

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE SUJECCIÓN DEL PANEL VIBRANTE EN ALTAVOCES PLANOS MULTIEXCITADOS MAP

PACS: 43.38.Rh

Basilio Pueo¹; José Javier López²

¹Universidad de Alicante
Ctra. San Vicente, s/n
03690 Alicante, España
Tel: 965903400, Fax: 965903464
E-Mail: basilio@ua.es

²Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera, s/n
46022 Valencia, España
Tel: 963879714, Fax: 963879009
E-Mail: jjlopez@ocom.upv.es

ABSTRACT

Multiactuator Panels (MAPs) consist of a light and stiff flat panel to which several mechanical exciters are attached in order to create bending waves that are radiated as acoustic wave fields. MAPs are typically used as an alternative to traditional dynamic loudspeaker arrays for a surround sound technique known as Wave Field Synthesis (WFS) with distinct advantages, such as the low visual profile or omnidirectional acoustic radiation. However, the panel edge boundary conditions are of critical importance to acquire the desired sound field, as in the rest of transducing techniques. In this paper, the structural acoustic behavior of a MAP loudspeaker prototype is measured and simulated for two classical edge boundary conditions: free and clamped. Special attention has been made in the interaction between exciters sharing the same vibration surface and the role that their position would play in the sound-generating behavior of the panel for WFS applications.

RESUMEN

Los altavoces planos multiexcitados (Multiactuator Panels, MAP) son transductores formados por un panel ligero y rígido al que se le acoplan varios excitadores. Estos altavoces presentan ventajas cuando se utilizan como alternativa a los arrays de altavoces dinámicos tradicionales para la técnica de sonido espacial llamada Wave Field Synthesis (WFS). Sin embargo, las condiciones de contorno del panel son de vital importancia para sintetizar el campo sonoro deseado correctamente. En este trabajo, se simula y se mide el comportamiento acústico estructural de un prototipo de altavoz MAP para las condiciones de contorno clásicas de borde libre y sujeto. Los resultados muestran la interacción entre excitadores que comparten la misma superficie de vibración y el efecto de su posición relativa en el panel.

1. INTRODUCCIÓN

Wave Field Synthesis (WFS) es una técnica de sonido envolvente cuyo objetivo es la creación de un campo acústico preciso por medio de un conjunto de altavoces situados muy próximo entre sí [1], [2]. Cada altavoz contribuye a formar un frente de onda acústica que se percibe por la audiencia como si el sonido sintético fuera real. Los mejores resultados se logran cuando el área de escucha se rodea completamente de altavoces que crean una velocidad volumétrica proporcional a la componente normal de la velocidad de las partículas de la fuente de onda original. Durante los últimos años, se han utilizado diversos métodos de transducción en arrays de altavoces para crear sistemas WFS. En la práctica, hay dos tipos de arrays de altavoces: en primer lugar, los basados en la transducción dinámica, que han sido ampliamente descritos en la literatura técnica y son de uso común en los sistemas de audio. En segundo lugar, los altavoces planos de panel conocidos como altavoces de modos distribuidos (DML en inglés) [3], que permiten la creación de ondas mecánicas con excitadores acoplados. La radiación acústica de los paneles DML se produce por ondas de flexión que viajan a través de su superficie [4], [5].

Los altavoces planos multiexcitados (MAP en inglés) son un avance de la tecnología de modos distribuidos cuyo objetivo es su uso en aplicaciones de WFS [6]. Contrariamente a los DML, los MAP consisten en un conjunto de excitadores acoplados a una sola superficie vibrante. Los altavoces MAP tienen varias ventajas respecto a los arrays dinámicos: se pueden incorporar fácilmente en ambientes domésticos ya que su impacto visual es muy bajo y la vibración de la superficie es casi insignificante de modo que puede ser utilizado como una pantalla de proyección [7]. En una superficie vibrante compleja como panel de un MAP, las características intrínsecas de la radiación panel no deben deteriorar el campo de onda sintética generado con WFS. El panel del MAP vibra con un patrón complejo en toda su superficie debido a las excitaciones mecánicas simultáneas de sus transductores. Además, según la literatura de DML, existen algunos lugares específicos para excitar de manera eficiente un panel, sin embargo, los excitadores en un MAP no se encuentran en dichas posiciones óptimas, sino uniformemente distribuidos en una línea de acuerdo con los requisitos del algoritmo WFS [8]. Por otro lado, cada excitador en el panel debe generar una radiación puntual bien definida, actuando como un altavoz individual [9]. Además, en un array de altavoces MAP para extender el área de audiencia de WFS, los excitadores de borde en un panel se encuentran muy cerca de sus límites a fin de garantizar una distribución continua uniformemente espaciada de excitadores [10].

