

APLICACIÓN DEL ÁLGEBRA BORROSA A EVALUACIÓN DE LA DIFUSIÓN DEL CAMPO ACÚSTICO

PACS:43.55.Br

Ferri García, Marcelino; Redondo Pastor, F. Javier; Ramis Soriano, Jaime
Departamento de Física Aplicada; Escuela Politécnica Superior de Gandía
Universidad Politécnica de Valencia
Carretera Nazaret-Oliva s/n
46730 Grao de Gandia. Valencia
Tel: 962 849 314 - 962 849 300
Fax: 962 849 309
E-mail :mferri@fis.upv.es; fredondo@fis.upv.es; jramis@fis.upv.es

ABSTRACT

In room acoustics one of the most relevant properties of the acoustic field is its diffusion. There are commonly used parameters, depending on sound pressure level measures made with directive microphones, that perform an approach to the knowledge of diffusion. In this work, we present a model, based on Fuzzy logic algorithms, that integer the information given by four microphones with different directivity (omnidirective, cardioid, hipercardioid, and "eight- shaped") to get a global index of acoustic field diffusion in one point.

RESUMEN

En el ámbito del diseño acústico de recintos, resulta de gran interés cuantificar el grado de difusión del campo acústico en una región confinada, o un punto de la misma. Existen parámetros que posibilitan una aproximación al conocimiento de la difusión a partir de la medida del nivel de presión sonora con micrófonos directivos. En el presente trabajo se presenta un modelo, basado en la teoría de conjuntos borroso ("Fuzzy logic"), que permite integrar la información de la medida del nivel de presión sonora efectuada con cuatro micrófonos de diferentes directividades (omnidireccional, en "ocho", cardiode e hipercardiode), para dar un índice global del grado de difusión de un recinto en un punto.

INTRODUCCIÓN

La difusión del campo acústico en un recinto es un concepto amplio, difícil de medir e incluso definir. Tenemos un modelo de campo difuso ideal, y para estimar la "similitud" de un campo real con este modelo existen infinidad de parámetros relacionados con diferentes magnitudes acústicas. Algunos de estos parámetros inciden sobre las propiedades "temporales" del campo; otros se definen en función de las características espaciales o homogeneidad del campo en diversos puntos, otros hacen referencia a las características directivas (omnidireccionalidad), e incluso se tienen en cuenta las variaciones en el dominio de la frecuencia de la señal medida en un punto respecto a la emitida (coloración de la señal, ausencia de modos propios, etc.)

En el presente estudio se trata de estimar el grado de difusión de un recinto a partir de las medidas efectuadas en un determinado punto del campo acústico con micrófonos comerciales

con diferentes diagramas polares de directividad. Se trata pues de una estimación rápida de la difusión, que no tiene en cuenta efectos tales como la evolución temporal del nivel (curva de caída del nivel) o su distribución a lo largo del campo, etc.

La estimación de la difusión vendrá dada por un índice, calculado con algoritmos de álgebra borrosa, a partir de los niveles medidos con los siguientes tipos de micrófono:

- Omnidireccional
- Cardioide
- Hipercardioide
- Bidireccional

Dicho índice, al que llamaremos I_{fuzz} tomará el valor 0 en el campo difuso ideal y aumenta su valor al disminuir la difusión.

EL MODELO Y SU CAMPO DE APLICACIÓN

La práctica de medir con micrófonos con diferentes diagramas polares y comparar con la medidas efectuadas con un micrófono omnidireccional, ha sido utilizada como estimación de la difusión del campo sonoro en un punto. Sin embargo, pueden darse numerosas situaciones en las que, midiendo en puntos del campo con muy diferentes grados de difusión, se obtenga el mismo valor del nivel medido con un determinado micro (ej. cardiode)

La utilización conjunta de varios tipos de micrófono con diferentes directividades evita, en principio, este inconveniente; al reducir la posibilidad de que distintos campos den lugar a medidas iguales en todos ellos. Evidentemente, cuanto mayor sea el número de micros diferentes utilizados, y más distintos sean entre sí sus diagramas polares, más capacidad se tendrá de caracterizar el campo acústico en un punto dado.

