

Control de la directividad en arrays lineales de altavoces

Basilio Pueo, José Escolano, Máximo Cobos
Dpto Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal
Universidad de Alicante
e-mail: basilio@dfists.ua.es

Abstract—Precision directivity in loudspeaker systems is a desired feature of many sound reinforcement applications. Synthesis of linear acoustical arrays of desired directional pattern is considered by using the standard antenna array theory. Starting by the sound pressure emitted by a single dynamic loudspeaker, an array factor is obtained. Then, a multiple driver array is constructed and measured to demonstrate the benefits in the control of directivity over a large bandwidth. Uniform and phased distributions are considered by adjusting the individual volume velocities of each speaker.

I. INTRODUCCIÓN

La teoría acerca del diseño de agrupaciones de antenas y sus ventajas está ampliamente estudiada. Existen métodos muy consolidados para conseguir diagramas de directividad específicos que se basan en la interferencia de los campos electromagnéticos radiados por distintas antenas alimentadas con una amplitud y una fase determinada. Por esta razón, es posible diseñar sistemas de telecomunicación con etapas de emisión y recepción capaces de admitir y rechazar las radiaciones provenientes de cualquier dirección del espacio.

En el campo de la electroacústica, donde se tienen radiadores sonoros en lugar de radiadores electromagnéticos, también se conocen las ventajas que se pueden obtener de la agrupación de varias fuentes. Una de ellas es el incremento uniforme de los niveles de presión en la zona de audiencia para conseguir una caída en campo cercano de 3 dB con el doble de la distancia, lo cual es una propiedad de las fuentes cilíndricas. La otra ventaja principal está en las propiedades directivas del conjunto, tal como ocurre en teoría electromagnética. Sin embargo, no existe un método de diseño tan claro y sistemático para este tipo de arrays como el utilizado en el caso de radiadores electromagnéticos. En consecuencia, en este trabajo se realiza un estudio sobre arrays de altavoces tomando como base la teoría de agrupaciones de antenas para, posteriormente, obtener un método de diseño eficiente análogo en fuentes sonoras.

II. DESARROLLO

Los estudios de arrays de antenas parten de una agrupación de N antenas iguales, equiespaciadas una distancia d sobre el eje z . El campo eléctrico radiado por una cualquiera de las antenas viene dado por:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r})e^{-jk r_n}, \quad (1)$$

expresión que se interpreta como el campo vector radiado por la antena básica, $\vec{E}_0(\vec{r})$ ponderado por el factor de propagación de ondas $e^{-jk r_n}$. Si la antena sufriera un desplazamiento \vec{r}_0 , dicho factor de propagación pasaría a ser $e^{-jk(r_n - r_0)}$. En condiciones de campo lejano, la n -ésima antena sufre un desfase $nkd \cos \theta$ respecto a la antena que se toma como referencia. Si además, las alimentaciones poseen desfase progresivo α , la expresión final del vector campo eléctrico radiado por toda la agrupación viene dado por:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi}, \quad (2)$$

donde $\psi = kd \cos \theta + \alpha$ es el ángulo eléctrico, que representa la diferencia de fase entre las contribuciones en campo lejano de dos antenas consecutivas [1].

La importancia de esta expresión radica en que el diagrama de radiación del conjunto depende por separado de la antena básica y de un factor resultado de la separación entre elementos, de la alimentación y de la frecuencia de trabajo. Este último factor, llamado *Factor de Array* (FA) (ecuación 3), es la clave para el diseño de diagramas de radiación de agrupaciones de antenas y se puede interpretar como la transformada de Fourier de la secuencia discreta de los coeficientes de la alimentación relativa $a_n = I_n/I_0$,

$$\text{FA} = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi}. \quad (3)$$

Las propiedades del factor de array determinan el margen visible de la agrupación, que se corresponde directamente con el diagrama polar de radiación. La variación de las características de fase y amplitud con la que se alimenta a cada antena permite modificar tal margen visible y en consecuencia, las características directivas del conjunto, objeto del presente estudio.

En el caso de la ingeniería acústica, la presión sonora para una fuente puntual viene dada, en primera aproximación, por

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)}. \quad (4)$$

En lo sucesivo, se omitirá la variación temporal por simplicidad. Para N fuentes puntuales, equiespaciadas d a lo largo del eje z , la expresión del campo sonoro total viene dada por:

$$p(r, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} p_n = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_n}{r_n} e^{-jk r_n} \quad (5)$$

En una agrupación de fuentes sonoras, un observador se encuentra en campo lejano cuando está alejado de cada fuente una distancia mayor que $(2N^2 d^2)/\lambda$. Bajo esta condición, se pueden introducir dos aproximaciones: por un lado, las distancias entre cada fuente y el observador r_n se aproxima al valor medio de las mismas r ; por otro lado, la fase $r_n - r_0$ se aproxima simplemente a $nd \cos \theta$.

