

USO DE ORDENAMIENTOS CUASI-FRACTALES PARA LA MEJORA DEL RENDIMIENTO ACUSTICO DE PANTALLAS BASADAS EN CONJUNTOS DE DISPERSORES RIGIDOS AISLADOS

PACS: 43.50.Ki

Castiñeira-Ibáñez, Sergio¹; Rubio, Constanza², Sánchez-Pérez, Juan Vicente²

¹*Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 València, Spain, EU, sercasib@mat.upv.es*

²*Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 València, Spain EU, crubiom@fis.upv.es, jusanc@fis.upv.es*

ABSTRACT

In recent years, an interesting alternative to classical screens, formed by continuous media, is the use of arrays of isolated scatterers immersed in air, known as Sonic Crystals. Recent works have shown that the redistribution of rigid scatterers in air based on fractal geometries arrangements lead to increased attenuation bands obtained by Bragg diffraction phenomenon. This paper presents a theoretical study, experimentally verified, and devoted to quantify the increase in attenuation bands of a set of isolated rigid cylindrical scatterers arranged following along 2D fractal geometries.

RESUMEN

En los últimos años, una alternativa interesante a las pantallas clásicas es el uso de redes de dispersores aislados inmersos en aire, conocidos como cristales de sonido. Trabajos recientes han demostrado que la redistribución de los dispersores que forman el cristal de sonido sobre la base de geometrías fractales llevan al aumento de las bandas de atenuación obtenidas mediante el fenómeno de la difracción Bragg. En este trabajo se presenta un estudio teórico, verificado experimentalmente, dedicado a cuantificar el aumento de las bandas de atenuación de un conjunto de dispersores cilíndricos rígidos y aislados dispuestos siguiendo una geometría fractal 2D.

INTRODUCCION

Una de las soluciones para el control de ruido en la fase de transmisión viene dada por la utilización de barreras acústicas. En los últimos años, la posibilidad de manipular el sonido a través de estructuras periódicas motivó la idea de utilizar estos medios como una alternativa a la barrera acústica clásica [1]. Estas estructuras periódicas son los cristales de sonido [2]. Estos sistemas presentan una propiedad interesante que permiten su uso como barrera acústica: la existencia de bandas de frecuencias en las que el sonido no se transmite a través del cristal,

denominadas bandas de atenuación acústica. El mecanismo físico que subyace en este fenómeno consiste en la existencia de interferencias destructivas debidas a la difracción Bragg, es decir, a un proceso de dispersión múltiple relacionado con la periodicidad del sistema. Sin embargo, este fenómeno no es suficiente para asegurar una alta eficiencia de una barrera acústica basada en cristales de sonido aunque un aumento de la efectividad de la difracción Bragg sería deseable para diseñar una pantalla más eficiente. En los últimos años, se han desarrollado nuevas formas de maximizar el efecto de la difracción Bragg en conjuntos de dispersores aislados utilizando nuevos ordenamientos diferentes a las simetrías cristalinas típicas, basados en el concepto de hiperuniformidad [3]. Así, se ha desarrollado una técnica en dos pasos de maximización del efecto de la difracción Bragg siguiendo ordenamientos fractales [4]. En este trabajo se muestra la caracterización acústica de estructuras basadas en dispersores aislados realizadas siguiendo ordenamientos fractales [5].

CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE LAS PROPIEDADES DE LAS BANDAS DE ATENUACION PARA GRUPOS DE DISPERSORES ACÚSTICOS AISLADOS DISPUESTOS SEGÚN GEOMETRÍAS FRACTALES

En este apartado se presenta un estudio teórico, verificado experimentalmente [5] dedicado a cuantificar el aumento en el tamaño de las bandas de atenuación de un conjunto de dispersores aislados rígidos dispuestos siguiendo una geometría fractal 2D. Dado que los niveles de iteración no pueden ser elevados debido a la imposibilidad física de llegar al infinito las estructuras 2D que se analizan se denominan cuasi-fractales. En este trabajo se analiza el triángulo de Sierpinski, cuya construcción se muestra en la Figura 1.

