



EVALUACIÓN DE UN SISTEMA MATRICIAL DE OCHO MICRÓFONOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE FUENTES SONORAS

PACS: 43.50 Yw

Genescà M.¹; Romeu J.(1); Boone M.M.²

(1)LEAM. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Terrassa U.P.C.

C/ Colom, 11 08222 Terrassa. España

Tel: 937 398 717

Fax: 937 398 022

E-mail: meritxell.genescà@upc.es

(2) Lab. of Acoustical Imaging and Sound Control (Delft University of Technology)

C/ Lorentzweg, 1 2628 CJ Delft. The Netherlands

ABSTRACT

This paper is aimed at evaluating an eight microphone array capabilities in source position detection. In this way, this array has been designed, built, and tested using ideal input data and real input data, in order to verify some hypotheses. In the experimental test, the array is used to situate a loudspeaker moved into different positions, and its results are shown and discussed. Array's angular and amplitude resolution are checked by simulation, and finally use conditions for this device are enumerated.

RESUMEN

En este artículo se pretende evaluar las capacidades de una sistema matricial para la localización de fuentes, compuesto por 8 micrófonos. En este sentido, tal dispositivo ha sido diseñado, construido y evaluado, a través de la simulación de la señal ideal que recibirían los ocho micrófonos, y mediante datos reales adquiridos situando un altavoz en distintas posiciones. Los resultados obtenidos en ambos casos se comparan, se discuten los valores de resolución angular y de amplitud, y finalmente se exponen las posibles aplicaciones de esta antena.

INTRODUCCION

El uso de antenas de micrófonos permite localizar focos sonoros en una gran variedad de emisores, entre ellos se cuentan aeronaves^{[2][3]}, trenes^[8], automóviles^[7]... Sin embargo este artículo no pretende centrarse en ninguna aplicación concreta, simplemente poner de manifiesto las capacidades generales de una matriz lineal de 8 micrófonos. Para ello, en el primer apartado, se presentan resumidamente los fundamentos teóricos que sustentan el funcionamiento de una antena basada en la técnica SYNTHACAN^[1]. En el siguiente se presentan las variables óptimas de diseño para una antena de 8 micrófonos, cuyas capacidades son evaluadas por simulación y experimentación en los siguientes apartados.

FUNDAMENTOS

Cualquier sistema, integrado por más de un micrófono, es capaz de detectar la velocidad de una onda sonora que incide sobre él. Bastaría con comparar los registros temporales obtenidos por cada transductor, para observar que ambos son el mismo pero con un cierto desfase. Conocida la distancia entre micrófonos, en el supuesto que estos estuviesen dispuestos en la dirección de propagación de la onda, se conocería la velocidad de propagación de la misma. Por otra parte, si la dirección en la que están esparcidos los sensores difiere de la dirección de propagación de la onda, según el método anteriormente expuesto, únicamente sería posible llegar a conocer el cociente entre la velocidad de la onda y el seno del ángulo de incidencia de la onda sobre los micrófonos. La figura 1, y la ecuación 1 ilustran la situación.

$$c_a = c / \sin \alpha \quad 1$$

El estudio que se presenta, parte de la hipótesis que la velocidad de propagación es conocida e igual a 340 m/s. Bajo este supuesto, sería posible a partir de una distribución lineal de micrófonos, conocer la dirección de procedencia de una onda que incide sobre ellos, y en consecuencia localizar (por lo que a dirección se refiere) la fuente generadora del ruido. En caso de estar delante de un conjunto de fuentes, la extracción de información mediante la simple observación de los espectros temporales adquiere un alto nivel de dificultad. En este caso es necesario un procesamiento de la señal que permita distinguir cuál es la aportación de cada fuente.

Existen distintas técnicas para procesar la señal proporcionada por una matriz de micrófonos, que permiten aislar el espectro de potencia de cada fuente en función del ángulo de incidencia de ésta sobre la antena^[6]. Entre ellas se ha escogido la llamada SYNTHACAN^[1], ya que permite trabajar con un número mínimo de sensores (a costa de una mayor dificultad de procesado). Dicha técnica se basa en una doble transformación de Fourier. Una primera transformación convierte, para cada uno de los micrófonos (x_i) que integran el sistema, la señal temporal $s(t, x_i)$ en su espectro frecuencial $S(f, x_i)$.