En este artículo, se estudia el impacto que las diferentes condiciones de contorno de borde tienen sobre el rendimiento estructural del panel mediante la observación de la velocidad superficial en toda la superficie de un prototipo de altavoz MAP. Para ello, se examina la vibración del panel con excitadores mecánicos situados en posiciones WFS con señales de audio bajo dos condiciones de contorno de borde con el mismo panel y estructura: condición de contorno libre y sujeta. Este último es un tipo de condición de borde que asegura robustez y que se ha utilizado como mecanismo de sujeción práctica en construcciones de MAP reales.

2. ALTAVOCES MAP PARA WAVE FIELD SYNTHESIS

Wave Field Synthesis (WFS) es una técnica de sonido espacial que utiliza un gran número de altavoces para generar una escena auditiva virtual sobre un área de escucha de gran tamaño. WFS supera algunas de las limitaciones de las técnicas de reproducción estereofónicas, tales como el punto óptimo de escucha o sweet point [11]. La base teórica de WFS fue primeramente formulada por Berkhout et al. en la Universidad Tecnológica de Delft hace casi 20 años [1], en el que se desarrolló WFS como una aplicación directa del principio de Huygens [12]. De acuerdo con esta teoría, con arrays de altavoces se pueden sintetizar frentes de onda acústicos dentro de un volumen arbitrario. Cada altavoz de la matriz actúa como una fuente secundaria y todo el sistema sintetiza un campo de onda creado por una o varias fuentes virtuales situadas detrás del array de altavoces. Según el Principio de Huygens, el campo

acústico dentro de un volumen sin fuentes puede calcularse si se conoce el campo de presión debido a las fuentes primarias en la superficie envolvente. A través de la integral de Kirchhoff-Helmholtz, las señales de excitación de los altavoces se ponderan y retrasan para poder sustituir la superficie arbitraria por una línea.

Sin embargo, la aplicación práctica de WFS es una tarea difícil. Existen algunos inconvenientes, tales como el gran número de altavoces necesarios y el alto coste computacional de la generación de una señal dedicada para cada uno de los altavoces. Sin embargo, este inconveniente puede resolverse en la actualidad debido a la tecnología que cambia rápidamente. Cuando se construye un sistema WFS, la forma más común es mediante el uso de altavoces dinámicos. Sin embargo, estos transductores muestran una desventaja clave, ya que necesitan una caja con un volumen moderadamente grande para evitar la rigidez de la suspensión adicional que disminuiría drásticamente la banda de baja frecuencia del altavoz. Además, el movimiento de pistón de sus diafragmas hace que se produzcan patrones lobulados acusados alrededor de su eje principal a altas frecuencias [13].

Debido a las limitaciones del uso de altavoces dinámicos en arrays para WFS, se planteó como objetivo encontrar alternativas que fueran omnidireccional en la medida de lo posible, de peso ligero y que pasaran desapercibidos montados sobre una pared. Por lo tanto, se investigó la aplicabilidad de los altavoces monoexcitados DML, que poseen estas ventajas, como sustitutos de los altavoces dinámicos en arrays WFS [6]. Un altavoz DML consiste básicamente en un panel delgado y rígido, que vibra con un patrón complejo por medio de un transductor electro-mecánico llamado excitador. Aunque los altavoces DML podrían usarse con éxito para WFS, el hecho de que sean paneles pequeños plantean algunos problemas con la calidad de sonido, ya que su respuesta de baja frecuencia es pobre debido a la falta de modos de baja frecuencia excitados. Por lo tanto, esta tecnología se aplicó a un panel grande con múltiples excitadores, cada uno gobernado mediante una señal diferente. Esta configuración más tarde fue nombrada como altavoz MAP para distinguirlos de los paneles de un solo excitador [9]. Un altavoz MAP actuaría como un array de WFS si cada excitador en el panel mueve sólo una pequeña parte del panel alrededor de su ubicación y, por lo tanto, cada excitador pueda recibir una señal diferente sin la interferencia de los excitadores adyacentes [14].