Lo que ya no resulta evidente es como integrar la información aportada por todas las medidas en un índice global que tenga una relación directa con la difusión. Para resolver este problema se ha juzgado conveniente utilizar algoritmos basados en la teoría de conjuntos borrosos (Fuzzy).

En la etapa de diseño del algoritmo, el índice global de difusión I_{fuz} , que se obtiene a partir de la medida efectuada por los cuatro tipos de micrófono citados, se compara con el índice de heterogeneidad 'IH', que hace referencia al grado de "omnidireccionalidad" del campo y se define en el apartado "Optimización del Modelo"

El Modelo:

A continuación se destacan los elementos fundamentales algoritmo. Algunos de los cuales, junto con su terminología asociada, relacionada con conceptos fundamentales del Álgebra Borrosa, serán definidos conforme se vaya mencionado su implicación en el modelo propuesto:

- Variables de entrada
- Variables consideradas en las premisas Fuzzy
- Conjuntos borrosos asociados a cada variable
- Premisas, condiciones, inferencias o antecedentes
- Funciones asociadas a cada premisa (consecuencias)
- Predicción: Índice Fuzzy I_{fuz}

Variables de entrada: Son las siguientes

- L8 [4'77, ∞): Diferencia entre el nivel de presión medido por un micrófono en "ocho" y el medido por un omnidireccional, menos la eficiencia media de energía del primero expresada en dB

$$Lc = Lp_{(medido\ en\ 'ocho')} - Lp_{(omnidireccional)} - 10 \cdot \log(DE)$$

- Lc [4'77, ∞): Análogamente

$$Lc = Lp_{(medido\ en\ cardioide)} - Lp_{(omnidireccional)} - 10 \cdot \log(DE)$$

- Lh [6'02, ∞): Análogamente

$$Lh = Lp_{(medido\ en\ hipercárdide)} - Lp_{(omnidireccional)} - 10 \cdot \log(DE)$$

Nótese que las tres variables se anulan en un campo ideal omnidireccional, son positivas si la energía llega al micrófono preferentemente desde aquellas direcciones en las que éste tiene una eficiencia mayor a la media y negativas en caso contrario.

Las variables Lc y Lh guardan una importante correlación en la mayoría de campos estudiados; no obstante, se incluyen ambas como independientes en el modelo; por no considerarse necesario el disminuir la complejidad del mismo a un número menor de tres variables, atendiendo a la calidad y rapidez de cálculo del ajuste.

Conjuntos borrosos asociados a cada variable:

Definamos previamente este concepto: Un conjunto borroso 'A' está formado por una serie de valores de una variable 'x' que comparten una determinada característica (ej ser "pequeños"), se caracterizan por una función de pertenencia $\mu_A(x)$ que asocia a cada elemento 'x₀' de 'x' un número real en el intervalo]0,1] que representa el grado de pertenencia de 'x₀' en 'A'.

En general, cuanto mayor es el valor de la función de pertenencia, mayor es la evidencia de que x₀ pertenece a 'A'.

En el presente modelo, se proponen dos conjuntos borrosos para cada variable: conjuntos pequeños (A_{i1}) y grandes (A_{i2}), con funciones de pertenencia trapezoidales como las de la figura. Este tipo de funciones quedan completamente definidas conociendo la altura de las mismas, que se fijará en un valor 1, y las abscisas de las discontinuidades de la pendiente, que se someten a un proceso de optimización.

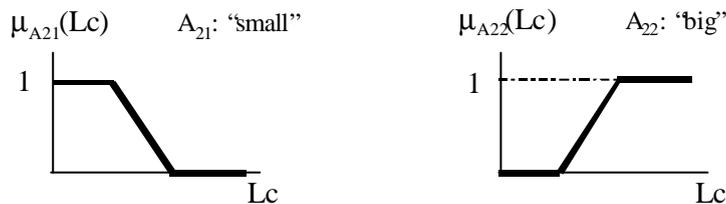


Fig. 1. Conjuntos borrosos relativos a la variable Lc

Condiciones, inferencias o antecedentes

Primeramente definiremos las operaciones elementales -'y'(\cap), 'o'(\cup)- entre conjuntos borrosos:

$$O : \mathbf{m}_{A_1 \cup A_2}(x) = \max(\mathbf{m}_{A_1}(x), \mathbf{m}_{A_2}(x))$$

$$Y : \mathbf{m}_{A_1 \cap A_2}(x) = \min(\mathbf{m}_{A_1}(x), \mathbf{m}_{A_2}(x))$$