No obstante, se trabaja con los espectros cruzados de las señales de los micrófonos $R(f, \Delta_{ij})$, y no con los espectros frecuenciales $S(f, x_i)$. Con ello se consigue cubrir la mitad de la extensión, (la mitad de la distancia entre el primer micrófono y el último), que se cubriría con una distribución equiespaciada de sensores, con un número menor de micrófonos, manteniendo la misma resolución (ec.7). Dichos micrófonos deben situarse de manera que se cumpla que, observando la distancia entre cada par de ellos, pueda contabilizarse una serie continua de múltiplos de un distancia de referencia (ec.2).

$$\Delta_{ij} = n \cdot \Delta d \quad \text{con } n = \{0, 1, 2, \dots, K\} \quad 2$$

donde Δ_{ij} representa la distancia entre la pareja de micrófonos i y j , Δd representa la distancia de referencia.

Una segunda transformación de Fourier, análoga a la que anteriormente permitía el paso de dominio temporal al frecuencial, ejecutada sobre los espectros cruzados para cada frecuencia temporal, permite ahora el paso del dominio espacial, caracterizado por los distintos valores de Δ_{ij} , al dominio de la frecuencia espacial (k_a), obteniendo $R(f, k_a)$.

El concepto de frecuencia espacial responde a la inversa de la longitud de onda (o al número de onda) de la onda incidente, observada por el sistema de micrófonos. Así, a partir de la ecuación 1 se obtiene:

$$k_a = f / c \cdot \sin \alpha \quad 3$$

Teniendo en cuenta la relación establecida en la ecuación 3, una representación del espectro de potencia $R(f, k_a)$ (fig. 2), muestra el espectro de potencia de cada una de las fuentes incidentes sobre una línea cuya pendiente coincide con $\sin \alpha / c$ (ec. 4) Dónde α es el ángulo de

incidencia, sobre la antena de micrófonos, de la fuente en cuestión. De esta manera se consigue conocer cual es la aportación de cada fuente, y su dirección de localización.

$$b = \arctan(\sin a / c) \quad 4$$

La resolución, con la cual el sistema es capaz de estimar el número de onda de la señal incidente, es función del número máximo de múltiplos de la distancia de referencia que se consigue entre las parejas de micrófonos. Dada la propiedad de la ecuación 5 ,puede observarse que el valor de dicho máximo es $2K$.

$$R(f, -\Delta_{ij}) = * R(f, \Delta_{ij}) \quad 5$$

Puede obtenerse, pues, la expresión de la resolución angular del sistema (ec.7) a partir de la expresión incremental de la ecuación 3, y de la ecuación 6:

$$\Delta k = 1/(2.K.\Delta d) \quad 6$$

$$\Delta a = 0,5.I / (K.\Delta d.\cos a) \quad 7$$

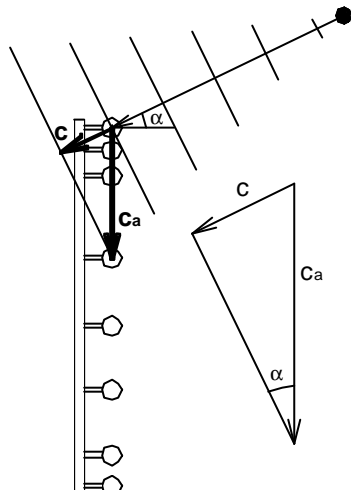


Figura 1: Interpretación de la velocidad de propagación de una onda según una matriz lineal de micrófonos.

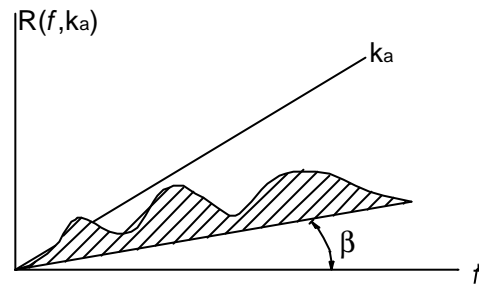


Figura 2: Representación de de $R(f, k_a)$

DISEÑO DEL SISTEMA

El principal objetivo del presente estudio, es evaluar las capacidades de un sistema compuesto por 8 micrófonos. Como la resolución (ec.7) aumenta con la extensión total cubierta por la línea de micrófonos, (distancia entre el primero y el último), cabe buscar una distribución de sensores que a la vez que maximice el valor de K , sea manejable para medidas de campo. Tal distribución puede representarse como ^[6]:

$$\{0, 1, 2, 11, 15, 18, 21, 23\} \cdot d \text{ con } K=23$$

Para evitar "aliasing" en el dominio espacial, se debería cumplir que la distancia de referencia fuese menor a la mitad de la menor longitud de onda a estudiar. En este estudio no se van a tratar frecuencias superiores a 1000 Hz, en consecuencia se fija d en 0,15m.

