

ESTUDIO DE MÉTODOS DE CÁLCULO DE RETARDO EN AGRUPACIONES DE ALTAVOCES PARA APUNTAMIENTO ELECTRÓNICO DEL FRENTE DE ONDAS

Lorente, Bosco^{1,2}; Castells, Francisco³; Picó, Rubén⁴

¹Universitat Politècnica de València; ²Fagot S.L
{jbolofe@upv.es}

³Instituto ITACA – Universitat Politècnica de València
{fcastells@eln.upv.es}

⁴Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras – Universitat Politècnica de València
{rpico@fis.upv.es}

Resumen

La variación del apuntamiento del frente de ondas para agrupaciones de fuentes sonoras dispuestas en columna recta es una técnica cada vez más utilizada para el refuerzo sonoro en recintos con dificultades para garantizar la inteligibilidad de la palabra. Para la implementación de esta técnica, conocida como apuntamiento electrónico es necesario aplicar, mediante procesado digital de audio, un retardo diferente a cada una de las fuentes que componen la columna. En este trabajo se exploran los efectos en la radiación de una agrupación de fuentes sonoras con distintos métodos en el cálculo del retardo, incluyendo dos configuraciones propuestas por Olson y Meyer, que determinan la posición de las fuentes virtuales a partir de proyecciones geométricas, así como una configuración intermedia. La solución de Olson, basada en la proyección horizontal al eje virtual de la agrupación (seno del ángulo de apuntamiento) da lugar a una distancia entre fuentes virtuales menor que entre las fuentes físicas y proporciona una gran precisión en el apuntamiento del ángulo del lóbulo principal. Por otro lado, en la solución basada en la tangente del ángulo de apuntamiento, con una distancia entre fuentes virtuales superior a la distancia física, se produce una desviación en el apuntamiento del lóbulo principal que depende de la magnitud del ángulo. Por último, se analiza un tercer método propuesto por los autores en el que la distancia entre las fuentes virtuales es idéntica a la distancia física. Los resultados de simulación muestran que la solución de Olson es la correcta y la que obtiene un apuntamiento electrónico más preciso.

Palabras clave: apuntamiento, retardo, columna, arreglo, lineal.

Abstract

The variation of the wavefront steering of groups of sound sources arranged in straight column is an increasingly used technique for sound reinforcement applications in rooms with speech intelligibility difficulties. This technique, named electronic steering, needs a digital audio processing implementation, using a different delay to each source. This paper explores the effects on radiation of coupled sound sources with different methods of delay calculation, including two configurations introduced by Olson and Meyer, which determine the position of virtual sources from geometric projections. Olson's solution,

based on the horizontal projection to virtual cluster axis (sine of steering angle), results in a distance between virtual sources shorter than between the physical sources and provides optimal precision at main lobe steering angle. On the other hand, the solution based on the distance between virtual sources greater than the physical distance (tangent of steering angle); there is a deviation in the main lobe that depends on the magnitude of the angle. Finally, a third method proposed by the authors is analyzed. At this method, the distance between the virtual sources is identical to the physical distance. The simulation results show that Olson's solution is correct and gives optimal electronic steering precision.

Keywords: steering, delay, column, array, line.

