

OPTIMIZATION OF SOUND DIFFUSERS BASED ON SONIC CRYSTALS

PACS: 43.55.+p, 43.55.Br, 43.55.Ka

J. Redondo^{(1)(*)}, J. V. Sánchez-Pérez⁽¹⁾, X. Blasco⁽¹⁾, J. M. Herrero⁽¹⁾ & M. Vörlander⁽²⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de València, Camino de Vera S/N, 46022 Valencia, Spain

⁽²⁾ Institute of Technical Acoustics - RWTH Aachen University. Neustr. 50, 52066 Aachen, Germany

(*) fredondo@fis.upv.es

ABSTRACT

Since the invention of sound diffusers four decades ago, several alternatives have been suggested. Sonic crystals have been demonstrated to be good candidates to substitute conventional diffusers in order to overcome the need for extremely deep structures when low frequencies have to be scattered. In this work, we explore the possibility of optimizing such structures providing better performance over a large frequency range. For doing so, evolutionary algorithms have been used in combination with Finite-Difference Time-Domain (FDTD) algorithms that allow predicting the performance of a sound diffuser. Preliminary results show that diffusion can be significantly increased.

RESUMEN

Desde la invención de los difusores de sonido hace cuatro décadas se han sugerido varias alternativas. Recientemente se ha demostrado que los cristales de sonido son buenos candidatos a sustituir los difusores convencionales para evitar la necesidad de estructuras muy profundas si se quiere que sean eficaces a baja frecuencia. En este trabajo exploramos la posibilidad de optimizar este tipo de estructuras mejorando el rendimiento en baja frecuencia. Para ello, se combinan algoritmos evolutivos con Finite-Difference Time-Domain (FDTD) que permite predecir el rendimiento de un difusor de sonido. Los resultados preliminares muestran que la difusión puede ser significativamente aumentada.

INTRODUCCIÓN

Desde la invención de los difusores hace ya 40 años [1] se ha demostrado su capacidad para mejorar la difusividad, la eliminación de ecos flutter y la reducción de la coloración [2] en acústica de salas. En los últimos años, varios autores han sugerido diversas variantes al diseño original de Schroeder. Recientemente [3] se ha propuesto la utilización de cristales de sonido como difusores, lo que permite una difusión eficiente a bajas frecuencias con un espesor reducido comparado con los difusores tradicionales.

Por otra parte, los algoritmos evolutivos han sido utilizados para diseñar dispositivos basados en cristales de sonido, fundamentalmente encaminados a obtener pantallas de sonido [4-6]. En estos trabajos la optimización se ha realizado utilizando un algoritmo genético multiobjetivo para conseguir la máxima atenuación posible en un rango de frecuencias predeterminado. La aplicación de estos algoritmos evolutivos a los difusores de sonido ya ha sido ya explorada por varios autores desde finales del siglo XX, pero utilizando algoritmos monoobjetivo. En 1995

Cox [7] sugirió el uso de métodos iterativos tales como “downhill simplex” y métodos tipo “Newton” para optimizar difusores de fase. También se han utilizado técnicas de optimización para diseñar difusores comerciales basados en superficies curvas [8]. Finalmente, los difusores volumétricos basados en cristales de sonido han sido diseñados mediante optimización mono-objetivo [9], utilizando la creación de vacantes en el cristal que conforma el difusor.

Como conclusión, se puede afirmar que los algoritmos evolutivos multiobjetivo no han sido utilizados nunca en el campo de los difusores acústicos, tanto en el caso de difusores de fase, como en el de difusores basados en cristales de sonido. El propósito del presente trabajo es explorar la aplicabilidad de este tipo de optimización tomando como base los difusores basados en cristales de sonido propuestos por Redondo et al [3]. Pretendemos crear dispositivos de una profundidad reducida que trabajen en el rango de bajas frecuencias (bandas de octava de 125Hz y 250Hz).