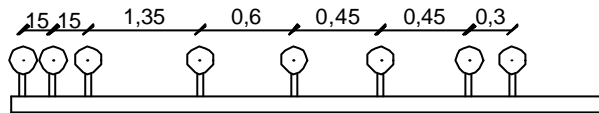


Figura 3: Distribución final de micrófonos

La frecuencia de muestreo de los micrófonos se ha tomado de 5KHz, con lo cual se eliminan las posibilidades de “aliasing “ en el dominio temporal.

RESULTADOS

En este apartado se pretende analizar el comportamiento del sistema, evaluando las siguientes características:

Resolución en amplitud

A partir de la simulación de las respuestas de los micrófonos, para una señal con un ángulo de incidencia sobre la antena de 10^0 , una frecuencia de 1000 Hz, y distintos valores de presión eficaz (de 42 dB a 62 dB en intervalos de 5dB), el sistema ha ubicado la fuente, y evaluado su nivel sonoro sobre la antena según muestra la figura 4.

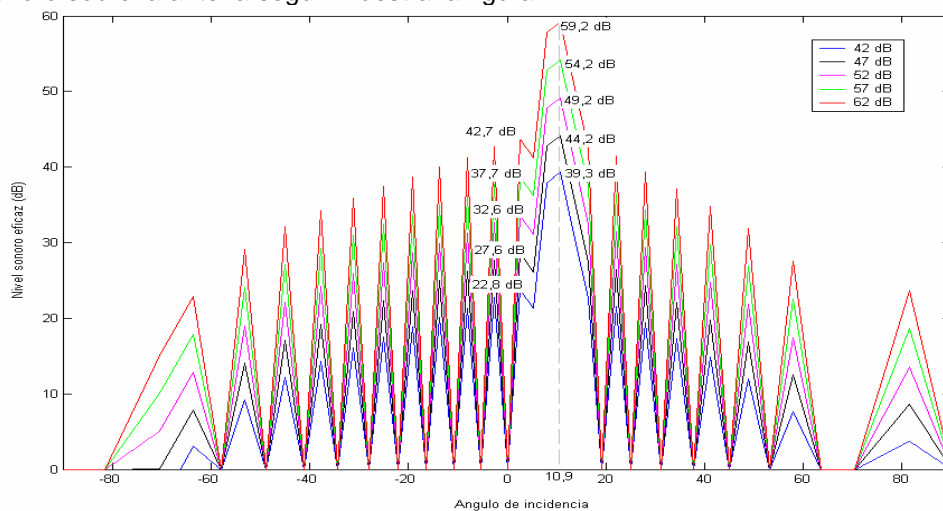


Figura 4: Localización de una fuente situada a 10^0 de la referencia de la antena, a partir de la simulación de la señal ideal que proporcionaría cada micrófono.

En ella destaca la diferencia de amplitudes entre los lóbulos principales, i los lóbulos secundarios máximos que es de mas de 15 dB, lo cual significa que la energía contenida en los lóbulos secundarios es despreciable en comparación con la que contienen los principales, ya que además, los primeros son muy estrechos. En la tabla 1 se comparan los niveles eficaces de presión sonora esperados, con los obtenidos integrando la energía contenida en los lóbulos principales.

Nivel sonoro eficaz esperado (dB)	62	57	52	47	42
Nivel sonoro eficaz integrado en el lóbulo principal (dB)	62,1	57	52	47	42,1

Tabla1: Niveles eficaces de presión sonora integrando en el lóbulo principal.

