja acústica la radiación está muy localizada. Comparando estas figuras con las del SPL del altavoz DML y del altavoz de policarbonato (figuras 4a a 5c), se observa que estos dos altavoces muestran el mismo comportamiento acústico, radian de forma uniforme en toda su superficie, verificándose el principio de modos distribuidos.

En las figuras 6a a 7b, se representa la componente normal de la velocidad, Vz, del altavoz de policarbonato considerando 4 y 3 sujeciones, para las frecuencias 1kHz y 2 kHz. Se aprecian las diferencias existentes entre las diferentes sujeciones. Se observa que a 1 kHz para 4 sujeciones la Vz tiene un comportamiento más uniforme que para 3 sujeciones. A 2 kHz se aprecia el mismo comportamiento.

5. Conclusiones y perspectivas

El altavoz de policarbonato muestra un comportamiento similar al del principio de modos distribuidos. El campo de velocidades de la superficie de policarbonato es más uniforme que el de una caja acústica. Se aprecian diferencias notables en función de las condiciones de sujeción, observándose que la superficie de policarbonato es más uniforme cuando se fija por 4 lados en lugar de 3.

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.

6. Agradecimientos

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

Este proyecto ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante el proyecto “Predicción del comportamiento acústico de elementos multicapa” con código MAT2003-04068.

7. 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. Volumen 19 (1), págs 65-74, 2003
- [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 GB2330980 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.