DESCRIPCION DEL PROCESO DE OPTIMIZACION

La estructura de partida que se pretende optimizar está formada por un conjunto de 45x4 dispersores cilíndricos de radio 3.5cm, organizados en una red cuadrada con cuatro zonas de diferente parámetro de red (Figura 1.a). En dos de ellas, el parámetro de red $a=8.8\text{cm}$, y en las otras dos, $a=7.2\text{cm}$. en la Figura 1.b se muestra el incremento del valor del coeficiente de difusión de este difusor comparado con uno de residuo cuadrático QR en el rango de bajas frecuencias.

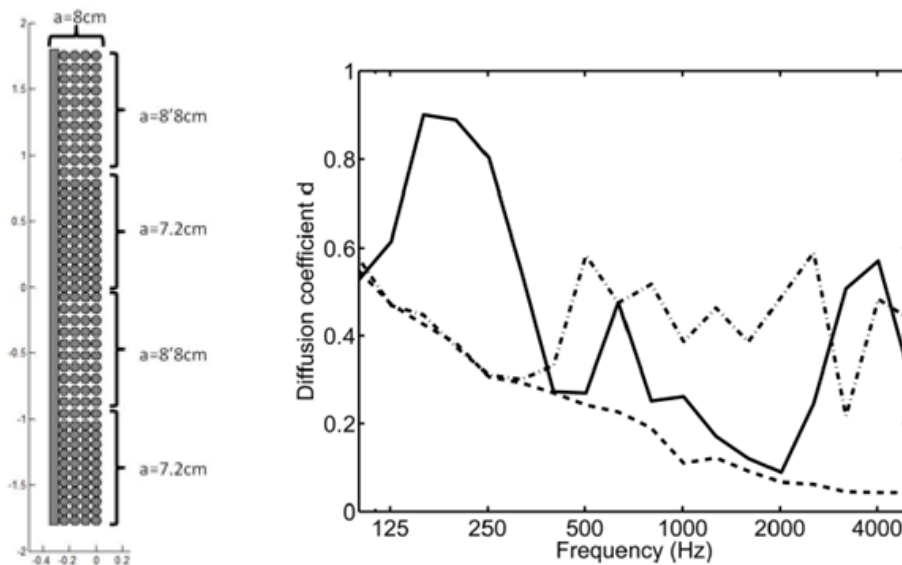


Figura 1. (a) Configuración esquemática del difusor bi-periódico basado en cristales de sonido. (b) Coeficiente de difusión frente a frecuencia: línea continua Cristal de sonido; línea discontinua, difusor de residuo cuadrático (QR) con dimensiones similares; Línea en punteada superficie plana de la misma anchura (referencia)

El primer paso para la optimización multiobjetivo realizada consiste en establecer una codificación genética para el difusor. Los individuos se codificarán mediante una serie de genes que representan el conjunto de los radios normalizados de los cilindros que conforman el cristal. Se han elegido 6 posibles valores entre 0 y 1 con pasos de 0.2. El valor 0 representa la ausencia de cilindro, mientras que el valor 1 representa el radio máximo que puede tomar un cilindro, que es igual a la mitad del parámetro de red, a . De este modo cada individuo viene dado por un genotipo que consiste en un vector de 180 elementos, igual al número de cilindros

que constituyen el cristal, variando entre 0 y 1. La Figura 2 ilustra un ejemplo del proceso de codificación del difusor.

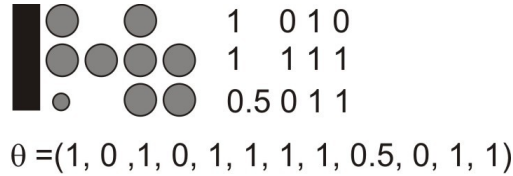


Figura 2. Ejemplo de codificación genética de un difusor basado en cristales de sonido