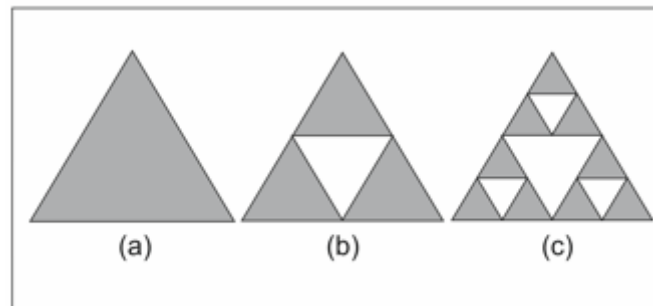


Figura 1: El recuadro muestra la construcción del triángulo de Sierpinski.

El estudio realizado se organiza para cada caso en tres fases: en primer lugar, se miden las variaciones en las propiedades de las bandas de atenuación durante todo el proceso de crecimiento de una estructura cuasi-fractal creada a partir de una estructura inicial, denominada clúster. En este proceso de crecimiento el grupo de partida, clúster inicial, se repite tantas veces como sea necesario siguiendo la geometría fractal seleccionada. En segundo lugar, se sigue un crecimiento cristalino clásico, también a partir del clúster inicial. En este caso, lo habitual es hacer traslaciones y rotaciones del clúster inicial. Ambos procesos de crecimiento tienen que parar en el cuarto nivel para el triángulo de Sierpinski ya que existe una limitación en el tamaño de las estructuras creadas debido a la capacidad computacional y experimental de que se dispone. En tercer lugar, se comparan cuantitativamente las propiedades de las bandas de atenuación de ambos tipos de muestras, cuasi-fractal y cristalina con el mismo nivel de crecimiento. Para ello hay que tener en cuenta que el tamaño de la muestra debe ser el mismo y además con la misma forma externa. Los cálculos teóricos se han llevado a cabo utilizando el Método de los Elementos Finitos (FEM) mediante el programa comercial Comsol Multiphysics 3.5a.

CALCULOS TEORICOS

Se ha elegido un clúster de inicio formado por tres cilindros de aluminio con un radio de 0,02 m como dispersores. Estos cilindros están dispuestos de acuerdo con un patrón triangular con parámetro de red de 0,0635 m. Para cuantificar las propiedades de atenuación de las muestras consideradas se ha utilizado el parámetro área de atenuación (AA) [6] en el rango analizado de frecuencias (0-6500 Hz) y a lo largo del eje OX (Γ_X -dirección del SC). Se utiliza también el parámetro factor de llenado (ff), que representa el volumen ocupado por el medio dispersor respecto al volumen total de la muestra. Para analizar la capacidad de atenuación de las muestras, en la Figura 2 se ha representado AA como una función del ff para las distintas muestras analizadas. Como todas ellas tienen su forma exterior triangular, debido a la geometría fractal elegida y en cada nivel de crecimiento, el área ocupada por estas es la misma, es posible comparar los tamaños de las bandas de atenuación para cada pareja del mismo nivel. Se utiliza como notación para diferenciar las muestras entre si dos letras y un número. Las dos letras hacer referencia al tipo de muestra y el número, al nivel de iteración del crecimiento correspondiente. En la Tabla 1 se indica el significado de los códigos utilizados. Por lo tanto, las parejas de MC1-MF1, MC2-MF2, MC3-MF3, MC4-MF4 tienen un área ocupada igual, que es mayor cuando el nivel de crecimiento (1, 2, 3 y 4 ascendente) es mayor. El valor numérico de estas áreas ocupadas se muestra en la Figura 2 debajo de la vista de la sección transversal de cada muestra cristalina considerada.

