

CONFORMACIÓN DE HAZ EN ESPACIOS REVERBERANTES, *SUPERDIRECTIVE BEAMFORMING IN ROOMS*

PACS: 43.38.Hz, 43.60.Fg, 43.38.Ar, 43.60.Dh, 43.66.Ts

Marcos Felipe Simón Gálvez¹, Stephen J. Elliott¹, Jordan Cheer¹
¹ Institute of Sound and Vibration Research,
University of Southampton,
Southampton, Hampshire,
SO17 1BJ, United Kingdom
E-mail: mfgs1e10@soton.ac.uk

ABSTRACT

It is estimated that disputes over TV volume affect one in ten households. This is often caused because some family members have age-related hearing loss but do not wear a hearing aid. To partially overcome this problem, an 8 source miniature loudspeaker array has been designed, to be used as a complementary sound system to that of the TV. The array creates a beam of sound in the direction where the hearing impaired person is sat, boosting the level towards this direction and creating a bright pressure zone, whilst that the sound pressure level in other directions is not increased, so as not to annoy normal hearing TV viewers. The directionality of the array is created by using phase shift loudspeakers for the array sources, together with superdirective beamforming algorithms. As the array is designed to work inside a reverberant environment, its directional characteristics have to be large. The performance that the array presents in free-field and inside a reverberant environment is presented in this document.

Keywords: Superdirective beamforming, room acoustics, hearing aids.

RESUMEN

Se estima que en una de cada diez familias con miembros de diferentes edades hay disputas acerca de qué volumen debe tener la televisión. Esto se debe, en parte, a que algunos miembros de la familia sufren pérdidas de audición debidas a la edad, pero no usan ayudas auditivas. Para paliar parcialmente esas pérdidas auditivas, este trabajo presenta un conformador de haz, o *line array*, constituido por 8 altavoces de reducido tamaño, diseñado para funcionar complementariamente al sistema de sonido de la televisión. El conformador realiza el sonido proveniente de la televisión en la dirección donde un espectador con pérdidas auditivas se encuentra sentado, creando una zona viva, mientras que la radiación en el resto de direcciones se minimiza para no molestar a espectadores con una audición normal. Por tanto, como el conformador está pensado para trabajar en condiciones reverberantes, tiene que presentar una gran directividad. Con este fin, se emplean algoritmos avanzados de conformación de haz para crear los filtros del conformador, mientras que la radiación de la parte trasera de los altavoces se minimiza usando fuentes de gradiente de presión. Las prestaciones que el conformador ofrece en campo libre y en condiciones reverberantes se presentan en este documento.

Palabras clave: Conformación de haz superdirectiva, acústica de salas, ayudas a la audición.

1. Introducción

En este trabajo se describe el diseño de un *line array* o conformador de haz de reducido tamaño, creado para realzar el sonido proveniente de un televisor en una determinada dirección. Inicialmente, la motivación de este trabajo viene de la aplicación de fuentes direccionales para ser utilizadas como ayudas a la audición. Conforme se aumenta en edad, las prestaciones presentadas por el oído humano van decreciendo, particularmente a alta frecuencia, fenómeno conocido como presbiacusia, el cual conlleva también una reducción de la inteligibilidad percibida del habla [1]. Un cotidiano ejemplo se da cuando personas de diferentes edades ven la televisión; en este caso las personas mayores desearán un volumen elevado, que será considerado excesivo por oyentes más jóvenes [2].

Para contrarrestar este problema presentamos una aplicación de *audio personal* [3]. La idea es utilizar un conformador haz como un sistema de audio complementario al de la televisión, y realzar el nivel de presión acústica en la zona en que la persona o las personas con pérdidas auditivas se encuentren sentadas. Aunque este es un claro ejemplo de utilización de este conformador, claro está que una fuente de este tipo puede ser usada en otras aplicaciones que también requieran una fuente acústica directiva.

Las prestaciones otorgadas por el conformador son medidas en función del contraste acústico [4, 5] creado entre dos regiones del espacio; la primera corresponde a la región donde la persona con pérdidas auditivas está sentada, denominada *zona viva*, y la segunda, denominada *zona muerta*, es donde las personas con audición normal están sentadas, y por tanto, el nivel de presión acústica radiada en esta zona debe ser mínimo para no molestar a los espectadores con una audición normal. El conformador tiene unas dimensiones menores a la longitud de onda de trabajo en la mayoría de su rango espectral de utilización, y por tanto, para aumentar su rendimiento a bajas y medias frecuencias, se usan técnicas de conformación de haz superdirectivas [6-8]. Estas técnicas aumentan considerablemente la directividad de un conformador en frecuencias donde éste es ineficiente, sin embargo, hacen necesaria una elevada cantidad de potencia eléctrica [9].