El siguiente paso consiste en cuantificar la idoneidad de un individuo para actuar como difusor. En este caso, se considera que la eficiencia viene dada por el valor de su coeficiente de difusión normalizado: a mayor valor de este coeficiente, más idóneo resulta el individuo. Para determinar el valor de este coeficiente se seguirá el método establecido por la norma ISO [10] para la caracterización de difusores en condiciones controladas (cámara anecoica). El esquema de medición dado por la norma es implementado en un programa de simulación basado en diferencias finitas en dominio temporal (FDTD) [11]. Mediante dicho algoritmo es posible obtener el coeficiente de difusión a partir de las mediciones de nivel de presión sonora en un semi-arco de circunferencia que rodea al difusor, mediante la siguiente expresión:

$$d'_j = \frac{(\sum_{i=1}^n p_{ij}^2)^2 - \sum_{i=1}^n (p_{ij}^2)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (p_{ij}^2)^2} \quad (1)$$

donde d'_j es el coeficiente de difusión a la j -ésima banda de tercio de octava considerada, p_{ij} es la presión acústica del sonido reflejada en dicha banda, en la dirección i -ésima, y n es el número de direcciones consideradas. Para normalizar el coeficiente entre 0 y 1 se compara con el valor obtenido para una superficie plana con la misma anchura. De este modo, el coeficiente de difusión normalizado, d_j , se define como:

$$d_j = \frac{d'_j - d_{j,ref}}{1 - d_{j,ref}} \quad (2)$$

donde $d_{j,ref}$ es el coeficiente de difusión de la superficie plana de referencia en la banda j -ésima.

A continuación se definen las Funciones de Costo (J) que se van a considerar para obtener individuos óptimos, es decir, hay que definir en qué sentido se pretende que los individuos sean óptimos. Tal y como ya se ha dicho anteriormente, el objetivo que se persigue en este trabajo consiste en diseñar estructuras basadas en cristales de sonido que sean eficientes en el rango de bajas frecuencias, dado que es para estas frecuencias donde los difusores convencionales son poco prácticos, ya que sería necesario que poseyeran una elevada profundidad para obtener una buena difusión. Por lo tanto, se trabajará en 6 bandas de tercio de octava (100Hz, 125Hz, 160Hz, 200Hz, 250Hz y 315 Hz) que definen el rango de bajas frecuencias. En adelante estas bandas se nombrarán correlativamente desde d_1 hasta d_6 . En este trabajo se proponen un total de 5 funciones de costo. Es necesario hacer hincapié en que la elección de estas funciones de costo es totalmente arbitraria, y depende del objetivo final que se persiga. Así, el objetivo puede ser la eliminación de un problema existente en una banda muy concreta de frecuencias o por lo contrario, puede interesar cubrir todo el rango de frecuencias. Debido a que el algoritmo evolutivo multiobjetivo minimiza estas Funciones de Costo, el valor cero (0) será el óptimo en todos los casos.

La primera Función de Costo que se propone es la media de todos los 6 coeficientes de difusión normalizados pero invertida para que 0 corresponda al mejor caso. Esto es:

$$J_{\text{low}}(\theta) = 1 - \bar{d} = 1 - \sum_{j=1}^m \left| \frac{d_j(\theta)}{m} \right| \quad \text{con } m=6 \quad (3)$$

La segunda Función de Costo es la desviación estándar, dado que se pretende que los difusores tengan una respuesta, en lo que se refiere a su coeficiente de difusión, tan plana como sea posible:

$$J_{\text{varlow}}(\theta) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\bar{d} - |d_j(\theta)|)^2}{m-1}} \quad \text{con } m=6 \quad (4)$$

Se definen también dos Funciones de Costo adicionales para considerar la eficiencia de forma independiente de las dos bandas de octava involucradas. Se define como la media del valor del coeficiente de difusión de las 3 bandas de tercio de octava consideradas:

$$J_{125}(\theta) = 1 - \overline{d_{125}} = 1 - \sum_{j=1}^3 \left| \frac{d_j(\theta)}{3} \right| \quad (5)$$

$$J_{250}(\theta) = 1 - \overline{d_{250}} = 1 - \sum_{j=4}^6 \left| \frac{d_j(\theta)}{3} \right| \quad (6)$$

Finalmente, para ilustrar el caso en el que sea necesario aumentar la difusión en una banda concreta en bajas frecuencias vamos a elegir de manera arbitraria la banda de tercio de octava centrada en 100 Hz. De este modo definimos una última función de coste:

$$J_{100}(\theta) = 1 - d_1 \quad (7)$$

En el proceso de optimización desarrollado se combinarán las Funciones de Costo de dos en dos, quedando así definidas tres parejas de Funciones: J_{low} y J_{varlow} ; J_{125} y J_{250} ; y finalmente J_{low} and J_{100} .