Así pues, la presión del campo total que crea un array de fuentes viene determinada por:

$$\begin{aligned} p(r, \theta) &= \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A_n}{r_n} e^{-jk(r_0 + nd \cos \theta)} \\ &= \frac{e^{-jk r_0}}{r} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-jnkd \cos \theta}. \end{aligned} \quad (6)$$

En el caso de introducir una fase progresiva a la amplitud, aparece un factor común análogo al factor de array,

$$p(r, \theta) = \frac{e^{-jk r_0}}{r} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-jn(kd \cos \theta + \alpha)}. \quad (7)$$

Para que el modelo se adapte a la realidad, se debe considerar que los altavoces basados en el movimiento de una membrana circular radian como un “pistón en pantalla infinita” [2]. La presión que genera un pistón a una distancia r y un ángulo de elevación θ viene dada por

$$p(r, \theta) = j\omega\rho_0 U \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \frac{e^{-jkr}}{2\pi r}, \quad (8)$$

donde J_1 es la función de Bessel de primer orden y primera especie, ρ_0 es la densidad del medio, a el radio del pistón y U su velocidad volumétrica. Nótese que la presión no depende del ángulo azimutal puesto que la radiación de un pistón presenta simetría de revolución en torno al eje z .

La presión total que genera el array de altavoces se obtiene, por tanto, insertando la presión (8) en la ecuación del array de fuentes puntuales:

$$\begin{aligned} p(r, \theta) &= \sum_{n=0}^{N-1} j\omega\rho_0 U_n \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \frac{e^{-jk(r_0 - nd \cos \theta)}}{2\pi r_n} \\ &= j\omega\rho_0 \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \frac{e^{-jk r_0}}{2\pi r} \sum_{n=0}^{N-1} U_n e^{-jnkd \cos \theta}. \end{aligned} \quad (9)$$

En este caso, introducir un desfase progresivo α en la agrupación significa modificar la velocidad volumétrica, que es proporcional a la tensión de entrada al transductor. De nuevo, se obtiene una expresión conocida:

$$p(r, \theta) = j\omega\rho_0 \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \frac{e^{-jk r_0}}{2\pi r} \times \sum_{n=0}^{N-1} U_n e^{-jn(kd \cos \theta + \alpha)}. \quad (10)$$

Para frecuencias en las cuales se cumple que $ka \leq 1$, el pistón puede considerarse omnidireccional. Por tanto, en ese margen, el factor de array es el único elemento de control de la directividad.

En ingeniería acústica, al igual que en radiación electromagnética, una de las características más interesantes es el control de la dirección de propagación. Efectivamente, con la variación de la fase progresiva se puede cambiar la orientación del haz principal, obteniendo agrupaciones transversales (*broadside*), caracterizadas por el máximo de radiación en la dirección perpendicular al eje de la agrupación, agrupaciones longitudinales (*endfire*), en la cual el haz principal está orientado hacia la dirección del eje de la agrupación o bien agrupaciones de fase (*phased*), cuyo máximo de radiación adopta valores intermedios.

III. SIMULACIÓN Y EXPERIMENTOS

Para el cálculo y la observación de los resultados teóricos se programa en Matlab una herramienta que muestra, a partir del número de altavoces N , sus tensiones a_n , la fase progresiva α y la distancia d entre ellos, el *margen visible* de la agrupación y su diagrama de radiación correspondiente.

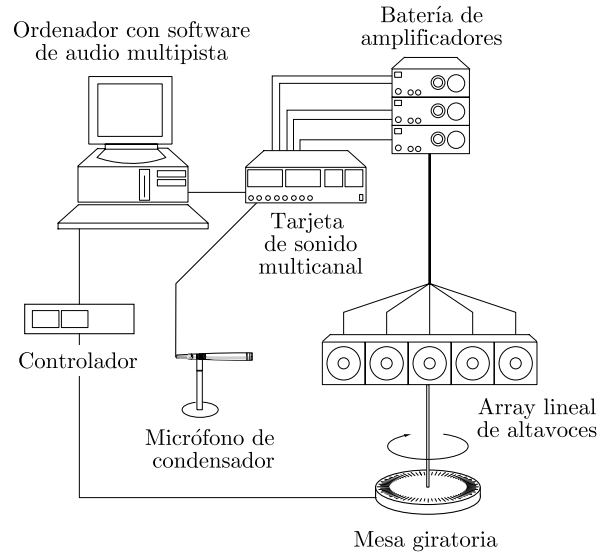


Fig. 1. Montaje experimental para la medida de la directividad del array lineal de altavoces de laboratorio.