PACS n°. 43.38.Tj

1 Introducción

Un arreglo lineal o columna de sonorización es una fuente sonora constituida por una disposición de fuentes discretas a lo largo de una línea [1]. Su desarrollo surge por la necesidad de realizar la emisión de la energía acústica en beneficio de la inteligibilidad de la palabra y de una mayor área de cobertura en diversas aplicaciones de sonorización. Estos sistemas permiten confinar la radiación acústica en un ángulo de cobertura reducido y para un determinado ancho de banda. De esta forma, se mejora notablemente la relación de sonido directo en detrimento del aportado al campo de presión reverberante. La aparición hace varias décadas de sistemas de procesado digital y la posibilidad de aplicarse independientemente a cada una de las fuentes discretas que conforman la agrupación, genera un abanico de posibilidades en beneficio del control de la dispersión en el mayor ancho de banda posible. Así pues, una de las posibilidades que se abre, es la técnica del apuntamiento electrónico [4], ampliamente utilizada en aplicaciones de sonorización de recintos excesivamente reverberantes y donde garantizar la inteligibilidad de la palabra es crucial [6]. La utilización de esta técnica en sistemas electroacústicos de sonorización ofrece ventajas respecto al uso del apuntamiento mecánico [4], tales como la precisión de la directividad, la flexibilidad para la instalación o el aprovechamiento de la radiación trasera del sistema. A pesar de que este concepto se introdujo hace varias décadas y que su uso en instalaciones para audiencias masivas está considerablemente extendido, existen distintas variantes en su forma de implementación y aplicación. Este trabajo pretende, a partir de la simulación numérica, determinar qué método de cálculo es el más apropiado para la aplicación de esta técnica y estudiar sus efectos en el medio.

2 Metodología

2.1 El apuntamiento electrónico

La técnica del apuntamiento electrónico se basa en modificar la dirección del lóbulo principal, aprovechando el procesado digital masivo multicanal [4] mediante la inclusión de sucesivos retardos que siguen una progresión lineal (Figura 1). La finalidad consiste en hacer llegar la superposición constructiva o eficaz de las fuentes discretas con una variación modificable del ángulo respecto a la normal, es decir, respecto al lóbulo generado por la columna sin ningún procesado. El cálculo de este retardo se realiza mediante un algoritmo sencillo y de bajo coste computacional. El objeto de este estudio es, el análisis y valoración de los distintos métodos de este cálculo.

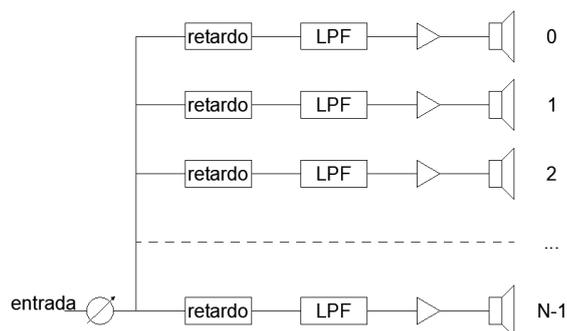


Figura 1 – Esquema de columna de sonorización con procesamiento digital para cada fuente discreta.

El apuntamiento electrónico ofrece una alta precisión en la directividad del lóbulo principal del sistema, y es una excelente solución comparado con una columna de sonorización que carece de procesamiento digital, donde el apuntamiento se realiza de forma mecánica, es decir, mediante el movimiento inclinado de toda la columna (Figura 2a). En el apuntamiento electrónico la energía sonora asociada a la reflexión posterior es también controlada y emitida en la misma dirección que el lóbulo principal (Figura 2b). Esta solución, al ser colocado el sistema a escasa distancia de un cerramiento, además de resultar estéticamente más favorable, ofrece el aprovechamiento de la radiación posterior y su suma constructiva al lóbulo principal, en lugar de obtener una reflexión no deseada hacia cerramientos superiores. Esto contribuye en gran medida a mejorar la relación campo directo/campo reverberado y, por consiguiente, a la mejora de la inteligibilidad.

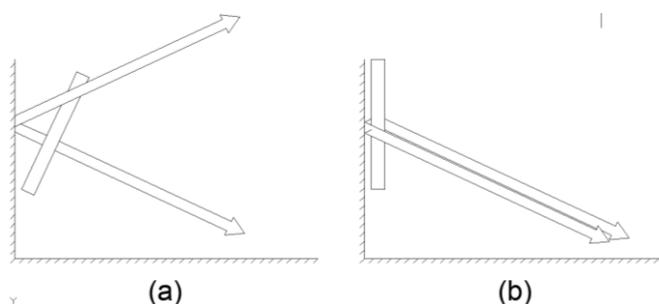


Figura 2 – (a) Apuntamiento mecánico; (b) Apuntamiento electrónico.