3. MONTAJE EXPERIMENTAL

Se construyó un prototipo de altavoz MAP de grandes dimensiones en el laboratorio con el objetivo de servir a la vez como un altavoz y como una pantalla de proyección. Las dimensiones del prototipo son similares a una pantalla de 100 pulgadas (244 x 122 cm) que permitieron distribuir un total de 13 excitadores espaciados 18 cm entre sí en el plano horizontal. Esta distribución facilita una emisión libre de errores por submuestreo espacial hasta aproximadamente una frecuencia de 1 kHz. El panel es un sándwich de 5 mm formado por un material termoplástico de revestimiento exterior y un interior de panel de policarbonato. La rigidez de flexión del panel es de 16,4 y 16 Nm en las direcciones x e y respectivamente y tiene una densidad de área de 0,89 kg/m². Los excitadores son transductores dinámicos de 25 mm de diámetro con un acoplamiento de panel de ocho pies. Se simuló dos formas diferentes de soportar el panel. Las placas rectangulares se clasifican de acuerdo con el tipo de soporte utilizado [15]. La condición ideal libre (F en inglés) implica que la estructura esté flotando en el aire, sin apoyo de ningún tipo. Para satisfacer esta condición, no deben surgir fuerzas de reacción a lo largo de los bordes. Por otro lado, la condición sujeta (C en inglés) se logra asentando la estructura a tierra con procedimientos mecánicos que eviten la deformación de la estructura en los apoyos. Las simulaciones se realizaron utilizando un software de elementos finitos para obtener la distribución del campo de velocidad sobre el panel de MAP. El análisis estructural experimental del panel se realizó mediante la medida de la superficie de la velocidad de respuesta del impulso transversal con un vibrómetro láser Doppler en una cuadrícula rectangular de 1 x 1 cm sobre áreas seleccionadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Interacción con los límites

Para las aplicaciones de WFS, es aconsejable que cada excitador cree un frente de onda bien definido, independientemente del comportamiento pseudo-aleatorio inicial de este tipo de transductores. Para evaluar el impacto que el tipo de condición de contorno de borde tiene en el comportamiento del altavoz, se llevaron a cabo una serie de medidas experimentales con vibrometría láser. El objetivo era mostrar las diferencias en la formación de pulso en función de la ubicación del excitador. Para ello, se midieron tres excitadores clave a 40 ms desde el inicio del pulso: excitador en el área central, lateral y de esquina, como se muestra en la Figura 1, en una cuadrícula con resolución espacial de 2 cm en ambas direcciones.

La Figura 1(a) representa el pulso en un área donde no hay bordes alrededor del excitador que puedan interactuar con la propagación de la onda. Por lo tanto, las ondas de flexión no experimentan ninguna perturbación al viajar a través del panel. En la Figura 1(b), se muestra el comportamiento de excitación cuando se sitúa el excitador cerca de un borde, ilustrado en la figura como una pared gris. Se observa una ligera reflexión en las proximidades del excitador, por lo tanto, la proximidad del límite juega un papel importante en la propagación de impulsos, como se esperaba. Por último, el comportamiento del mallado de esquina se representa en la Figura 1(c), con una resolución de cuadrícula de 1 cm para un análisis más detallado. Los límites en las direcciones horizontal y vertical se ilustran mediante dos paredes grises adyacentes a la posición del excitador. Este es el escenario menos recomendable para la WFS ya que el excitador vibra en un lugar del panel con poca libertad de movimiento por los la condición de contorno fija en dos direcciones de las cuatro direcciones. Por lo tanto, el pulso cerca de las fronteras ha cambiado su forma de esférica a lineal debido al efecto de la condición de contorno. Sin embargo, a pesar del efecto negativo en dos direcciones, la porción del pulso opuesto a los límites presenta la forma de onda esférica esperada.