Puede comprobarse como el nivel sonoro es el esperado, pero esparcido por el conjunto de valores angulares que forman la base del lóbulo principal. Podría conseguirse una base del lóbulo más estrecha, utilizando una ventana distinta en la transformación espacial, cosa que supondría una pérdida de resolución en amplitud (incrementaría el nivel de los lóbulos secundarios).

Resolución angular

Como prevé la ecuación 7, la resolución es función del ángulo de incidencia de las ondas sobre la antena de micrófonos, degradándose para ángulos cercanos a $\pm 90^\circ$ (siendo éstos los límites de localización, ya que la antena no puede discriminar si la onda le llega frontalmente o por detrás). La figura 5 (a) muestra, por simulación, la evolución de la resolución en función del ángulo en un caso determinado.

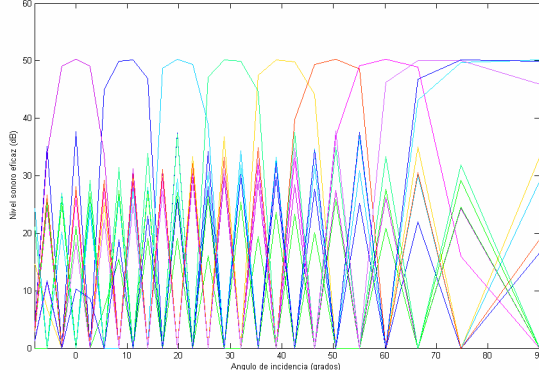


Figura 5 (a): Evolución de la resolución, de la matriz de micrófonos, con el ángulo de incidencia, para una onda de 1000 Hz y 52 dB de presión eficaz.

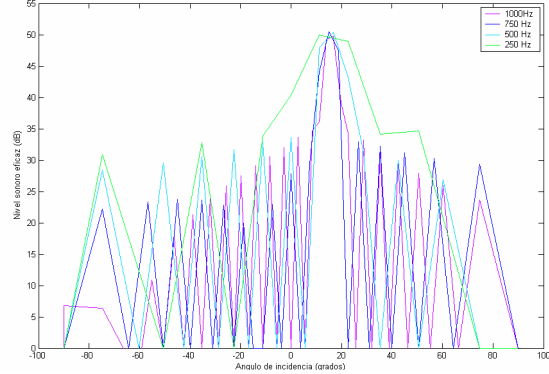


Figura 5 (b): Evolución de la resolución de la matriz de micrófonos con la frecuencia, para una onda con ángulo de incidencia de 10° y 52 dB de presión eficaz.

La ecuación 7 informa, de manera implícita, sobre la dependencia de la resolución del rango de frecuencias de estudio. Sabiendo que la distancia de referencia se escoge menor (o igual) a la mitad de la longitud de onda de la frecuencia máxima que se desee estudiar, se puede expresar dicha distancia de referencia como $\Delta d = n \cdot \lambda_{\min}$ con $n < 0,5$, introduciendo esta relación en la ecuación 7 se obtiene:

$$\Delta a = (2n \cdot K \cdot \cos a)^{-1} \cdot (f_{\max} / f) \quad 8$$

La figura 5.(b) muestra la degradación de la resolución a bajas frecuencias, para un sistema optimizado alrededor de los 1000Hz.

Experimentación

Para comprobar la eficacia de la antena de ocho micrófonos en un caso real, se ha realizado una campaña de medidas. En ellas, un altavoz, emitiendo tonos puros, se ha dispuesto lo suficientemente lejos de la antena como para que los frentes de onda incidentes en esta pudieran considerarse planos, y se ha ido posicionando de manera que, el ángulo de incidencia de las ondas por él emitidas sobre la antena, tomara distintos valores. El montaje puede observarse en las figuras 6(a) y (b).



Figura 6(a): Disposición de los micrófonos.



Figura 6(b): Disposición del conjunto.

En las figuras 7(a) y (b), se observa una curva generada a partir de datos experimentales, y otra curva generada a partir de la simulación de la respuesta ideal de cada uno de los micrófonos para la misma situación. Ambas han sido obtenidas mediante la aplicación de una

ventana rectangular (en la transformación espacial), que proporciona la máxima resolución angular, en detrimento de la resolución en amplitud, de ahí los elevados valores de los lóbulos secundarios en ambos casos. Se han ensayado otras ventanas que reducían en gran medida el valor de los lóbulos en la curva obtenida a partir de datos analíticos, esto no sucedía en la curva obtenida a partir de datos experimentales, de ahí su posible atribución al ruido de fondo, ya que el ensayo se ha realizado en medio urbano.