Mediante el uso de procesamiento digital masivo, se pueden utilizar técnicas como el tapering frecuencial y/o de magnitud [4], para conseguir el máximo ancho de banda con directividad controlada (mediante la inclusión de filtrado paso-bajo). También se consigue, en gran medida, la minimización de lóbulos secundarios que pueden dar lugar a problemas de contribución excesiva del campo reverberante.

Además, cabe la posibilidad de modificar la respuesta en magnitud y fase de cada una de las fuentes discretas a partir de una única función de transferencia finita al impulso (en inglés FIR: Finite Impulse Response). Así, se consigue modelar todo el procesamiento necesario en un solo filtro y agrupar todas las técnicas comentadas [3]. Esta técnica permite obtener apuntamientos electrónicos de ángulos muy pequeños, que con retardo de resolución puntual no es posible alcanzar, debido a la resolución de las unidades de retardo.

2.2 Métodos de cálculo de retardo

La dirección del apuntamiento de un sistema de columna recta es modificada introduciendo un patrón de retardos temporales a cada uno de los elementos que componen la columna. En la Figura 3 se muestra de forma esquemática la representación de las fuentes virtuales y las físicas correspondientes a los tres sistemas de apuntamiento analizados en este trabajo. Este concepto (Fig. 3a), fue introducido por H.F Olson [1] hace 8 décadas. El método utilizado afirma que el frente de ondas se emitirá con dirección normal a la columna virtual resultante de la rotación α .

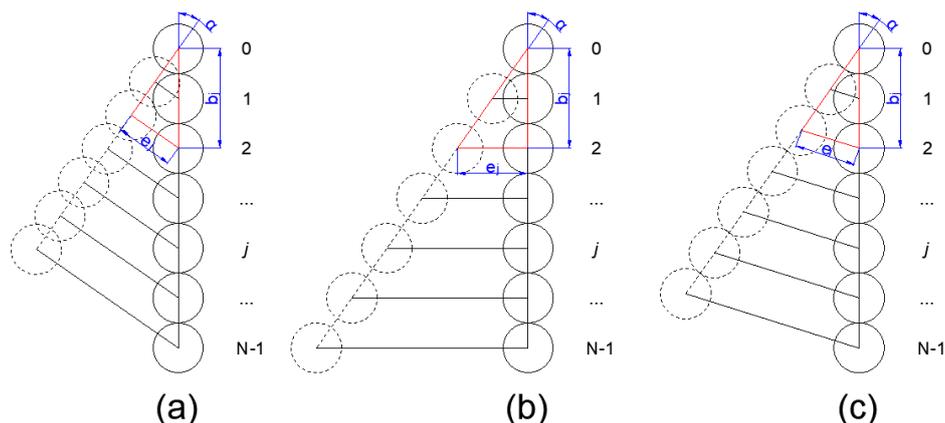


Figura 3 – (a) Espaciamiento normal a la columna virtual; (b) Espaciamiento normal a la columna física; (c) Espaciamiento resultante de la rotación virtual de la columna física

La distancia entre la fuente virtual y la correspondiente fuente física se puede terminar como:

$$e_j = \sin(\alpha) b_j \quad , \quad (1)$$

donde b_j es la distancia entre los respectivos centros de la fuente 0 y la fuente j , α es el ángulo de apuntamiento deseado del lóbulo principal

Resultando el retardo temporal aplicable a cada fuente j ,

$$\delta_j = \frac{\sin(\alpha) b_j}{c} \quad , \quad (2)$$

siendo c es la velocidad del sonido (m/s).