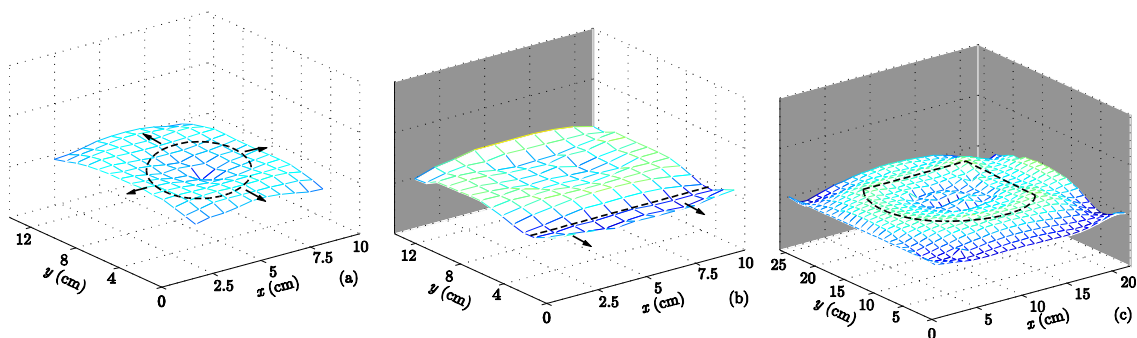


Fig. 1: Velocidades experimentales a 40 ms para un MAP de grandes dimensiones con condiciones de contorno de borde fijas, en tres lugares representativos: (a) centro, (b) lateral y (c) esquina.

4.2 Comportamiento de los excitadores

Los resultados anteriores indican que los límites juegan un papel importante en la formación del pulso propagado por el panel. En esta sección, se evalúa el requisito de que cada excitador se comporte como una fuente puntual para las distintas condiciones de contorno. Idealmente, la respuesta al impulso de la superficie del panel sobre el transductor tiene que ser lo más corta posible. Aunque la señal generada sobre el panel se transmite inevitablemente a lo largo de toda la superficie, los valores máximos se encuentran, en general, alrededor de la zona de excitación para los primeros instantes de tiempo. Por esta razón es importante que cada transductor excite una pequeña área alrededor de su posición durante los primeros instantes de tiempo, lugar en el que se transmiten los valores máximos de energía al panel. Para estudiar la interacción entre excitadores, y que la zona impulsada por ellos sea suficientemente pequeña como para considerarlos fuentes puntuales, se realizaron diversas simulaciones. La

Figura 2 muestra el comportamiento de los cinco excitadores centrales cuando son alimentados con señales iguales y en contrafase para crear una onda acústica.