El siguiente paso del proceso de optimización consiste en generar una población inicial de manera aleatoria. En esta población se evalúan las Funciones de Costo y se detecta el conjunto inicial de los individuos óptimos. Este conjunto se conoce como frente de Pareto. Los individuos óptimos son aquellos que son dominantes sobre el resto de la población, es decir, que no existe ningún otro individuo cuyos valores de cualquiera de las dos Funciones de Costo (J) consideradas en cada caso sean menores (Figura 3).

A continuación comienza el proceso de optimización mediante el cruce de individuos. Se eligen aleatoriamente dos individuos de la población inicial y se combinan sus genes de manera aleatoria, tal y como en la naturaleza los hijos poseen aleatoriamente parte de la información genética de sus dos progenitores. Asimismo, con una cierta probabilidad, en general muy baja, se establecen mutaciones de individuos elegidos también al azar. Posteriormente se calculan los valores de las Funciones de Costo de los nuevos individuos así obtenidos. Para mantener el tamaño de la población durante todo el proceso, la aparición de nuevos individuos supone la eliminación de individuos anteriormente presentes en la población de entre aquellos que no

forman parte del frente de Pareto. Todo el proceso se repite un número finito de veces, o en otras palabras, un número de generaciones determinado.

En el presente trabajo se ha considerado una población inicial de 1000 individuos y se ha dejado evolucionar el sistema un número de generaciones del mismo orden. Cuando se observa que el frente de Pareto tiende a estabilizarse lo cual es un primer indicador de que el proceso se ha saturado y no se pueden encontrar soluciones aún mejores que las ya encontradas.

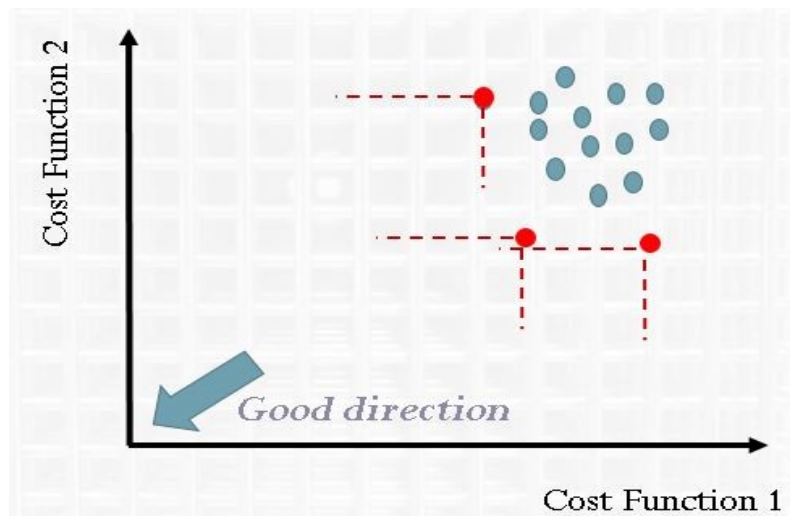


Figura 3. Representación del criterio de dominancia. Los individuos en rojo son dominantes, dado que no existe otro individuo que sea mejor para los dos criterios simultáneamente.

RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN

Como caso representativo se muestran en detalle tan solo los resultados obtenidos para la pareja J_{low} y J_{varlow} . Los resultados se han representado en la Figura 4.