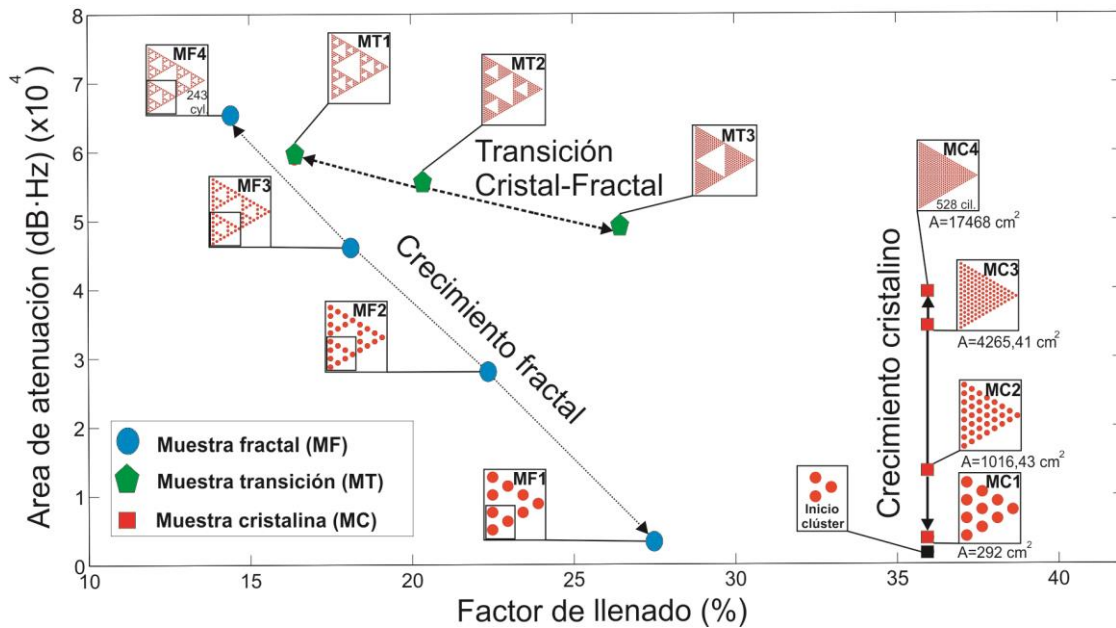


Figura 2: Capacidad de atenuación (AA) frente al factor de llenado (ff %) de ambos procesos de crecimiento considerados: crecimiento cristalino (cuadrados rojos conectados por un línea negra continua) y crecimiento cuasi-fractal (círculos azules conectados por una línea punteada negra). Además, se indica el proceso que se ha llamado transición cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea discontinua negra). También se presenta una vista de la sección transversal de cada muestra, incluyendo la muestra que inicia (clúster) el proceso. Las áreas ocupadas aparecen en cada muestra cristalina. El resto de muestras les corresponde un valor de área ocupada igual al de la muestra cristalina que tenga la misma numeración.

Código de la muestra	Significado
MC	Muestra crecimiento cristalino
MF	Muestra crecimiento cuasi-fractal
MT	Muestra transición cristalina-fractal

Tabla 1: Nomenclatura utilizada para las diferentes muestras analizadas.

En la Figura 2 se muestran ambos casos de crecimiento, cristalino y cuasi-fractal. A la derecha, se puede observar el patrón de crecimiento de las muestras cristalinas a partir del clúster (cuadrados conectados por una línea continua negra). En este caso, el ff se mantiene constante durante todo el proceso de crecimiento (36%), mientras que las AA aumentan al mismo tiempo que el área de las muestras, siendo este el comportamiento típico de un crecimiento cristalino. Así, la muestra cristalina más grande (MC4) que está formada por 528 cilindros, ocupa un área $A = 17468 \text{ cm}^2$, posee un valor de AA igual a $39580 \text{ Hz}\cdot\text{dB}$. Por otro lado y a la izquierda de la gráfica, se puede observar el patrón de crecimiento de las muestras cuasi-fractales (círculos conectados por una línea de puntos negro). En el caso cuasi-fractal, la tendencia observada en el proceso de crecimiento indica una disminución del ff , de 28% al 14%, mientras que el AA se incrementa significativamente en este proceso de $3158 \text{ Hz}\cdot\text{dB}$ (MF1) a $64954 \text{ Hz}\cdot\text{dB}$ (MF4). Por lo tanto la capacidad de atenuación de la muestra MF4 supera claramente el valor obtenido por la muestra cristalina equivalente (MC4) siendo un 164% mayor. Por otra parte, la muestra MF4 está formada por 243 cilindros, que representa una disminución de dispersores respecto a la muestra MC4 de un 46%. Los resultados numéricos para ambos casos se muestran en la Tabla 2.

Estructura	Número de dispersores	AA (dB·Hz)	ff%
MC4	528	39580	36
MF4	243	64954	14

Tabla 2: Capacidad de atenuación de las dos muestras mayores del crecimiento cristalino (MC4) y crecimiento fractal (MF4), siendo el área ocupada por ambas muestras la misma (17468 cm^2).