Como el conformador es utilizado en configuración cercana a *broadside*, es necesario también reducir la radiación de la parte trasera del conformador. Para este fin, en vez de usar un sistema activo utilizando una agrupación de altavoces adicional, como por ejemplo en [10-12], se usan fuentes direccionales de gradiente de presión [13, 14]. Este tipo de fuentes funcionan análogamente a los micrófonos de gradiente de presión, donde el efecto gradiente es controlado por las características acústicas del recinto acústico y la resistencia acústica de la cara trasera de la caja del altavoz [9, 15].

En trabajos anteriores se han construido conformadores de 8 fuentes [9, 16] que han demostrado un gran rendimiento en campo libre; sin embargo, este rendimiento se ve drásticamente reducido cuando el conformador se sitúa dentro de un entorno reverberante, como puede ser una habitación normal. El conformador aquí presentado utiliza 8 fuentes formadas cada una de ellas por una agrupación vertical de 4 altavoces, aumentado así la directividad en el plano vertical, disminuyendo las reflexiones del techo y suelo, y consiguiendo unas prestaciones que permiten usar el conformador para aumentar la inteligibilidad del habla.

2. Teoría

2.1. Filtros superdirectivos

Por filtro superdirectivo se entiende el procesado digital que se aplica a cada uno de los altavoces con el fin de aumentar la directividad del conformador en las frecuencias en la que ésta es baja, debido al mal condicionamiento de la matriz de impedancias [17, 18]. Técnicas comúnmente usadas para la creación de filtros superdirectivos en conformadores de haz, son por ejemplo, la maximización del contraste acústico [4, 19] o los filtros de mínimos cuadrados [9, 20]. Los filtros de mínimos cuadrados permiten conseguir una mejor distribución de la presión acústica en la zona de interés, en este caso la zona viva, ofreciendo al mismo tiempo una directividad muy similar a ésta ofrecida por la técnica de la maximización del contraste acústico [9], lo que los hace más adecuados para su uso en la aplicación que aquí se presenta.

Para la creación de filtros superdirectivos, es necesario conocer de antemano la respuesta del conformador en una serie de puntos de control situados a una cierta distancia del mismo. Esta respuesta se puede obtener a partir de un modelo o midiendo las funciones de transferencia desde cada fuente a cada punto de control.

Es necesario aclarar que la formulación que aquí se presenta asume una sola frecuencia de radiación, es decir $Z(f) \rightarrow Z$. La respuesta del conformador se divide en dos grupos que corresponden a dos matrices de impedancias de transferencia correspondientes a ambas zonas de control; La primera de ellas corresponde a la zona viva, \mathbf{Z}_B , y posee un tamaño $N_B \times M$, donde N_B corresponde a el número de puntos de control de la zona viva y M el número de fuentes del conformador

$$\mathbf{Z}_B = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1M} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N_B 1} & Z_{N_B 2} & \dots & Z_{N_B M} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Por su parte, la matriz de impedancias correspondiente a la zona muerta, \mathbf{Z}_D , es una matriz de tamaño $N_D \times M$, donde N_D representa el número de puntos de control destinados a la zona viva

$$\mathbf{Z}_D = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1M} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N_D 1} & Z_{N_D 2} & \dots & Z_{N_D M} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Los dos vectores de presión acústica correspondientes a ambas zonas de control se crean al multiplicar las respectivas funciones de transferencia con el vector de velocidades volumétricas del conformador, \mathbf{q} , dando lugar a

$$\mathbf{p}_B = \mathbf{Z}_B \mathbf{q}, \mathbf{p}_D = \mathbf{Z}_D \mathbf{q}. \quad (3)$$

Sabiendo la distribución de presión acústica en cada zona de control, es posible calcular el contraste del módulo de la presión acústica media al cuadrado, C , denominado *contraste acústico*, lo que permite estimar las prestaciones del conformador.

El contraste acústico se define como

$$C = \frac{N_D}{N_B} \frac{\mathbf{p}_B^H \mathbf{p}_B}{\mathbf{p}_D^H \mathbf{p}_D} = \frac{N_D}{N_B} \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{Z}_B^H \mathbf{Z}_B \mathbf{q}}{\mathbf{q}^H \mathbf{Z}_D^H \mathbf{Z}_D \mathbf{q}}. \quad (4)$$

Los filtros superdirectivos permiten maximizar la función de coste C , de manera que la radiación del conformador se dirige solamente hacia la zona viva.

