DIFUSORES ACÚSTICOS DE VÓRTICE

PACS: : 43.55.Ka, 43.55.Br, 43.58.Ta, 43.20.Fn

Noé Jiménez [1], Jean-Philippe Groby [2], Vicent Romero-García [2].

[1] *Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (i3M), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, S/N, 46022, Valencia, Spain.* nojigon@upv.es
[2] *Laboratoire d'Acoustique de la Université du Mans—CNRS UMR 6613, Le Mans, France*

Palabras Clave: Sound diffusers, Vortex beams, Spiral gratings

ABSTRACT

Metamaterials allow the accurate control of the acoustic scattering using subwavelength thickness panels. In this work, we report the scattering of spiral-shaped metasuperficies with practical application to sound diffusers. We analytically, numerically and experimentally show that bipolar spiral-shaped metasuperficies produce broadband non-specular reflection. We observe that the reflected energy can be scattered at higher diffraction orders and, due to the spiral geometry, the phase of the scattering field rotates producing a vortex in the near field. Thus, the specular component at normal incidence vanish. This produces a perfect correlation-scattering coefficient when comparing to a rigid flat reflector of same dimensions. In particular, the scattering of an Archimedes spiral metasuperficie is presented. We show that the scattering pattern corresponds to a high-order Bessel beam. The use of binary locally reacting surfaces with chiral geometry produce non-specular reflected patterns, allowing the use of these structures use as sound diffusers.

RESUMEN

En este trabajo presentamos difusores de sonido con geometría en espiral. Los diseños clásicos de difusores se basan superficies compuestas por resonadores de cuarto de longitud onda en los que la distribución espacial de estos viene dada por una secuencia numérica. En el presente diseño la quiralidad en la distribución espacial de resonadores en espiral provoca que las ondas acústicas incidentes no se reflejen de manera especular. En particular mostramos que estas superficies producen un campo reflejado con una dislocación de fase en el eje, observándose un vórtice acústico que es explotado para controlar la difusión acústica de la estructura.

1. INTRODUCCIÓN

El control de los patrones de reflexión acústicos se puede lograr usando una amplia gama de materiales y configuraciones geométricas de los mismos. Por un lado, las superficies planas inclinadas y los reflectores piramidales o curvos proporcionan una manera simple de controlar las reflexiones acústicas. Sin embargo, su rendimiento para bajas frecuencias es limitado debido a la difracción. Además, su respuesta temporal es practiamente instantánea [1]. Por otro lado, las superficies planas que reaccionan localmente compuestas de resonadores, tambien llamadas *metasuperficies*, ofrecen un rango más amplio de posibilidades para configurar y deflectar el frente de onda reflejado utilizando un espesor más pequeño que la longitud de onda. El uso de estructuras resonantes para controlar la dispersión acústica data de finales de los años 70 [2], cuando se introdujeron disposiciones de resonadores de cuarto de longitud de onda para generar reflexiones difusas, llamadas difusores de rejilla de fase. Estos materiales, llamados difusores de sonido, han encontrado una aplicación práctica en la acústica de salas y se usan ampliamente en la mayoría de los estudios de radiodifusión, auditorios modernos, grabación de música, control y salas de práctica [1].

Recientemente, los metamateriales han permitido el diseño de difusores de sonido de espesor reducido empleando propagación lenta [3] o resonadores de Helmholtz [4]. Normalmente, los resonadores de los difusores están dispuestos en una matriz cuadrada, aunque se han sugerido patrones hexagonales. En este trabajo, presentamos las propiedades de dispersión de estructuras en forma de espiral para ser utilizadas como difusores de sonido. Hacemos uso de curvas en espiral para producir un patrón binario (bipolar), siendo cada zona del patrón adaptada usando metamateriales para lograr la inversión de fase entre las dos zonas.

En particular, presentamos las propiedades de dispersión de estructuras espirales de Arquímedes regulares, que muestran la simetría quiral. Los patrones en espiral se han aplicado para generar placas de difracción que producen haces de vórtice en ambos, acústica y óptica. En acústica, las espirales de Arquímedes han sido recientemente estudiadas en transmisión, mostrando que las ondas transmitidas son localmente difractadas produciendo frentes de onda cónicos con dislocaciones de fase, produciendo así haces de Bessel de alto orden [5-8]. Estas estructuras producen haces de vórtice en el campo cercano, donde su carga topológica es igual al producto del orden de difracción y el número de brazos de la espiral. Las redes espirales también se han utilizado para distribuir los elementos activos de las matrices de fase para terapia de ultrasonidos biomédica y aplicaciones de imágenes. Sin embargo, en problemas de reflexión las estructuras en espiral se ha explorado mucho menos.