Los resultados experimentales se obtienen a partir de la construcción de un array de cinco altavoces dinámicos de 5" exactamente iguales, como muestra la Figura 1. Éstos se montan sobre un soporte que permite el ajuste de la distancia de separación d . En la Figura 2 se presenta una fotografía del dispositivo experimental.



Fig. 2. Vista del dispositivo experimental de laboratorio.

Las señales que alimentan a cada una de las unidades estarán controladas por una tarjeta multicanal de ocho salidas y ocho entradas analógicas MOTU 896. De este modo, cada altavoz recibe la señal con la fase y amplitud correspondiente. La precisión en la generación de estas señales también es muy importante, por eso serán programadas en Matlab y reproducidas mediante software con capacidad multipista.

Las medidas se realizaron usando la técnica MLS (*Maximum Length Sequence*) que proporciona medidas correctas sin necesidad de ser realizadas en cámara anecoica. El funcionamiento de esta técnica se basa en la emisión de una señal digital que sólo se puede correlacionar consigo misma, de tal modo que las reflexiones pueden ser aisladas. Por otra parte, las señales emitidas son recogidas por sendos micrófonos de condensador para poder realizar el análisis correspondiente. Para la obtención del diagrama direccional se utiliza también una mesa giratoria que hace posible la variación del ángulo en las medidas de forma controlada.

El estudio se realiza con señales de baja frecuencia, rango en el cual la radiación se puede considerar omnidireccional. Para las frecuencias de 600, 800 y 1000 Hz, los altavoces pueden ser tratados como si fueran fuentes puntuales omnidireccionales puesto que el factor ka varía entre 0,7 y 1,2. Para frecuencias más altas la teoría exige la consideración de las características direccionales propias del radiador [2].

En la Figura 3 se presenta el diagrama de directividad de la agrupación uniforme de cinco altavoces separados una distancia $d = 13,5$ cm. Este tipo de alimentación proporciona un lóbulo principal angosto, como se aprecia en la figura. La posición de los mínimos de radiación se corresponden con la simulación, no obstante, el nivel de los lóbulos secundarios es más elevado en el experimento. Puesto que las medidas se realizaron a 1,5 m, no es posible afirmar que se trate de campo cercano y por esta razón, la forma de los lóbulos no está conformada.

La Figura 3a, que corresponde a la radiación para la frecuencia de 600 Hz, es un buen ejemplo del potencial de los arrays de altavoces. La concentración de energía en torno

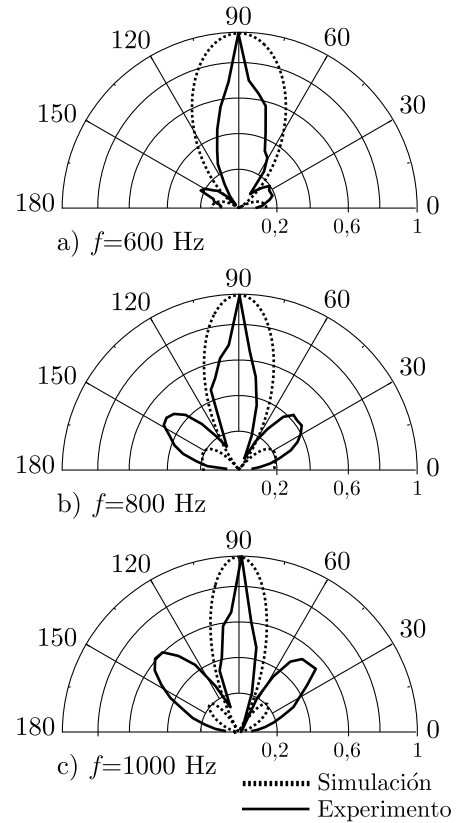


Fig. 3. Diagrama de directividad de un array lineal de cinco altavoces con alimentación uniforme.