Siguiendo la formulación de mínimos cuadrados [9, 20], las matrices de impedancias de ambas zonas de control se combinan para formar una nueva matriz de impedancias total, \mathbf{Z}_T , de tamaño $N \times M$

$$\mathbf{Z}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_B \\ \mathbf{Z}_D \end{bmatrix}, \quad (5)$$

donde $N = N_B + N_D$. Usando \mathbf{Z}_T , es posible calcular la presión acústica en todos los puntos de control, que es definida según

$$\mathbf{p} = \mathbf{Z}_T \mathbf{q}. \quad (6)$$

Es necesario introducir un nuevo vector, \mathbf{a} , el cual representa el campo acústico deseado. Éste, a su vez, es definido como

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_T \cdot \mathbf{a}_p, \quad (7)$$

donde \mathbf{a}_T es un vector binario en el que los puntos de control de la zona viva son igual a 1 y los puntos de control de la zona muerta son igual a 0. El elemento \mathbf{a}_p representa el vector de propagación, que puede contener una atenuación y un desfase para simular propagación esférica o representar una función de transferencia que caracterice a una de las fuentes centrales del conformador. El error entre el campo acústico creado por el conformador y el campo acústico deseado se define por medio de un nuevo vector, \mathbf{e} , el cual se establece como

$$\mathbf{e} = \mathbf{p} - \mathbf{a}. \quad (8)$$

La mejor aproximación al vector \mathbf{a} es aquella dada por la solución de mínimos cuadrados [21]. Para ello es necesario introducir una nueva función de coste, J , formada por la suma del módulo del error al cuadrado

$$J = \sum_{n=1}^N |e_n|^2 = \mathbf{e}^H \mathbf{e}. \quad (9)$$

Reagrupando las ecuaciones 6 y 8 en la ecuación 9, lleva a

$$J = \mathbf{a}^H \mathbf{a} - \mathbf{Z}_T^H \mathbf{q}^H \mathbf{a} - \mathbf{a}^H \mathbf{Z}_T \mathbf{q} + \mathbf{q}^H \mathbf{Z}_T^H \mathbf{Z}_T \mathbf{q}. \quad (10)$$

En el caso de un sistema sobredeterminado donde el número de puntos de control es mayor al número de fuentes, el vector de velocidades volumétricas del conformador que minimiza J es aquel dado por

$$\mathbf{q} = \left[\mathbf{Z}^H \mathbf{Z} + \beta \mathbf{I} \right]^{-1} \mathbf{Z}^H \mathbf{a}, \quad (11)$$

donde β es un parámetro de regularización [20], usado para controlar el condicionamiento de la matriz a invertir y aumentar la robustez frente a errores en las funciones de transferencia. Al mismo tiempo, se puede controlar la cantidad de superdirectividad que se quiere obtener, de modo que se puede obtener una directividad efectiva a baja frecuencia usando un nivel de potencia razonable [19]. Para ello, se introduce una nueva magnitud denominada *esfuerzo del conformador*, EC , que se establece como la norma del vector de velocidades volumétricas del conformador dividido por la norma de la velocidad volumétrica que una fuente puntual, o una de las fuentes centrales del conformador, necesita para producir la misma presión acústica que el conformador produce en la zona viva. El parámetro β , es ajustado a cada frecuencia de manera que el esfuerzo del conformador no supere un cierto valor. El esfuerzo del conformador se define como

$$EC = \frac{\mathbf{q}^H \mathbf{q}}{|q_{MON}|^2}. \quad (12)$$

El contraste acústico, C , y el esfuerzo del conformador, EC , son pues magnitudes adimensionales que son dadas generalmente en dB.

3. Diseño del conformador

3.1. Resultados deseados

Como primera herramienta de diseño, se ha usado el estándar ISO 7029 [22], el cual ofrece una estimación de las pérdidas auditivas asociadas a la edad que sufre un cierto porcentaje de la población. Las pérdidas auditivas que el estándar estima para el 50% de la población han sido usadas para marcar las pautas de la amplificación que el conformador debería aportar para mejorar la inteligibilidad del habla. Aunque existen numerosos métodos prescriptivos utilizados en ayudas auditivas, los cuales usan avanzados algoritmos lineales o no-lineales para calcular la ganancia de inserción necesaria, el conformador aquí presentado usa una simple aproximación consistente en proporcionar como amplificación la mitad de las pérdidas auditivas en dB, técnica denominada *half-gain rule* [23]. En este caso, la combinación de los audiogramas dados por la norma ISO 7029 y la *half-gain rule* se utiliza como prescripción, lo que requiere un pre-énfasis en frecuencia: desde unos 5 dB a 125 Hz hasta 20 dB a 8kHz.