2. DIFUSORES BASADOS EN LA ESPIRAL DE ARQUÍMEDES

La espiral de Arquímedes es un caso particular de la familia de espirales Arquimedianas que viene dada por la curva polar

$$r(\theta) = a\theta^{\gamma} \tag{1}$$

donde r es la coordenada radial, θ el ángulo polar y a la distancia de separación entre curvas. El exponente γ define la tasa de crecimiento: para $\gamma > 1$ la espiral diverge mientras que para $0 < \gamma < 1$ la espiral converge a un radio dado y la distancia entre giros sucesivos disminuye con cada giro. Para la espiral de Arquímedes, $\gamma = 1$, es decir, la distancia entre giros sucesivos permanece constante. La estructura binaria propuesta está compuesta por un panel plano circular donde la curva en espiral de Arquímedes se usa para separar 2 ranuras, como lo muestra la Fig. 1 (a). Consideramos que la superficie reacciona localmente. En la primera área, una ranura recto a modo de perforación resuena en modo cuarto de resonador de longitud de onda. En la otra zona, se ha diseñado un resonador Helmholtz. La Fig. 1 (a) muestra la geometría de la metasuperficie diseñada, mientras que en la Fig. 1 (b) mostramos la fase del coeficiente de reflexión en función de la frecuencia. Podemos observar que el primer resonador invierte la fase

del coeficiente de reflexión con respecto al segundo resonador en un amplio rango de frecuencias. Esto permite la generación de la metasuperficie binaria.

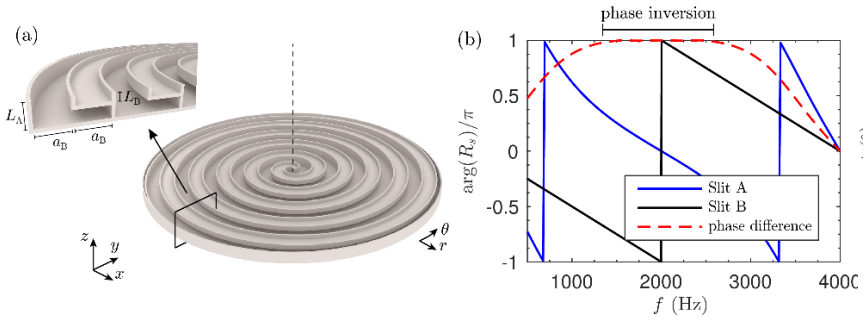


Figura 1. (a) Esquema de la geometría para el difusor de sonido de espiral de Arquímedes. El panel binario está compuesto por 2 rendijas (A, B), que resuenan en modo QWR y otra ranura que resuena en su resonancia de Helmholtz. (b) Fase del coeficiente de reflexión de ambas áreas (azul y negro) y diferencia de fase (rojo discontinuo).

La Fig. 2 (e-g) muestra la el patron de scattering en campo lejano para las frecuencias 1500, 2000 y 2500 Hz, donde el anillo característico de los haces de Bessel (de orden superior) es claramente visible. Además, la fase del campo disperso gira con cada giro: el campo disperso transporta un momento orbital angular. Se debe prestar especial atención al orden de difracción cero: la componente especular. Para estas estrucuras la primera componente de la transformada espacial de Fourier del coeficiente de reflexión dependiente del espacio es cero, por lo tanto, estas estructuras binarias no presentan reflexión especular. El patron de scattering en campo lejano para todas las frecuancias se muestra en la Fig. 3 (c). Como la distancia entre giros es constante, a, las ondas se difractan localmente con un ángulo $\beta = \sin^{-1} na / \lambda$, siendo λ la longitud de onda de la onda incidente y n el orden de difracción Esto produce un frente de onda cónico que en el campo lejano genera los anillos característicos de un haz de Bessel.

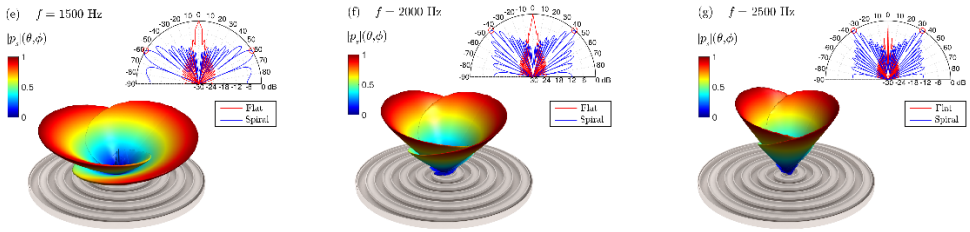


Figura 2. (e-g)Patron de scattering en campo lejano para 1500, 2000 y 2500 Hz, respectivamente.

Para cuantificar el rendimiento de la estructura es útil calcular el coeficiente de correlación de scattering, σ_ϕ [1]. Este coeficiente mide la correlación entre el patron de scattering de la estructura y la producida por un panel reflector plano de mismas dimensiones. Por lo tanto, valores cercanos a cero indican que la raflexión es principalmente especular, mientras que valores cercanos a la unidad indican que la energía se extiende en otras direcciones en lugar de especular. El coeficiente de correlación de scattering en función de la frecuencia se muestra en la Fig. 3 (d). Observamos que la ausencia de reflexión especular hace que este índice sea la unidad, esto ocurre para las frecuencias donde existe una diferencia de fase entre las dos zonas de la espiral, es decir, cuando el coeficiente de reflexión del resonador de cuarto de onda es $R = -1$.