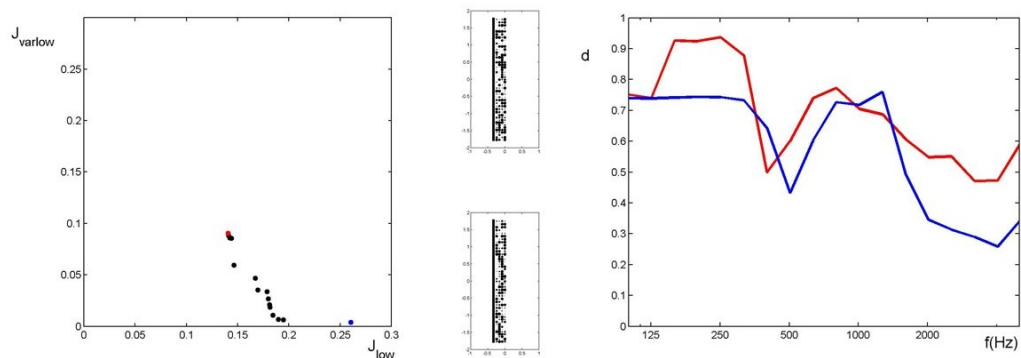


Figura 4. (a) Frente de Pareto final en el proceso de optimización; (b) los dos difusores optimizados con mejor valor de J_{low} arriba (rojo)

J_{varlow} arriba (azul); (c) coeficiente de difusión normalizado en función de la frecuencia para los dos individuos seleccionados en (b).

En la Figura 4.a se puede observar que los valores del coeficiente de difusión son muy elevados para todas las frecuencias dentro del rango de interés, ya que los valores de las Funciones de Costo son para los mejores individuos (pertenecientes al frente de Pareto), muy cercanos a cero. La Figura 4.b muestra como ejemplo la estructura final del cristal de sonido para los dos de los individuos del frente de Pareto que presentan el mayor valor de J_{low} y J_{varlow} . En la Figura 4.c se ha representado el valor del coeficiente de difusión normalizado, d , en función de la frecuencia para los dos individuos seleccionados anteriormente. Se observa claramente para frecuencias más altas (fuera del rango de optimización) aparecen mínimos locales donde el difusor no será eficiente.

Con el propósito de ilustrar el resultado de la optimización para el resto de pares de Funciones de Costo consideradas, en la Figura 5 se muestran los frentes de Pareto finales obtenidos en los tres procesos de optimización, incluyendo en todos los casos como referencia tanto el panel plano como el difusor biperiódico (BPD) que ha sido el punto de partida de este trabajo. Es evidente que en todos los casos, los individuos pertenecientes a los distintos frentes de Pareto mejoran sensiblemente la eficiencia de la difusión acústica respecto a las referencias iniciales tomadas.

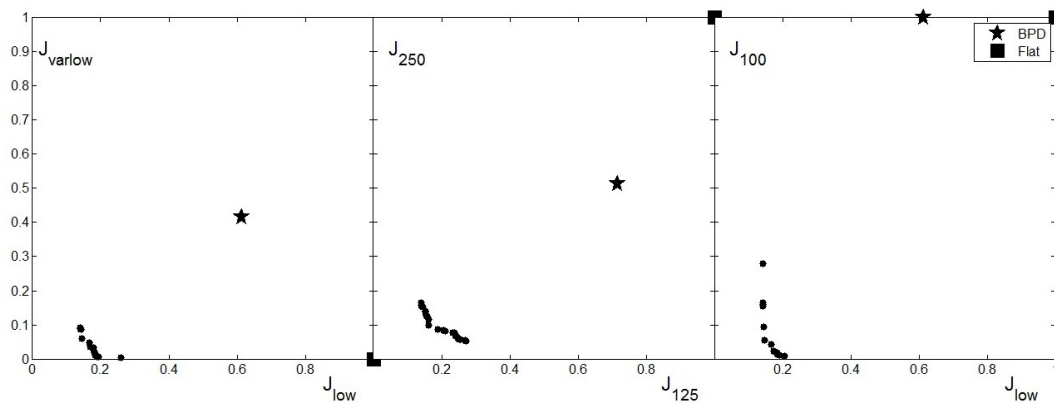


Figura 5. Frentes de Pareto de las tres parejas de funciones de coste consideradas. Como referencia se incluye el panel plano (Flat) y el difusor biperiódico no optimizado (BPD)