3.2. Diseño de las fuentes

Con motivo de reducir la complejidad del conformador y por tanto incrementar su robustez [19, 24] y abaratar sus costes de fabricación, es necesario utilizar un número reducido de fuentes, dado que cada fuente necesita un filtro digital independiente, y por tanto debe ser conectada a un canal de un DSP (procesador digital de señal). Sin embargo, el número de fuentes utilizadas es proporcional a la directividad obtenida; por tanto, es necesario obtener un equilibrio entre dos parámetros de diseño: calidad y coste/complejidad.

La solución adoptada en este conformador es la de combinar 4 fuentes de gradiente de presión [11, 13-15], que aquí se denominan fuentes cuádruples. Las 4 fuentes están situadas en un eje vertical, siendo conectadas de tal manera que radian con idéntica amplitud y fase, con lo que se obtiene una conformación de haz en el plano vertical. En el plano horizontal, debido al gradiente de presión, se obtiene una directividad hipercardiode. Las fuentes de gradiente de presión usan una caja en donde la cara trasera de la misma está formada por una malla metálica, que junto al volumen interno de ésta forma una red RC , causando un desfase entre la presión

radiada por el diafragma y aquella radiada por la malla metálica, dando lugar a una radiación direccional. El conformador está formado por un total de 8 fuentes cuádruples, lo que supone un total de 32 fuentes simples.

Modificando el volumen interno y la resistencia acústica de la malla metálica, la directividad se puede variar desde un dipolo a un monopolo, sin embargo, aquí se ha seleccionado un hipercardiode, al ser la figura de radiación que menos excita el campo reverberante [25]. El único defecto que presentan las fuentes de gradiente de presión es que cuando éstas radian a una frecuencia igual a $f = 3c/4d$, el diagrama de radiación resulta ser totalmente opuesto al deseado, donde c representa la velocidad del sonido en el medio y d la distancia entre el diafragma y la malla trasera. Para contrarrestar este nulo de radiación, cada fuente ha sido dotada de un fieltro adicional, que actúa como resistencia acústica de alta frecuencia [9], de modo que a baja frecuencia, donde la fuente actúa como un hipercardiode, el fieltro no supone ningún impedimento. Conforme aumenta la frecuencia de radiación, la resistencia presentada por el fieltro aumenta proporcionalmente, lo que atenúa la radiación de la cara trasera de la caja, a una frecuencia suficientemente alta como para que la radiación sea directiva debido al *beaming* creado por el propio altavoz.

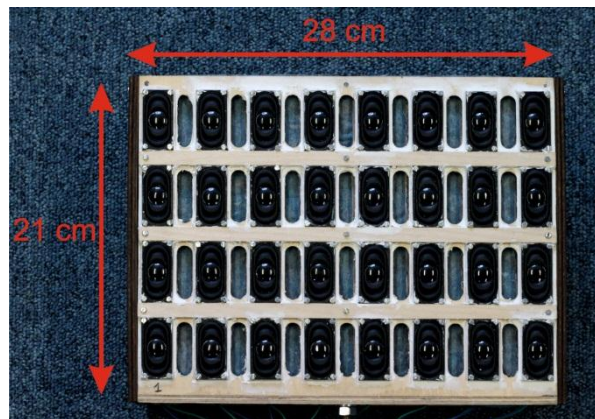


Figura 1. Vista del conformador, en donde cada columna representa una fuente.

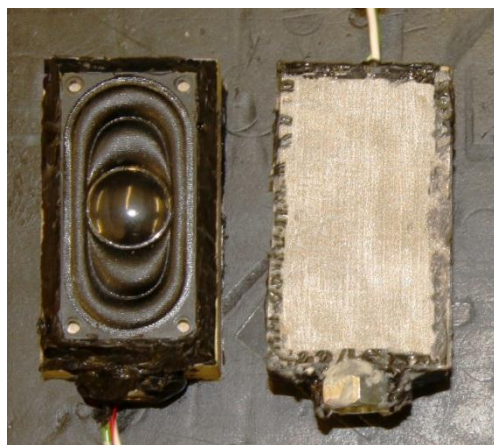


Figura 2. Cara frontal y posterior de las fuentes simples utilizadas en [9].

Las fuentes cuádruples utilizadas en el conformador pueden ser observadas en la Figura 1, en donde cada columna está formada por cuatro fuentes simples. El aspecto de una fuente simple,

como las utilizadas por el conformador presentado en [9], puede observarse en la Figura 2, donde también se muestra la malla metálica de la cara trasera que forma la red acústica *RC*. La directividad obtenida por una de las fuentes cuádruples del conformador puede ser observada en la Figura 3, donde ésta es comparada con la directividad que ofrece una fuente simple. Puede observarse que las directividades obtenidas por ambas fuentes en el plano horizontal son similares, sin embargo, en el plano vertical, las fuentes cuádruples son mucho más directivas, pudiéndose observar la aparición de lóbulos secundarios en alta frecuencia debido a la separación vertical de cada fuente, siendo ésta de 5 cm.