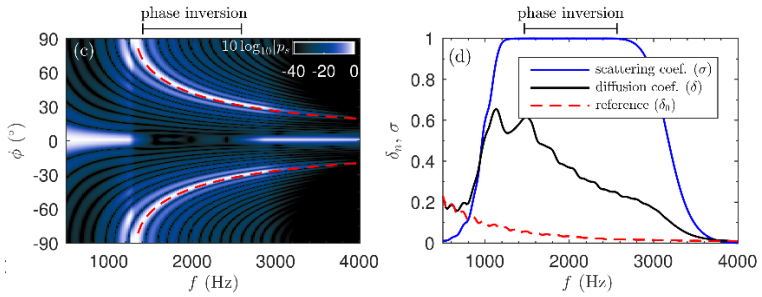


Figura 3. (c) Presión dispersa de campo lejano en función de la frecuencia y el ángulo de elevación. La línea punteada roja marca el primer ángulo de rejilla de difracción axisimétrico. (d) (azul) Coeficiente de dispersión, coeficiente de difusión (negro) del panel espiral y coeficiente de difusión (rojo punteado) de un reflector de referencia de la misma área.

Otra forma de cuantificar el rendimiento de la estructura acústica es calcular el coeficiente de difusión, que es importante en aplicaciones prácticas de estas metasuperficies en acústica de salas. Este coeficiente mide la uniformidad de la dispersión, siendo la unidad cuando no hay una dirección de reflexión privilegiada, y cero cuando toda la energía se refleja en una sola dirección. El coeficiente de difusión normalizado a la de un plano plano se muestra en la Fig. 3 (d). El coeficiente de difusión alcanza valores moderados, puesto que la energía se dispersa en un pequeño rango de ángulos de elevación, dados por la diffracción de rejilla. Esto se debe a la uniformidad de la espiral de Arquímedes, cuya distancia de separación entre giros sucesivos es constante. Se han caracterizado difusores basados en espirales de Arquímedes generalizadas, en los la separación entre brazos no permanece constante. De esta manera se logra elevar el valor del coeficiente de difusión mientra que el coeficiente de scattering se mantiene en la unidad.

3. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que usando metasuperficies en forma de espiral de Arquímedes se producen patrones de reflexión de Bessel de orden superior, es decir, vórtices acústicos. Debido al efecto de la red de difracción, en el campo lejano el patron de radiación se conforma en un conjunto discreto de ángulos que forman un frente de onda cónico. Debido a la simetría quiral de la estructura se produce un vórtice en el campo cercano, lo que provoca que la reflexión especular desaparezca. Además, sumando el carácter estético de los patrones en espiral, estas estructuras tienen potencial para su aplicación acústica de como difusores de sonido.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Generalitat Valenciana a través del contrato APOSTD/2017/042 y las subvenciones para la realización de proyectos de I+D+i desarrollados por grupos de investigación emergentes GV/2018/011.

Referencias

[1] T. J. Cox and P. D'antonio, Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. Crc Press, 2009.
[2] M. R. Schröder, "Diffuse sound reflection by maximum- length sequences," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 57, no. 1, pp. 149–150, 1975.
[3] N. Jiménez, T. J. Cox, V. Romero-García, and J.-P. Groby, "Metadiffusers: Deep-subwavelength sound diffusers," Scientific reports, vol. 7, no. 1, p. 5389, 2017.
[4] Y. Zhu, X. Fan, B. Liang, J. Cheng, and Y. Jing, "Ultrathin acoustic metasuperficie-based schroeder diffuser," Physical Review X, vol. 7, no. 2, p. 021034, 2017.
[5] N. Jiménez, R. Picó, V. Sánchez-Morcillo, V. Romero-García, L. M. García-Raffi, and K. Staliunas, "Formation of high-order acoustic bessel beams by spiral diffraction gratings," Physical Review E, vol. 94, no. 5, p. 053004, 2016.

[6] N. Jimenez, V. Romero-García, R. Pico, A. Cebrecos, V. J. Sánchez-Morcillo, L. Garcia-Raffi, J. V. Sánchez-Pérez, and K. Staliunas, Acoustic Bessel-like beam formation by an axisymmetric grating. Europhys. Lett. 106, 24005 (2014).
[7] N. Jiménez, V. Romero-García, R. Picó, L. M. García-Raffi, and K. Staliunas, Nonlinear focusing of ultrasonic waves by an axisymmetric diffraction grating embedded in water. Appl. Phys. Lett. 107, 204103 (2015).
[8] N. Jiménez, V. Romero-García, L. M. García-Raffi, F. Camarena, K. Staliunas. Sharp acoustic vortex focusing by Fresnel-spiral zone plates. Applied Physics Letters, 112(20), 204101. (2018)