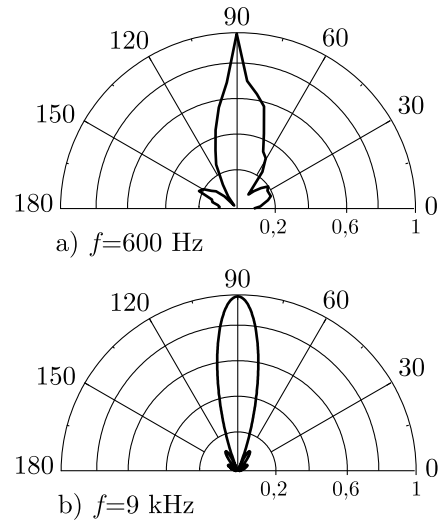


Fig. 4. Comparación entre diagramas de directividad de un array y de un elemento aislado. a) Array de cinco altavoces, b) Altavoz aislado.

al eje que muestra el array sólo podría conseguirse con un solo radiador a frecuencias en torno a 9 kHz, frecuencias que carecen de interés para mensajes de voz, por ejemplo. En la Figura 4 se muestra la comparación entre la radiación del array para 600 Hz y la radiación de un altavoz que forma el array a la frecuencia de 9 kHz.

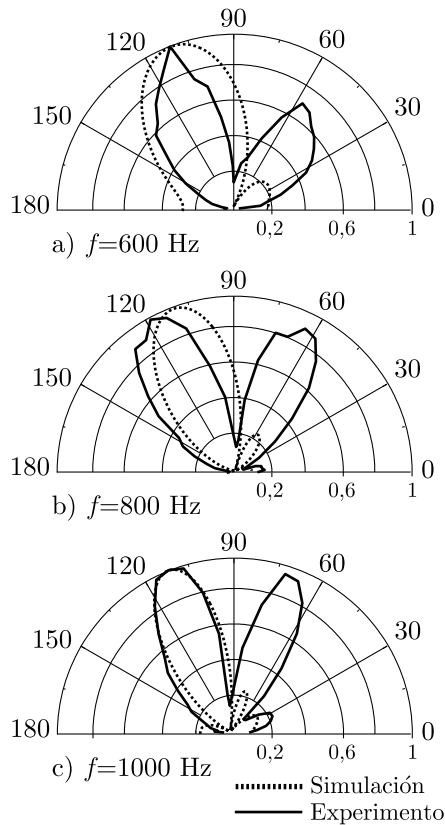


Fig. 5. Diagrama de directividad de un array lineal de cinco altavoces con alimentación desfasada.

Con el fin de desviar el haz 20° respecto al eje, se desfasó la agrupación sin modificar la distancia entre altavoces. En la Figura 5 se presenta el resultado y la simulación para las tres frecuencias de estudio. El efecto del nivel excesivo de lóbulos secundarios se manifiesta en esta agrupación con más evidencia, sobre todo a frecuencias mayores, donde λ es menor.

IV. CONCLUSIONES

En una primera evaluación, se ha comprobado y validado el uso de la teoría de arrays de antenas para su introducción en el campo de la electroacústica. Por tanto, es posible conseguir diseños de agrupaciones de altavoces cuyos diagramas de radiación permitan minimizar las reflexiones en suelos y techos. De esta manera, además de un incremento de nivel en la zona de audiencia, se conseguiría reducir los tiempos de reverberación en lugares donde la inteligibilidad de la voz es esencial, como por ejemplo, en las iglesias.

También cabe mencionar que, una vez comprobada la validez del método, quedarían abiertas posibles investigaciones posteriores en sistemas de control activo de directividad basados en DSP. Estos sistemas serían capaces de dirigir el sonido hacia zonas determinadas de la audiencia de forma automática y controlada realizando los cálculos implicados en el método y actuando posteriormente sobre cada uno de los altavoces.

No obstante, en todos los experimentos se ha observado que

el nivel de los lóbulos secundarios es mayor que el esperado por la teoría debido a las distancias de medida entre emisores y receptores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCYT) con el Proyecto TIC2002-04451-C02-02.

REFERENCES

- [1] C. A. Ballanis. *Antenna theory*, John Wiley & Sons, 1997.
- [2] B. Pueo y M. Romá. *Electroacústica, altavoces y micrófonos*, Ed. Prentice Hall, 2003.
- [3] Said E. El-Khamy and Abdulfattah H. Banah, "Huffman Code-Fed Omnidirectional Acoustical Arrays", *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, 38: 577-585, April 1990.
- [4] John Borwick. *Loudspeaker and Headphone Handbook*, Focal Press, 2001.
- [5] F. Fahy. *Foundations of Engineering Acoustics*, Academic Press, 2001.