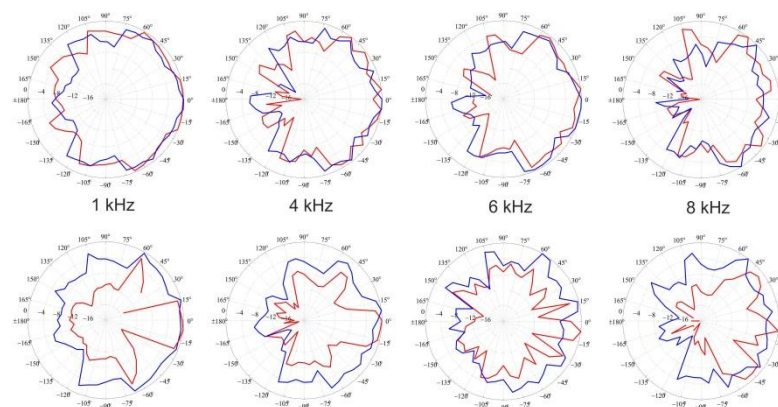


Figura 3. Directividad en el plano horizontal (diagramas superiores) y en el plano vertical (diagramas inferiores) a varias frecuencias ofrecida por una fuente de gradiente de presión cuádruple como la usada en el conformador (línea roja), comparada con aquella ofrecida por una fuente simple de gradiente de presión (línea azul). Leyenda en dB normalizada respecto a la presión obtenida en la dirección de máxima radiación.

4. Resultados

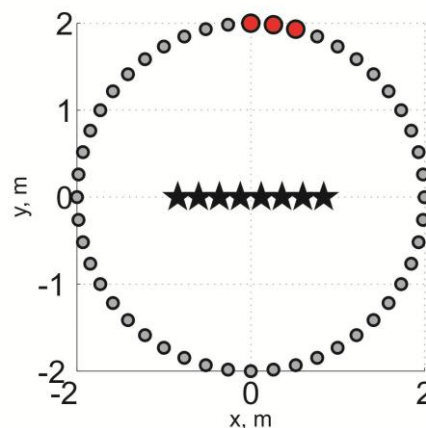


Figura 4. Zona de control usada en los resultados presentados. Los círculos en rojo representan la zona viva mientras que los círculos en gris representan la zona muerta. Las estrellas centrales representan las fuentes del conformador en una escala diferente.

Usando la formulación presentada en la sección 2 de este documento se han creado filtros de mínimos cuadrados para optimizar la directividad en una zona de control como la presentada en

la Figura 4. Las prestaciones ofrecidas por el conformador han sido medidas en condiciones de campo libre, en una cámara anecoica, y en un espacio acondicionado para la escucha de audio. Los resultados presentados se comparan a aquellos obtenidos por un conformador de fuentes simples, como el presentado en [9].

4.1. Prestaciones en campo libre

En la parte superior de la Figura 5 se muestra el contraste acústico obtenido en condiciones de campo libre por el conformador de fuentes cuádruples, 4×8 , comparado con éste obtenido por el conformador de fuentes simples, 1×8 . Ambos filtros han sido diseñados para que el esfuerzo del conformador no supere un máximo de 6 dB, como se observa en la parte inferior de la Figura 5. La cifra de 6 dB se elige al considerarse suficiente para aumentar la directividad a baja frecuencia, sin tener al mismo tiempo que suministrar un elevado voltaje a ninguna de las fuentes del conformador y prevenir que se dañen. Por debajo de 500 Hz, el esfuerzo del conformador se ha limitado para que sea inferior a 0 dB, asegurando que el rango de utilización del conformador se encuentra por encima de la frecuencia de resonancia de las fuentes. Como puede observarse en la Figura 5, las prestaciones en campo libre de ambos conformadores son similares, tanto el de fuentes simples como el de fuentes cuádruples.