Otro método, utilizado por Meyer [2], encuentra referencias a que la distancia que se debe tomar, y, por tanto, el retardo resultante, es normal al frente de onda de la columna recta física (ver Fig.3b). La expresión para calcular el retardo de cada fuente es

$$\delta_j = \frac{\tan(\alpha) b_j}{c} \quad . \quad (3)$$

El tercer apuntamiento, propuesto por los autores en este trabajo resulta de tomar las distancias entre centros de la fuente sonora y su fuente virtual al rotar los elementos de la columna α grados tomando como punto de referencia el centro de la fuente $j = 0$ (ver Fig. 3c). El retardo resultante para aplicar en este caso es

$$\delta_j = \frac{\sin(\alpha) b_j}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)c} \quad (4)$$

2.3 Simulación numérica

Para la comprobación de los métodos descritos, se ha simulado numéricamente el campo de presión sonora correspondientes a los tres apuntamientos. Para ello se ha utilizado MATLAB, haciéndose servir su función de mapeado para obtener el comportamiento directivo del sistema en el medio a partir de los niveles de presión sonora en cada punto. Para la representación del mapa de presión, se superponen la contribución de cada fuente normalizada con el retardo correspondiente, resultando los siguientes valores de nivel de presión sonora.

$$NPS_{x,y} = 20 \log \left| \sum_{j=0}^{N-1} \frac{1}{r_j - r_{x,y}} e^{-ik(r_j - r_{x,y})} e^{-i\omega\delta_j} \right| \quad (5)$$

donde $NPS_{x,y}$ es el nivel de presión sonora para cada punto (x,y) del mapa de presión, N es el número de fuentes discretas que componen la columna, $r_j - r_{x,y}$ es la distancia en metros entre la fuente j y cada punto (x,y) y k es el número de onda.

El espaciamiento entre fuentes utilizado es de $b_l = 0.07$ m, equivalente a un transductor dinámico de pequeño diámetro, con el cual se consigue un buen ancho de banda dada la aplicación, y una buena respuesta directiva al conseguir reducir considerablemente el factor ka . Asimismo, un distanciamiento entre fuentes reducido favorece la superposición constructiva en las frecuencias más altas (hasta $2\lambda/3$). Por simplicidad, se han utilizado fuentes omnidireccionales, en concreto 20 unidades dispuestas en línea recta, con una altura de columna (H) de 1.47 m. La frecuencia a la que se realiza la simulación es 2kHz, correspondiente a aproximadamente 2.5 fuentes discretas por longitud de onda (λ). Se implementa un apuntamiento electrónico de $\alpha = 30^\circ$ procesando cada una de las fuentes y aplicando los tres distintos métodos de apuntamiento.

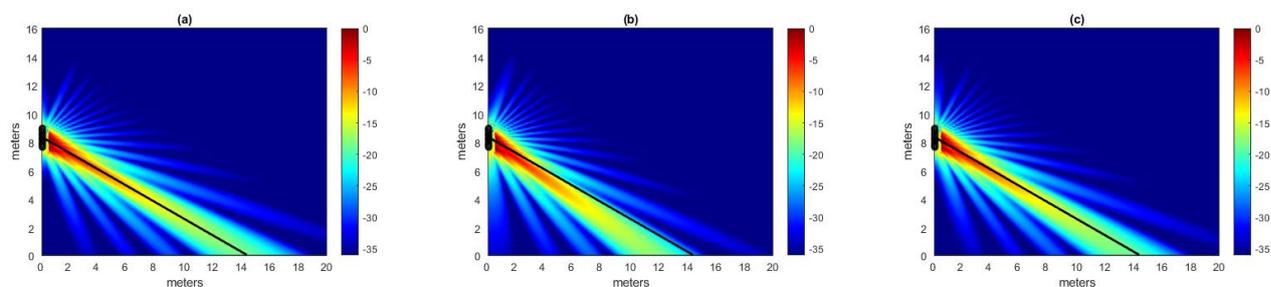


Figura 4 – (a) Espaciamiento normal a la columna virtual; (b) Espaciamiento normal a la columna física; (c) Espaciamiento resultante de la rotación virtual de la columna física

A partir de los resultados, se puede cuantificar la desviación en grados que, respecto al ángulo de apuntamiento deseado, experimentan cada uno de los métodos de cálculo (Fig. 5). Los resultados se muestran con una resolución de $\pm 1^\circ$.