En el caso de la optimización con la pareja J_{low} y J_{varlow} cabe destacar que los valores de éste último son muy bajos para todos los individuos del frente, o en otras palabras, los coeficientes de difusión son muy parecidos en el rango de bajas frecuencias seleccionado. Por otra parte, el valor más bajo de J_{low} está muy cerca de 0.1, que corresponde a un valor promedio del coeficiente de difusión normalizado de 0.9, que podemos calificar de excelente. En lo que se refiere a la optimización de la pareja de Funciones de Costo J_{125} y J_{250} se observa que los valores obtenidos para J_{250} suelen ser mejores que los obtenidos para J_{125} , o en otras palabras, resulta más difícil obtener buenos resultados cuanto más baja sea la frecuencias considerada, tal y como cabía esperar. Finalmente, en el caso de la pareja J_{low} y J_{100} se muestra un comportamiento bastante singular. Es evidente que hay una mayor dispersión en los resultados para ésta última Función de Costo, lo cual es razonable dado que no se trata de una media de varias frecuencias. En general, en este último caso se puede decir que la mejora de uno de los parámetros de coste supone un deterioro del otro parámetro, si bien es cierto que este empeoramiento es mínimo.

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

En este trabajo se ha mostrado como los algoritmos evolutivos multiobjetivo pueden ser aplicables para la obtención de difusores basados en cristales de sonido más eficientes. La mejora de la difusión en los individuos finales es muy significativa para todas las funciones de coste consideradas en este trabajo. Además, se han definido tres parejas de Funciones de Costo, ilustrando dos objetivos bien diferenciados, como son la mejora general de la difusión en el rango de bajas frecuencias y su mejora particular de un rango frecuencial muy concreto.

En futuros trabajos se analizarán por una parte los criterios de selección entre los individuos “óptimos” y por otra el rendimiento de estas estructuras en campo confinado. En esta última línea ya se han iniciado una serie de experiencias evaluando parámetros objetivos y subjetivos que vengan a cuantificar el grado de mejora de la acústica de una sala producido por este tipo de estructuras.

REFERENCIAS

- [1] M.R. Schroeder, “Diffuse Sound Reflection by Maximum Length Sequences”, J. Acoust. Soc. Am. 57, No. 1, 149-150 (1975).
- [2] Cox T. J., D'Antonio P., “Acoustic absorbers and diffusers. Theory, design and application”. Second Edition, 290, Taylor&Francis, London and New York (2009).
- [3] Redondo, J.; Picó Vila, R. ;Sánchez-Morcillo, V. ; Woszczyk, W “Sound diffusers based on sonic crystals”. JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA.13 (44412 – 4412) 2013
- [4] V. Romero-García, E. Fuster, L. M. García-Raffi, E. A. Sánchez-Pérez, M.Sopena, J. Llinares, and J. V. Sánchez-Pérez, “Band gap creation using quasicrystalline structures based on sonic crystals”, Appl. Phys. Lett. 88, 174104 (2006).
- [5] V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez, L. M. García-Raffi, J. M. Herrero, S. García-Nieto, and X. Blasco “Hole distribution in phononic crystals: Design and optimization” J. Acoust. Soc. Am. 125, 3774–3783 (2009).
- [6] J. M. Herrero, S. García-Nieto, X. Blasco, V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez, L. M. Garcia-Raffi, “Optimization of sonic crystal attenuation properties by ev-MOGA multiobjective evolutionary algorithm”, Struct. Multidisc. Optim., 39, 203–215 (2009)
- [7] Cox T.J., The optimization of profiled diffusers, J. Acoust. Soc. Am., 97, 2928-2936 (1995).
- [8] Cox T. J., “Designing curved diffusers for performance spaces”, Audio Eng.Soc., 44(5), 354-364, (1996)
- [9] R. J. Hughes, J. A. S. Angus, T. J. Cox, O. Umnova, G. A. Gehring, M.Pogson, and D. M. Whittaker, Volumetric diffusers: Pseudorandom cylinder arrays on a periodic lattice, J. Acoust. Soc. Am. 128, 2847 (2010).

[10] ISO 17497-2:2012. Acoustics: Sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field.

[11] J. Redondo, R. Picó, B. Roig and M. R. Avis, Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes, Acta Acustica united with Acustica 93, 4, 611-622, (2007)