Para describir el fenómeno real, se subdivide el espacio n-dimensional (donde n es el número de variables consideradas) en una serie de hiperconjuntos borrosos que surgen de la intersección de los conjuntos definidos para cada una de las variables. Dentro de cada uno de ellos, el fenómeno se expresa con una determinada función. Estos conjuntos intersección son definidos con las premisas Fuzzy de tipo 'y'. Veamos un ejemplo:

Si L8 es A₁₁ y Lc es A₂₁ y Lh es A₃₁ (k-ésima premisa Fuzzy)

... entonces

$$Ifuz_k = f_k(L8, Lc, Lh) \quad (\text{consecuencia})$$

La consecuencia de una premisa Fuzzy es tan cierta como su antecedente, de este modo la k-ésima inferencia tiene un grado de certeza 'tr_k' que será la pertenencia de la terna L8, Lc, Lh al hiperconjunto intersección de A₁₁, A₂₁, A₃₁

$$tr_k = \min(\mathbf{m}_{A_{11}}(L8), \mathbf{m}_{A_{21}}(Lc), \mathbf{m}_{A_{31}}(Lh))$$

El resultado final del algoritmo es una media ponderada de los niveles $Ifuz_k$ afectados de su grado de certeza

$$Ifuz = \frac{\sum tr_k \cdot Ifuz_k}{\sum tr_k}$$

Funciones asociadas a cada premisa (consecuencias) :

Se ha decidido que estas, en una primera etapa, sean funciones lineales homogéneas. Los coeficientes de éstas 'a_{ik}' se obtienen de un proceso de optimización.

Se quiere hacer notar que, en el estado actual de la investigación, se ha obtenido mejor resultado utilizando funciones lineales del valor absoluto de las tres variables de entrada del algoritmo, que con funciones dependientes de las propias variables, de este modo

$$Ifuz_k = a_{1k} \cdot |L8| + a_{2k} \cdot |Lc| + a_{3k} \cdot |Lh|$$

Variables consideradas en las premisas Fuzzy:

No es necesario que todas las variables de entrada (consideradas en las consecuencias de las premisas) estén incluidas en las propias inferencias Fuzzy. Del número de variables consideradas depende, en general, la calidad del modelo; pero también su rapidez de ajuste en la fase de diseño. Por tratarse de un algoritmo dependiente de pocas variables, se ha optado por incluir a todas ellas

Campo de Aplicación:

El modelo propuesto se ha optimizado para el caso de campos con medio o alto grado de difusión. De este modo, solo podemos garantizar la validez del algoritmo, cuando se trate de campos de estas características (que por otro lado son las más frecuentes en acústica de salas).

El conjunto de campos estudiados ha sido de un total de 4432, observándose resultados incoherentes en unos 30 casos, que por otra parte es muy difícil que se den en situaciones reales; como se comenta en el apartado de resultados y conclusiones.

Optimización del Modelo

El índice $Ifuz$ obtenido será, en general, tanto mayor cuanto menos omnidireccional sea el campo, anulándose en el caso de campo difuso ideal. Vendrá expresado en decibelios si consideramos adimensionales los coeficientes a_{ik}. Para saber si éste índice es aceptable se debe medir o conocer la difusión del campo en cada situación. Para ello los diseñamos distintos tipos de campos acústicos, como sigue:

Se fracciona una casquete esférico ideal que envuelve al punto de medida en 32 superficies cuyos límites vienen definidos por variaciones de los ángulos j y q de valor $\pi/4$. Se adjudica un valor constante a la intensidad acústica que llega al punto de medida, desde todos los puntos de una de estas superficies.