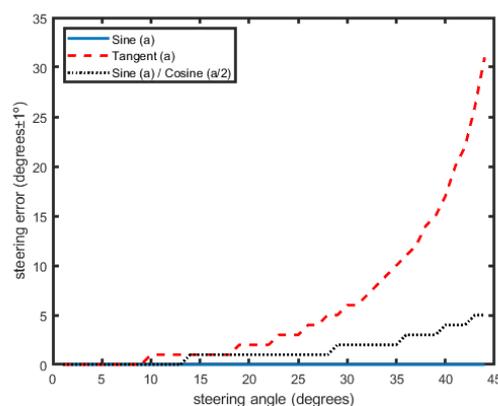


Figura 5 – Error de apuntamiento de cada uno de los métodos de cálculo respecto al ángulo de apuntamiento (α)

Los resultados muestran que el apuntamiento más exacto corresponde al método de cálculo (a) (Fig. 5, en azul continuo) inferiores a la precisión del método de simulación. En el segundo caso (b) (Fig. 5, en línea roja discontinua), la desviación es muy significativa y se incrementa significativamente en ángulos de apuntamiento superiores a 15° . El método (c) (Fig. 5, en línea de puntos negra) no tiene errores muy pronunciados (1° cuando $\alpha = 28^\circ$), pero, en cualquier caso, superiores al del método (a) que utiliza la función seno para su implementación.

Para favorecer la comparación de los distintos métodos, se han implementado también los distintos niveles de presión normalizados en representación polar, facilitando el análisis los errores en el apuntamiento (ver Fig. 6).

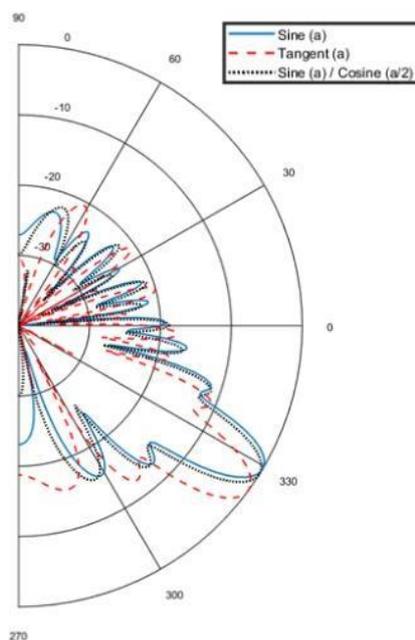


Figura 6 – Comparación de los métodos de apuntamiento en representación polar a una frecuencia de 2 kHz

La visualización del nivel de presión sonora del array con los tres apuntamientos en formato polar, es consistente con los resultados del análisis de mapeado de presión sonora mostrados en la Fig. 4. Se observa además con claridad, la distribución de los lóbulos secundarios, que son, en todos los casos, cercanos o inferiores a 20 dB respecto al lóbulo principal (Fig. 6).

2.4 Efecto de la temperatura en el apuntamiento

Las variaciones en el medio pueden afectar a la velocidad del sonido, implicada en el cálculo del array de retardos. Si el sistema es ajustado introduciendo unas condiciones atmosféricas y, en el transcurso del tiempo, estas condiciones cambian significativamente, se produce una desviación en el apuntamiento eficaz. El ángulo de desviación que se obtiene es de $+2^\circ$ en diferencias de $+25^\circ\text{C}$ de temperatura (Fig. 7).

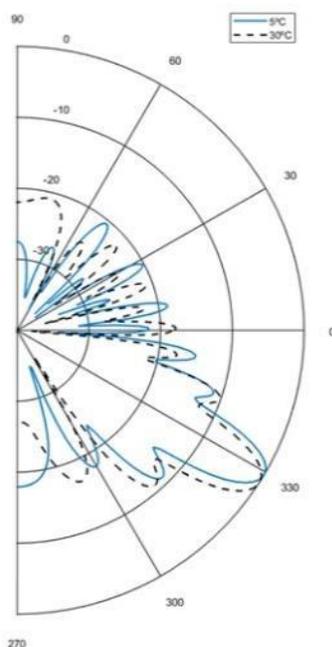


Figura 7 – (a) Sistema ajustado en condiciones atmosféricas de 5°C (b) Sistema con el mismo ajuste, pero funcionando en condiciones atmosféricas de 30°C .