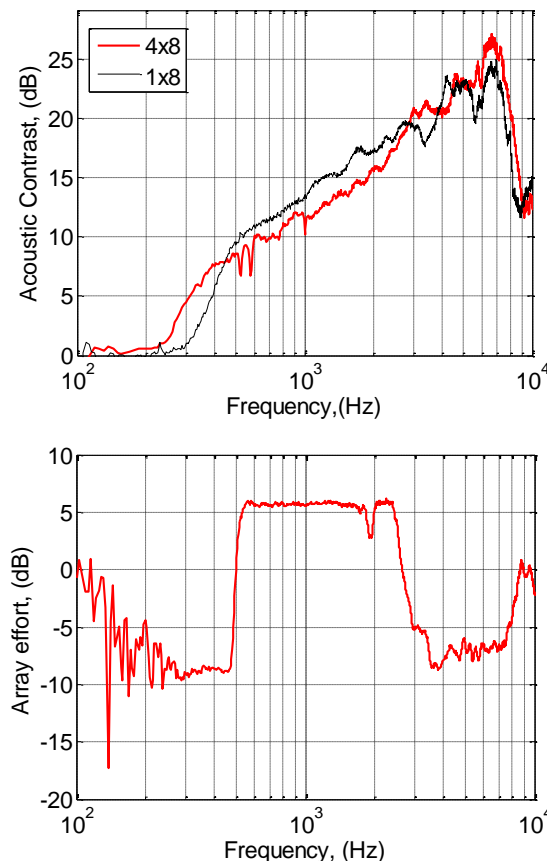


Figura 5. Contraste acústico en campo libre obtenido por el conformador aquí presentado, 4×8 , comparado con aquel obtenido por un conformador con fuentes simples, 1×8 . El esfuerzo de conformador necesario se muestra en la gráfica inferior.

4.2. Prestaciones en campo reverberante

La directividad que ofrece el conformador ha sido medida en una sala acondicionada para la escucha de sistemas de audio, como se puede observar en la Figura 6. La sala presenta un tiempo de reverberación de media frecuencia (media de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz) igual a 0.3 s. Los resultados de directividad obtenidos a una distancia de 2 m, se muestran en la Figura 7, donde puede observarse cómo el contraste acústico se reduce cuando el conformador se sitúa en un entorno reverberante, sin embargo, se obtiene un contraste superior a 10 dB desde 1.5 kHz a 8 kHz, en una zona de control como la mostrada en la Figura 4. El contraste acústico que ofrece el conformador de fuentes cuádruples es superior a lo largo de todo el rango de frecuencia al contraste acústico proporcionado por un conformador de fuentes simples, consiguiendo una mejora de 5 dB en torno a 5 kHz.

Cuando una fuente acústica se introduce dentro de un entorno reverberante, la presión acústica radiada por ésta es reflejada por cada una de las paredes del entorno, creando un campo de presión acústica reverberante. El campo reverberante añade una componente de presión extra a todos los puntos de control, y por tanto, reduce el contraste acústico [26]. La reducción de contraste acústico es por tanto proporcional al tiempo de reverberación que presenta el entorno. Aunque el espacio reverberante donde se han medido las prestaciones del conformador representa un entorno con un tiempo de reverberación bastante reducido, las características acústicas del mismo no son muy diferentes a las de una sala “de estar” enmoquetada, escenario donde tendrá lugar la aplicación usual del conformador como ayuda a la audición.



Figura 6. Conformador dentro de la sala acondicionada para la escucha de audio, junto con el *set-up* usado en las medidas.

Usando los filtros creados para la zona de control representada en la Figura 4, ha sido posible medir el contraste acústico obtenido entre cuatro oyentes virtuales, constituidos por un *dummy head* situado en cuatro posiciones diferentes, como se muestra en la Figura 8. Esta situación representa un ejemplo típico de la aplicación estándar del conformador, en donde 4 oyentes ven la televisión y uno de ellos, de mayor edad, necesita un mayor volumen para poder aumentar la inteligibilidad del audio. El contraste acústico que se obtiene en este escenario se puede observar en la Figura 9, donde también se muestra el resultado obtenido en la misma zona de control en campo libre. Puede observarse cómo a baja frecuencia ambas curvas son bastante

similares, sin embargo, en alta frecuencia el contraste en campo libre es entre 6-10 dB más alto que el contraste en condiciones reverberantes, quedando una cifra final de 18 dB de contraste acústico en condiciones reverberantes en torno a 5 kHz.

La Figura 9 muestra también la comparación del contraste acústico que puede obtenerse con la prescripción de amplificación a utilizar usando la *half-gain rule*, y las pérdidas auditivas que el estándar ISO 7029 estima para una mujer de 70 años. Como puede observarse, la curva de las prescripciones y el contraste acústico reverberante son bastante similares hasta 7 kHz. Esto supone que el conformador puede ser usado para la aplicación original como una ayuda a la audición para realzar la inteligibilidad de un programa de televisión.