Una vez asignada a cada superficie el valor de la intensidad, se calcula la intensidad promedio, y la desviación típica del nivel de intensidad, que será un índice de lo "no-difuso" que es el campo. (En efecto; tomará un valor nulo si la intensidad en cada superficie es constante y un valor tanto mayor cuanto menos homogéneo sea el campo)

A esta desviación típica del nivel de intensidad (dB) le llamamos IH (Índice de heterogeneidad) y es el parámetro al que deberá de aproximarse el resultado del algoritmo Fuzzy, $Ifuz$.

$$IH = \sqrt{\frac{\sum (S_i (Lp_i - \bar{Lp})^2)}{\sum S_i}}$$

NOTA: los tres micrófonos comparten dos planos de simetría, de modo que no es necesario trabajar con 32 superficies, sino únicamente con 8 de ellas

Banco experimental. Situaciones estudiadas:

Se ha pretendido no tratar con casos excepcionalmente anecoicos, que evidentemente darán malos resultados muy dependientes de la posición de los ejes de simetría de los micrófonos respecto a la línea de incidencia del campo directo. Las situaciones muy difusas (en el sentido de omnidireccionalidad del campo) van a dar lugar a muy buenos resultados; de modo que nos hemos centrado en el estudio de los casos intermedios. Se han definido dos conjuntos experimentales:

- a) *Conjunto aleatorio* (1108 situaciones): se define dando valores cualesquiera, comprendidos entre 1 y 101, a las intensidades asociadas a cada una de las superficies.
- b) *Conjunto preestablecido* (3324 situaciones): Se juega exclusivamente con valores de la intensidad 21, 1, 0'51, requiriéndose además que el número de superficies a las que se asigna un valor 21 sea igual al número de aquellas a las que se asigna un valor 0'51

Algoritmos de optimización

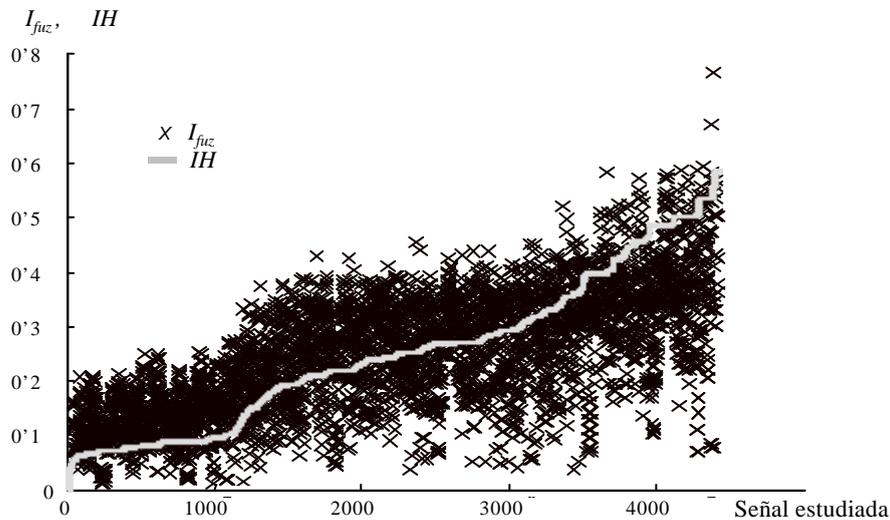
Se puede aceptar como índice de la calidad del modelo, el error cuadrático medio cometido por el ajuste, considerando como valores correctos los índices I_{H_y}

$$e = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{fuz_i} - IH_i)^2}{N}$$

Para minimizar este parámetro se ha optado por utilizar algoritmos de aproximación (heurísticos); en concreto se han combinado tres métodos: el método del gradiente, y dos métodos diferentes basados en modelos de redes neuronales.