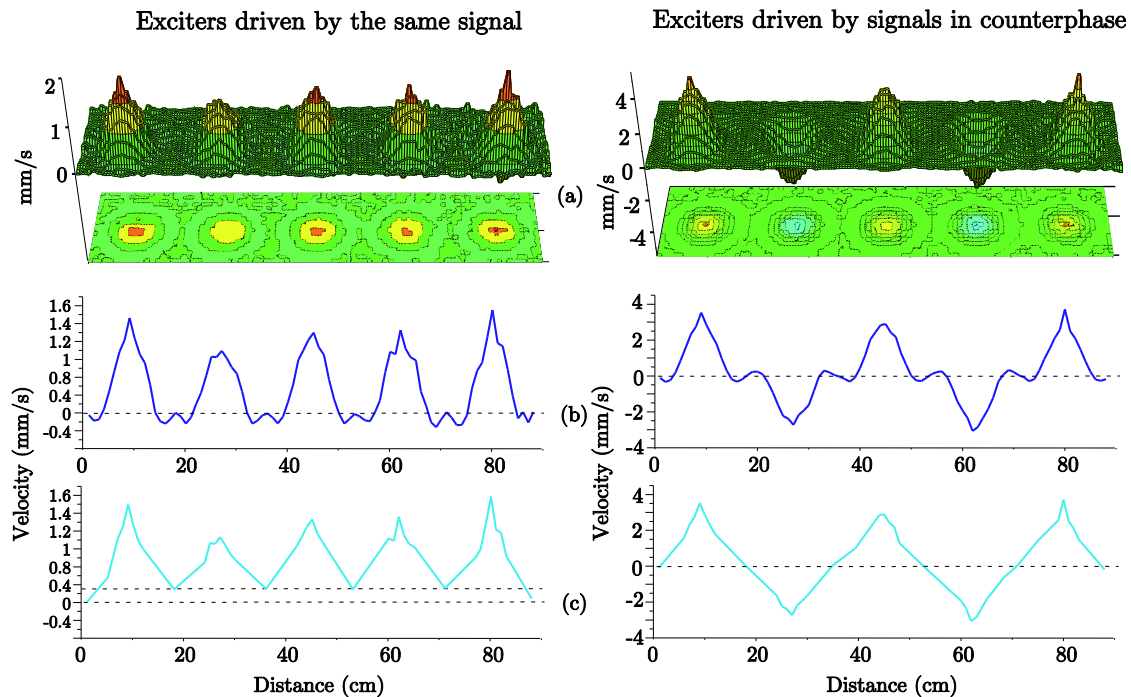


Fig. 2: Respuesta al impulso de velocidad del panel en $t=20$ ms de los cinco excitadores centrales (a) Captura de la respuesta, (b) Perfil para condición de contorno sujeto y (c) Perfil para condición de contorno libre.

Para el caso de los excitadores con la misma señal, la Figura 2(a) izquierda muestra gráficamente que cada excitador tiene su propia zona de excitación bien definida. Para este intervalo temporal, se pueden observar las regiones de velocidad máxima cuando la energía del pulso se propaga, así como las zonas en las que la velocidad no es significativa. Estas ubicaciones con baja velocidad establecen un valle entre las zonas de excitación y dado que tienen una extensión mínima a lo largo del eje horizontal, no se creará ninguna interacción entre los excitadores. En términos prácticos, se puede afirmar que los excitadores entregan la energía de la señal de reproducción al panel sin diafonía. Para ilustrar el comportamiento mencionado anteriormente, en las Figuras 2(b) y (c) izquierda se ha representado el perfil del panel para las configuraciones de condición de contorno sujeto y libre, respectivamente. Se puede observar que la condición de contorno libre muestra las áreas de excitación más grandes y por lo tanto la aparición de diafonía ya que los valles no llegan a alcanzar el valor de reposo.

El siguiente estudio aborda el peor escenario que puede ocurrir en WFS desde el punto de vista de contaminación cruzada entre excitadores y corresponde a la reproducción de una onda plana tangencial. Examinando el lado derecho de la Figura 2(a), se puede llegar a la misma conclusión que en el experimento anterior: para una distancia entre los excitadores de 18 cm, no se produce diafonía entre las señales de excitadores adyacentes. Una vez más, se pueden observar los valles entre áreas de excitación, como se muestra en la Figura 2(b). Sin embargo, para la condición de contorno libre, que se ilustra en la Figura 2(c), la diafonía no se observa como un valor mínimo por encima del valor de reposo, como el caso anterior, sino como una imposibilidad de la onda de presión de alcanzar rápidamente el valor de reposo, resultando en una disminución distendida que une los semiciclos positivos con los negativos.

4. CONCLUSIÓN

En este artículo, se ha presentado un estudio de simulación tanto de las repercusiones que las condiciones de contorno de borde tienen sobre el comportamiento estructural de los MAPs, así como la interacción entre excitadores adyacentes en un panel. Se ha experimentado mediante simulación y medida con dos configuraciones de contorno diferentes para un prototipo MAP construido en el laboratorio con el fin de analizar su comportamiento acústico para aplicaciones de WFS. Para la configuración libre, la energía en el panel, aplicada por los excitadores, se atenúa más lentamente que en cualquier otra configuración porque las ondas de flexión no encuentran apenas resistencia cuando viajan a través del panel. Tal configuración provoca que la velocidad en los bordes del panel alcance valores comparables a la de los puntos de excitación o incluso mayores. Por lo tanto, las áreas de contorno del panel actuarán como fuentes de sonido de baja frecuencia que interfieren significativamente con las señales procedentes de los excitadores. En consecuencia, la aplicabilidad de esta condición de contorno para la reproducción de WFS no es adecuada ya que la localización de las fuentes de sonido será parcialmente incorrecta.