Comparando los resultados obtenidos a partir de datos experimentales, y los obtenidos a partir de datos analíticos, se puede observar que la evaluación del ángulo de incidencia coincide en los dos casos, aunque el hecho de haber considerado la velocidad del sonido como constante e igual a 340 m/s, podría inducir divergencias. Para evitarlas, cabría contar con una estación meteorológica, para calcular el valor de la velocidad de propagación a partir de las variables meteorológicas.

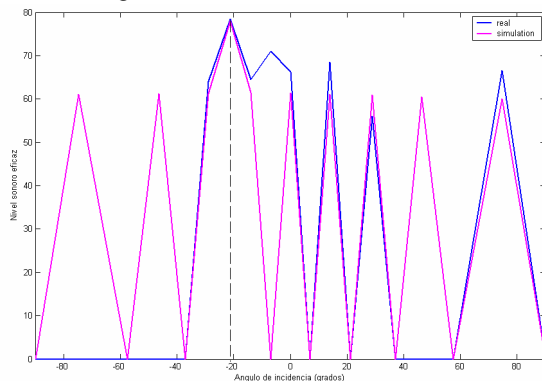


Figura 7(a): Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente y analíticamente, para una onda de 400 Hz incidiendo con un ángulo -20° de sobre la antena.

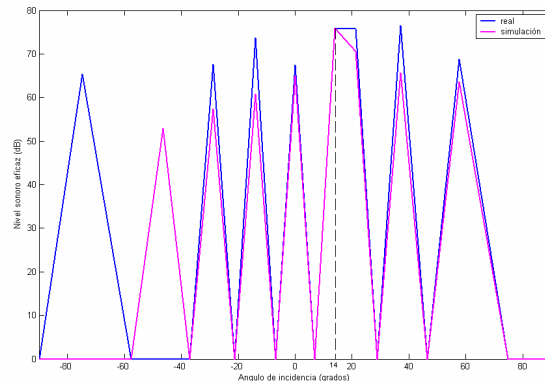


Figura 7(b): Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente y analíticamente, para una onda de 400 Hz incidiendo con un ángulo de $15,5^{\circ}$ sobre la antena.

CONCLUSIONES

Un sistema matricial de 8 micrófonos aporta una precisión, por lo que a localización de fuentes se refiere, suficiente para aplicaciones en las cuales la posición de la fuente sea conocida, y lo que se pretenda evaluar sea su nivel de presión sonora sobre la antena. Por ejemplo, contabilizar el nivel sonoro en un punto de una fábrica originado por una máquina concreta, o la aportación al ambiente sonoro de una determinada industria. Así mismo, es aplicable en situaciones que requirieran baja resolución angular: aquellas en que el ángulo de separación, de las fuentes a distinguir, sea sustancialmente grande. En cualquier caso, cabe tener en cuenta el rango de frecuencias emitidas por la fuente, que de ser muy amplio provocaría mala resolución a bajas frecuencias.

REFERENCIAS

- [1] **Boone M.M** Design and development of a synthetic acoustic antenna for highly directional sound measurements, (Tesis doctoral) TU Delft (1987).
- [2] **Boone M.M, et al.** Microphone array technology for aircraft noise measurement, INTERNOISE (2000).
- [3] **Mast A. et al.** An experimental microphone antenna array for measuring aircraft noise, INTERNOISE (2001).
- [4] **Albert H. et al.** Estimation of the two-dimensional spectrum of the space time noise field or a sparse line array, J. Acoust. Soc. Am. Vol55, 1034 (1974).
- [5] **Johnson D.H et al.** Array Signal Processing (concepts and techniques) Prentice Hall EUA (1993).
- [6] **Leech J** On the representation of $1,2,\dots,n$ by differences, J. London Math. Soc, 31,160 (1955).

- [7] **Mast A. et al.** HARMONOISE WP 1.1-Source characterisation of moving vehicles with "acoustic camera" antenna technique, EURONOISE 2003.
- [8] **Van Der Toorn J.D et al.** Measuring TGV source strength with SYNTHACAN, Journal of Sound and Vibration 193(1),113-121 (1996).