RESULTADOS

A continuación se muestran, para las todas las situaciones estudiadas, los valores obtenidos del índice de heterogeneidad IH y el índice I_{fuz} :



Aplicación a casos reales, comparación con otros Índices

En el conjunto de trabajos desarrollados en [1] se ha realizado un estudio sobre la difusión en tres recintos con características acústicas bien diferentes. Así, el tiempo de reverberación a 1KHz en los mismos era de 0'4 s, 1'2 s y 9 s. Se han determinado las variaciones producidas al instalar difusores de un total de ocho parámetros. Citamos los que han aportado resultados más significativos:

a) δ_{EE} : Desviación promedio de la eficiencia media de energía para varios micrófonos direccionales. Definido como el promedio para los diferentes micrófonos citados anteriormente de la siguiente expresión:

$$d_{EE} = 1 - \frac{\|DE - EE\|}{DE}$$

donde EE es el cociente entre el valor eficaz de la señal captada por un micrófono direccional y la señal captada por un micrófono omnidireccional.

b) d_{color} : Ausencia de coloración de la señal. Definido como:

$$d_{color} = 1 - \frac{(\sum p^2(f_i))^2 - \sum (p^2(f_i))^2}{(N-1)\sum p^2(f_i)}$$

donde $p(f_i)$ es la densidad espectral en la banda de tercios de octava i -ésima normalizada. El sumatorio se extiende desde 200 Hz a 4000Hz.

Todos los parámetros estudiados varían entre 1 en el caso de difusión perfecta y 0 en el caso de total ausencia de difusión. Para que el parámetro de difusión obtenido anteriormente, I_{fuzzy} , cumpla estas características, definimos por conveniencia el siguiente parámetro:

$$d_{fuzzy} = 1 - \frac{I_{fuzzy}}{10}$$

La elección de la constante 10 en la fórmula anterior obedece tan sólo a una estimación del valor máximo del I_{fuzzy} que se ha observado en las mediciones.

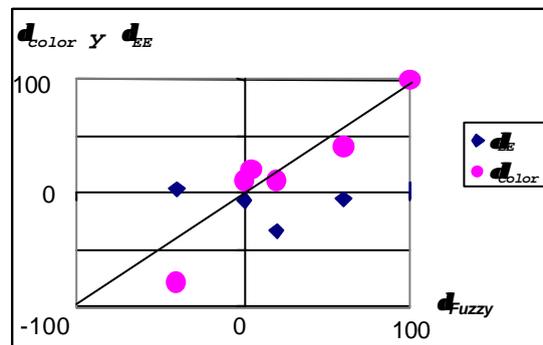


Fig. 3. Incrementos (%) de d_{EE} y d_{color} frente a incrementos de d_{fuzzy} en los diferentes recintos y posiciones estudiadas.

En la figura anterior se observa la gran correlación existente entre los datos de d_{fuzzy} y d_{color} . Por el contrario se aprecia una total ausencia de correlación entre los valores de d_{fuzzy} y d_{EE} . Cabe señalar que entre los ocho parámetros evaluadores del grado de difusión que se estudia en [1] se ha

observada una muy baja correlación entre todos ellos.

Todo lo anteriormente comentado da a entender que d_{fuzzy} y d_{olor} indican correctamente el grado de difusión de los recintos evaluados.

CONCLUSIONES

La comparación del error cuadrático medio cometido por el modelo, respecto al cometido a partir de operaciones elementales (media aritmética, media geométrica, etc) con la terna de valores de entrada L8, Lc, Lh, nos hace valorar como muy adecuada la implantación del Álgebra borrosa al problema.

No podemos omitir que se trata de un método que no permite una predicción fina; pero si ofrece mejores resultados, en la mayoría de los casos, que los obtenidos con los métodos habituales derivados de medidas con micrófonos directivos. Por otro lado en las situaciones reales estudiadas se observan incluso mejores resultados que en las de diseño.

REFERENCIAS

- [1] Redondo Pastor, Javier, *"Caracterización de la Difusión provocada por dispositivos utilizados en el acondicionamiento acústico"*, Tesis Doctoral (2001)
- [2] G. Cammarata, A. Fichera, S.Graziani, L.Marletta, *"Fuzzy logic for urban traffic noise prediction"*, Journal of Acustical Society of America, 98 (1995) 2607-2612
- [3] Trochidis A., Kalaroutis A, *"Sound Transmission Through Double Partitions With Cavity Absorption"*, Journal Of Sound And Vibration 107 (2), (1986) 321-327

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de un proyecto financiado por la Consellería de Educación y Ciencia de la Generalitat Valenciana.