Para la configuración de contorno sujeta, hay algunas áreas de paneles que alcanzan velocidades comparables a la del pulso principal, aunque este fenómeno se produce en una proporción mucho menor que para la configuración libre. Las principales causas de la disipación de energía son la colisión con los bordes del panel y la cancelación resultante entre ondas reflejadas. Los valores de velocidad experimentales, medidos con vibrometría láser Doppler, demuestran que las velocidades máximas se originaron alrededor de la localización del excitador para las tres zonas bajo prueba. Para las zonas laterales y de esquina, todas las reflexiones debidas a la proximidad con los bordes son de muy poca intensidad en comparación con el pulso inicial. Por lo tanto, la condición de contorno ajustada, aplicada a este altavoz MAP, permite que cada excitador pueda mover un área pequeña alrededor de su ubicación durante los primeros milisegundos de tiempo con una señal determinista proporcionada por la aplicación de WFS. En este caso, se puede afirmar que el altavoz MAP se comporta como un array de fuentes puntuales independientes, requisito necesario para una reproducción correcta de WFS.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo el Proyecto TEC2012-37945-C02-01 y por Fondos FEDER.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Berkhout, "A holographic approach to acoustic control," J. Audio Eng. Soc., vol. 36, no. 12, pp. 977-995, Dec. 1988.
- [2] A. Berkhout, P. Vogel, and D. de Vries, "Use of Wave Field Synthesis for natural reinforced sound," in 92th Conv. Audio Eng. Soc., no. 3299, Wien, Austria, Mar. 1992.
- [3] N. Harris and M. O. Hawksford, "The distributed-mode loudspeaker (DML) as a broad-band acoustic radiator," in 103rd Conv. Audio Eng. Soc., no. 4526, New York, USA, Sep. 1997.
- [4] J. A. Angus, "Distributed mode loudspeaker radiation mechanisms," in 108th Conv. Audio Eng. Soc., no. 5164, Paris, France, Sep. 2000.
- [5] J. A. Angus, "Distributed mode loudspeaker resonance structures," in 109th Conv. Audio Eng. Soc., no. 5217, Los Angeles, USA, Sep. 2000.
- [6] M. Boone and W. de Bruijn, "On the applicability of distributed mode loudspeaker panels for Wave Field Synthesis based sound reproduction," in 108th Conv. Audio Eng. Soc., Paris, France, Feb. 2000.
- [7] W. de Bruijn and M. Boone, "Application of Wave Field Synthesis in life-size videoconferencing," in 114th Conv. Audio Eng. Soc., no. 5801, Amsterdam, The Netherlands, Mar. 2003.

- [8] B. Pueo, "Analysis and enhancements of multiactuator panels for wave field synthesis reproduction," Ph.D. dissertation, Technical University of Valencia, Spain, 2008.
- [9] M. Boone, "Multi-actuator panels (MAPs) as loudspeaker arrays for Wave Field Synthesis," J. Audio Eng. Soc., vol. 52, no. 7-8, pp. 712-723, Jul. 2004.
- [10] J. van Dorp and D. de Vries, "Wave field synthesis using multi-actuator panel: Further steps to optimal performance," in Proceedings of the AES 28th Int. Conf. on Multichannel Audio, Pitea, Sweden, Jun. 2006.
- [11] G. Thiele, H. Wittek, and M. Reisinger, "Potential Wave field Synthesis applications in the multichannel stereophonic world," in Proceedings of the AES 24th Int. Conf. on Multichannel Audio, Banf, Canada, Jun. 2003.
- [12] S. Spors, R. Rabenstein, and J. Ahrens, "The theory of Wave Field Synthesis revisited," in 124th Conv. Audio Eng. Soc., no. 7358, Amsterdam, The Netherlands, May 2008.
- [13] L. L. Beranek, Acoustics. McGraw-Hill, 1954.
- [14] M. Kuster, D. de Vries, D. Beer, and S. Brix, "Structural and acoustic analysis of multiactuator panels," J. Audio Eng. Soc., vol. 54, no. 11, pp. 1065-1076, Nov. 2006.
- [15] S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, Theory of Plates and Shells, 2nd ed. Mc Graw Hill, 1959.