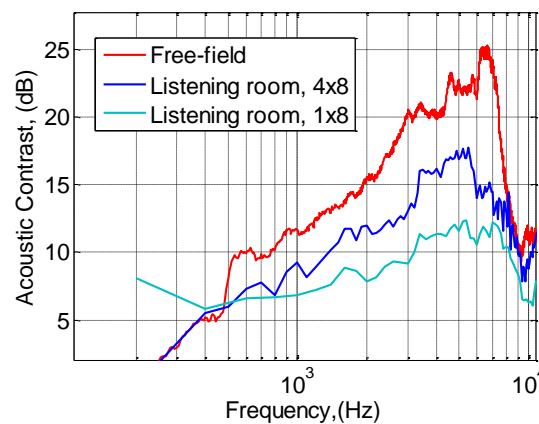


Figura 7. Contraste acústico obtenido por el conformador usando fuentes cuádruples en un espacio reverberante (línea azul), comparado con éste obtenido en campo libre (línea roja). También se muestra el contraste acústico que un conformador de fuentes simples obtiene en el mismo espacio (línea verde).

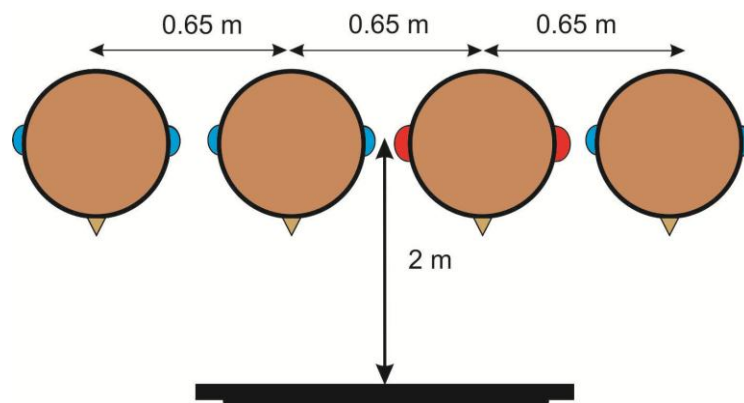


Figura 8. Zona de control usada para simular un escenario real. Los micrófonos en azul representan a espectadores sin problemas auditivos, y por tanto pertenecen a la zona muerta, mientras que los micrófonos en rojo representan a un espectador con presbiacusia, representando la zona viva.

Las directividades que el conformador obtiene a diferentes frecuencias, medidas en la sala acondicionada para la escucha de audio, se muestran en la Figura 10. Puede observarse el elevado nivel que presentan los numerosos lóbulos secundarios, debido a que las paredes del entorno donde el experimento fue realizado estaban compuestas por una distribución mixta de

material absorbente de alta frecuencia y de láminas reflectoras con un bajo coeficiente de absorción, lo que propicia primeras reflexiones con un alto nivel de energía.

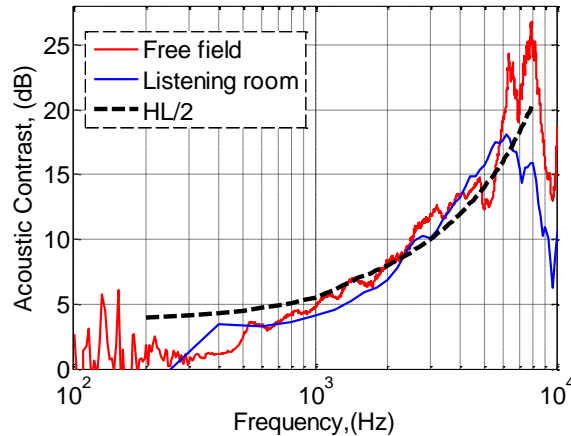


Figura 9. Contraste acústico obtenido en la zona de control utilizando *dummy heads*, mostrada en la Figura 8. Resultados en campo libre (línea roja) y dentro de un espacio reverberante (línea azul). La línea discontinua muestra la prescripción de amplificación necesaria según el estándar ISO 7029 y la *half-gain rule*.

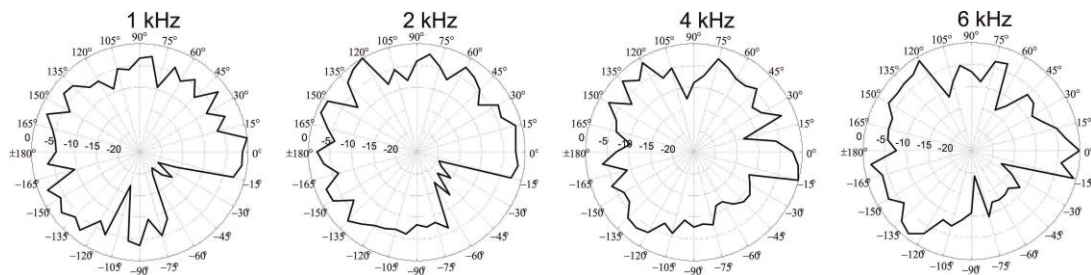


Figura 10. Directividad a varias frecuencias ofrecida por el conformador en la sala acondicionada para la escucha de audio.