Los resultados obtenidos muestran que en sólo cuatro niveles de crecimiento, las propiedades de atenuación de las muestras cuasi-fractales han mejorado significativamente utilizando menos dispersores que en el caso cristalino. Además, en el gráfico de la Figura 2 se puede observar la transición en el proceso de crecimiento cristal-fractal (pentágonos verdes conectados por una línea de trazos negro). En esta transición, que puede ser entendida como la creación del cuasi-fractal MF4 a partir de una muestra cristalina completa (MC4), donde las muestras MT3, MT2, MT1 y MF4 son los cuatro niveles de los cuasi-fractales creados, se puede observar la disminución del ff mientras aumenta el AA, manteniendo constante el área externa a lo largo de la transición.

VALIDACION DE LOS RESULTADOS NUMERICOS REALIZADOS

Los experimentos, realizados para determinar la validez de los resultados analíticos, se han llevado a cabo en la cámara anecoica ($8 \times 6 \times 3 \text{ m}^3$) perteneciente al Centro de Tecnologías Físicas de la Universitat Politècnica de València. Los resultados de su calibración y sus principales características se pueden consultar en la referencia [7]. A continuación se muestran los resultados experimentales del triángulo de Sierpinski. Finalmente, se validan los resultados teóricos mediante la comparación con los resultados experimentales.

En el recuadro de la Figura 3(a) puede verse una vista de la sección transversal del clúster utilizado. Al lado de esta forma, en la Figura 3(a) se muestra la estructura cuasi-fractal formada a partir de la agrupación de partida (clúster) y la muestra experimental construida para validar la resultados teóricos, hasta el cuarto nivel fractal. Se ha obtenido la presión en un punto situado a 1 m detrás de la muestra de acuerdo con el esquema que se muestra en el recuadro de la Figura 3(b) En esta figura, además, se muestra la comparativa entre el espectro experimental y el teórico, donde puede verse la buena concordancia entre los resultados, que permite validar el modelo teórico utilizado y los resultados obtenidos.