3 Conclusiones

En este trabajo se analiza la radiación sonora de una columna de sonorización con tres apuntamientos electrónicos distintos. Los resultados de la simulación numérica se basan en la superposición de los campos de presión emitidos por las fuentes virtuales discretas al medio. Se muestra que el método propuesto por Olson es el que presenta un apuntamiento del haz completamente preciso, independientemente de la frecuencia y el ángulo de apuntamiento deseado. Por otro lado, el apuntamiento del haz mediante el método de Meyer presenta ciertas desviaciones que son especialmente significativas en ángulos de apuntamiento altos, a partir de 22° . Por tanto, carece de utilidad implementar los métodos (b) y (c), puesto que presentan importantes desventajas en términos de precisión de

apuntamiento y de coste computacional en el caso (c) y se comprueba que el método de cálculo más eficiente para aplicar apuntamiento electrónico es el propuesto por Olson y que se basa en el espaciado normal a la columna virtual. El apuntamiento electrónico no es un método que se utiliza únicamente en condiciones de sonorización de espacios reverberantes. Existen múltiples y diversas aplicaciones donde este paradigma puede ser utilizado, y en todos los casos, este trabajo puede resultar de utilidad cuando se plantee qué método de cálculo utilizar para su implementación [7].

Se muestra que es importante tener en cuenta las variaciones atmosféricas que pudieran existir y cómo afectan al medio de propagación del sonido. A menudo, las agrupaciones de altavoces son sistemas ajustados en el momento de la instalación y es probable que se vean expuestos a los cambios derivados de la climatología o incluso de la intemperie. Cuando las diferencias entre la temperatura son significativas respecto a la temperatura a la cual se ajustó el sistema, existen errores en el ángulo de apuntamiento que, aunque no demasiado representativos, pueden ser minimizados o corregidos tomando valores previstos de temperatura o incluyendo en el sistema procedimientos de autoajuste función de la temperatura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en la Escola Politècnica Superior de Gandia y es parte del proyecto enmarcado dentro del Doctorado Industrial fruto del convenio de colaboración entre la Universitat Politècnica de València y Fagot S.L. Ha sido cofinanciado por la Agencia Valenciana de la Innovación, en la convocatoria Promoción del talento: Agentes de innovación, incorporación de investigadores y tecnólogos para proyectos de innovación en empresas y doctorandos empresariales, en su línea 3, doctorandos y doctorandas empresariales (Innodocto).

Referencias

- [1] Olson, Harry F. *Elements of Acoustical Engineering*, D.Van Nostrand Company, Princeton (New Jersey),1947, p.37.
- [2] Meyer, David G., Multiple Beam, Electronically Steered Line-Source Arrays for Sound-Reinforcement Applications, *Journal of Audio Engineering Society*, 1993.
- [3] Karjalainen, Matti; Paatero, Tuomas; Pakarinen, Jyri; Välimäki, Vesa. Special Digital Filters for Audio Reproduction. *32nd International Conference: DSP For Loudspeakers*, 2007
- [4] Nicolau, U.; *La diffusione sonora in ambienti acusticamente difficili*; Ed. Il Rostro, 2002.
- [5] Davis, Don; Davis, Carol. *Sound system engineering*, Focal Press, 2006.
- [6] R.A Metkemeijer; J.v.d Werff. Desing of Sound Systems with the lowest Signal to Noise Ratio without Sacrificing Intelligibility, *86th AES Convention*, Hamburg, 1989.
- [7] Nakagawa, Kyosuke; Shi, Chuang; Kajikawa, Yoshinobu. Beam Steering of Portable Parametric Array Loudspeaker, *Annual Summit and Conference of the Asia-Pacific-Signal-and-Information-Processing-Association*, 2019