5. Conclusiones

En esta comunicación se ha presentado un conformador de haz superdirectivo que puede ser utilizado para incrementar la inteligibilidad del audio en personas con pérdidas auditivas. El dispositivo utiliza fuentes cuádruples de gradiente de presión, lo que crea una conformación de haz en sentido 3D. Debido al tipo de caja que utilizan las fuentes, sólo se necesitan 8 filtros digitales para crear una conformación de haz superdirectiva, lo que reduce los costes de un conformador de este tipo, incrementando al mismo tiempo la robustez frente a errores en las funciones de transferencia de las fuentes.

Utilizando filtros de mínimos cuadrados, el conformador es capaz de obtener un contraste acústico en condiciones reverberantes superior a 10 dB entre 1.5 kHz y 8 kHz. Las medidas realizadas en un escenario simulado por cuatro *dummy heads* han demostrado que es posible suministrar un realce que puede incrementar la inteligibilidad del habla.

6. Referencias

1. Willott, J.F., *Aging & The Auditory System* 1991: Whurr Publisher LTD.
2. Coren, S., *MOST COMFORTABLE LISTENING LEVEL AS A FUNCTION OF AGE*. Ergonomics, 1994. **37**(7): p. 1269-1274.
3. Druyvesteyn, W.F. and J. Garas, *Personal sound*. Journal of the Audio Engineering Society, 1997. **45**(9): p. 685-701.
4. Joung-Woo, C. and K. Yang-Hann, *Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources*. Journal of the Acoustical Society of America, 2002. **111**(4): p. 1695-1700.
5. Elliott, S.J., et al., *Minimally radiating sources for personal audio*. Journal of the Acoustical Society of America, 2010. **128**(4): p. 1721-1728.
6. Cox, H., R.M. Zeskind, and T. Kooij, *PRACTICAL SUPERGAIN*. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1986. **34**(3): p. 393-398.
7. Boone, M.M., W.-H. Cho, and J.-G. Ih, *Design of a Highly Directional Endfire Loudspeaker Array*. Journal of the Audio Engineering Society, 2009. **57**(5): p. 309-325.
8. Van Veen, B.D. and K.M. Buckley, *Beamforming: a versatile approach to spatial filtering*. IEEE ASSP Magazine, 1988. **5**(2): p. 4-24.
9. Simón Gálvez, M.F., S.J. Elliott, and J. Cheer, *A superdirective array of phase shift sources*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012. **132**(2): p. 746-56.
10. Fazi, F.M., F.A. Hirono, and P.A. Nelson, *Dual-layer loudspeaker array for multiple listening zones*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012. **131**(4): p. 3216-3216.
11. Olson, H.F., *GRADIENT LOUDSPEAKERS*. Journal of the Audio Engineering Society, 1972. **20**(8): p. 687-&.
12. Cheer, J., et al., *Practical Implementation of Personal Audio in a Mobile Device*. Journal of the Audio Engineering Society, 2013. **61**(5): p. 290-300.
13. Holmes, T.J., *THE ACOUSTIC RESISTANCE BOX - A FRESH LOOK AT AN OLD PRINCIPLE*. Journal of the Audio Engineering Society, 1986. **34**(12): p. 981-989.
14. Backman, J., *Theory of Acoustical Resistance Enclosures*, in *AES 106 Convention*, 1999, Audio Engineering Society. p. 4979.
15. Iding, W.H., *Unidirectionally Radiating Loudspeakers*, in *Journal of the Audio Engineering Society*, 1971.
16. Simón Gálvez, M.F., S.J. Elliott, and J. Cheer, *Loudspeaker Arrays for Family TV*, in *ICSV 19*, 2012: Vilnius, Lithuania.
17. Jorswieck, E.A. and H. Boche, *Optimal transmission strategies and impact of correlation in multiantenna systems with different types of channel state information*. Ieee Transactions on Signal Processing, 2004. **52**(12): p. 3440-3453.
18. Fazi, F.M. and P.A. Nelson, *The ill-conditioning problem in soundfield reconstruction*, in *AES 123 Convention*, 2007.
19. Elliott, S.J., et al., *Robustness and Regularization of Personal Audio Systems*. IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing, 2012. **20**(7): p. 2123-2133.
20. Kirkeby, O., et al., *Fast deconvolution of multi-channel systems using regularisation*. Inter-Noise 96 - the 1996 International Congress on Noise Control Engineering, 25th Anniversary Congress - Liverpool, Proceedings, Books 1-6: Noise Control - the Next 25 Years, ed. F.A. Hill and R. Lawrence, 1996. 2829-2832.
21. Nelson, P.A. and S.J. Elliott, *Active Control of Sound*, 1992: Academic Press.