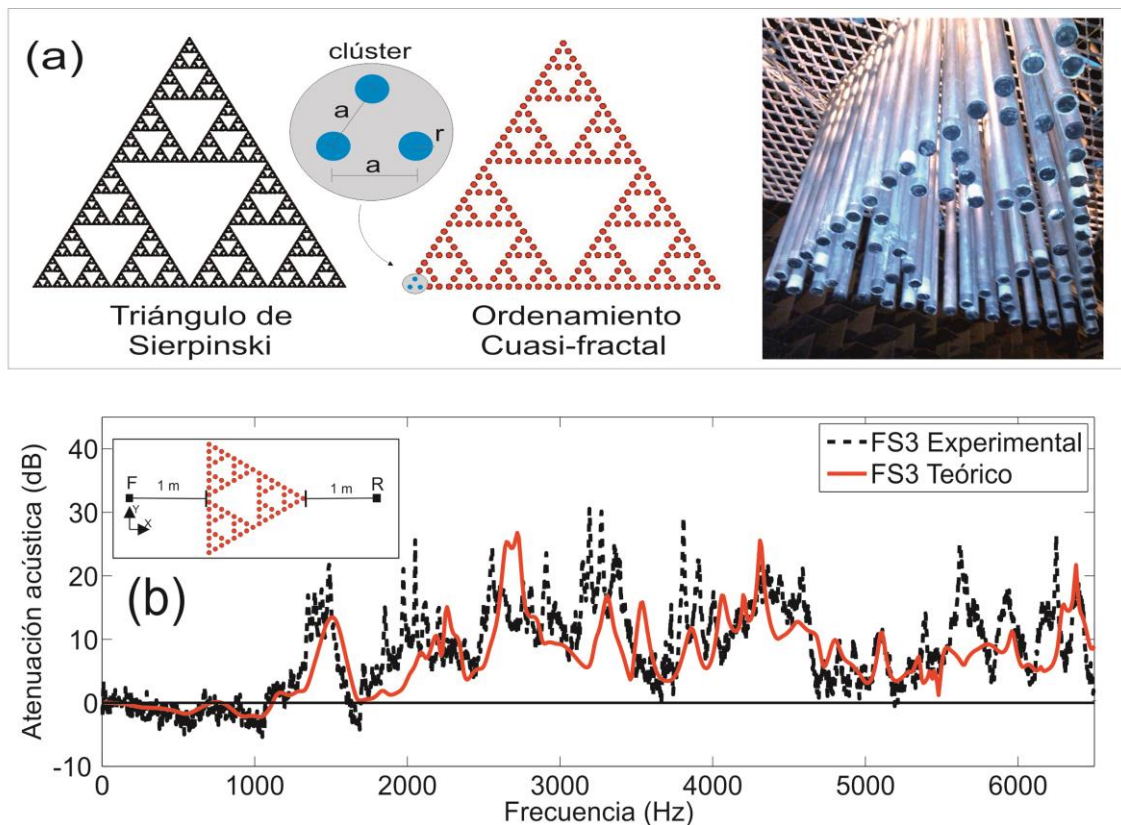


Figura 3: (a) La geometría fractal triángulo de Sierpinski hasta el quinto nivel. Al lado está la vista en sección transversal de la disposición cuasi-fractal más grande de cilindros considerado (cuarto nivel fractal). La imagen es de la muestra experimental utilizada para las mediciones. En el recuadro se puede ver el clúster de comienzo considerado; (b) Comparación de los espectros de atenuación acústica (IL) (dB) obtenido (i) teóricamente por medio de Elementos Finitos (línea continua roja) y (ii) de forma experimental (línea negra discontinua) para una orientación 0° en la geometría cristalina.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado cuantitativamente que ordenando los dispersores siguiendo geometrías fractales se obtienen bandas de atenuación mayores que si se ordenan siguiendo crecimientos cristalinos. Para ello, se han comparado los resultados de atenuación, usando el parámetro AA obtenido para un conjunto de cilindros inmersos en aire dispuestos según geometrías fractales o cristalinas (triangular).

Estos resultados confirman que:

- en el caso de un conjunto de dispersores dispuestos siguiendo un patrón fractal, se produce un rápido aumento en las propiedades de atenuación en comparación con el caso cristalino;
- si un dispositivo formado por un conjunto de dispersores tiene que ocupar un área predeterminada, una disposición cuasi-fractal proporciona mucha más atenuación utilizando menos dispersores que si los dispersores están dispuestos siguiendo un patrón cristalino.

Estos resultados pueden ser tecnológicamente relevantes para diseñar dispositivos de control de ondas más competitivos, que utilizarían ordenamientos cuasi-fractales, con respecto a otros dispositivos basados en diferentes principios físicos. Estos dispositivos son ya una realidad. Actualmente existen pantallas acústicas basadas en cristales de sonido con ordenamientos cuasi-fractales que han sido homologadas [8] y que pueden competir en el mercado con las pantallas tradicionales.

REFERENCIAS

- [1] Sánchez-Pérez J. V., Rubio C., Martínez-Sala R., Sánchez-Grandía R. and Gómez V., Appl. Phys. Lett **81**(27), 5240-5242 (2002)
- [2] Martínez-Sala R., Sancho J., Sánchez-Pérez J. V., Llinares J., Meseguer F., Nature (London) **387**, 241 (1995)
- [3] Florescu M., Torquato S. and Steindhardt P., Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **106**, 20658 (2009)
- [4] Castiñeira-Ibáñez S., Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V., and Garcia-Raffi L. M., E.Phys.Lett. **92**, 24007 (2010)
- [5] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Redondo J. and Sánchez-Pérez J.V., Appl. Phys. Express **7**, 042201 (2014)
- [6] Sánchez-Pérez J. V., Rubio C., Martínez-Sala R., Sánchez-Grandía R. and Gómez V., Appl. Phys. Lett **81**(27), 5240-5242 (2002)
- [7] Rubio C., Sánchez-Pérez J. V., Martínez-Sala R. and Cervera F., Medida de las características de campo libre de una cámara anecoica. Tecnicacústica, 96-98 (1997)
- [8] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Romero-García V., Sánchez-Pérez J.V. and Garcia-Raffi L.M., Archives of Acoustics **37**(4), 455-462 (2012)