

DETECCIÓN DE LA DIRECCIÓN DE FUENTES SONORAS MEDIANTE EL USO DE UN ARRAY DE MICRÓFONOS

Robert Nekrasov¹, Pedro Poveda-Martínez¹, Jaime Ramis-Soriano¹

¹Dpto. de Física, Ing. De Sistemas y Teoría de la Señal
Universidad de Alicante
{rn14@alu.ua.es, pedro.poveda@ua.es, jramis@ua.es}

Resumen

En diferentes campos, como por ejemplo, en la industria, las fuentes de ruido son un factor importante que necesita ser analizado para poder mejorar la producción. Es necesario, por tanto, localizar de dónde proviene el ruido: interacción entre partes móviles, debilidad en aislamientos,...De esta forma será posible hacer un rediseño de las partes involucradas, mejorando el producto.

El objetivo de este trabajo es analizar los distintos métodos empleados en la literatura para la localización de fuentes sonoras y desarrollar un sistema de bajo coste capaz de llevar a cabo dicho proceso. Para ello se hace uso de micrófonos de bajo coste, junto con un circuito de amplificación, y la estructura de soporte será fabricada por métodos aditivos.

Los sistemas implementados, permiten localizar las fuentes sonoras, proporcionando el ángulo relativo al sistema diseñado.

Palabras-clave: Detección, TDOA, micrófono, array

Abstract

In different fields, such as in Industry, noise sources are an important factor that have to be analyzed in order to improve the production. Therefore, it is necessary, to localize from where the noise is coming. This noise can be produced by rubbing between pieces or by isolation weaknesses. Once the involved parts are known, it is possible to redesign the pieces efficiently, improving the product.

The objective of this work is to analyze the different methods used in the sound-source localization literature and to develop a low-cost system capable of carry that process. In order to achieve that, there will be used low-cost microphones, with an amplifying circuit, and the support structure is manufactured using additive methods.

The implemented systems allow to locate the sound sources, providing the angle relative to the designed system.

Keywords: Detection, TDOA, microphone, array

PACS no. 43.60.Jn

1 Introducción

La detección de la dirección de procedencia de una fuente sonora es muy relevante en el ámbito de la localización de fallos en todo tipo de creaciones de la ingeniería. Ya se trate de partes fijas o partes móviles, es necesario el análisis del ruido proveniente de cara a conocer si existe alguna malfunción, y en caso de existir, se debe localizar de dónde proviene la falla. Esto es algo aplicable a las industrias automovilística, mecánica, robótica, e incluso a la industria de la construcción, donde se debe comprobar que no existan fugas acústicas y se cumpla con la normativa del aislamiento.

Aunque la localización de fuentes sonoras fue un campo de estudio de mucho interés desde la Grecia Antigua [1], su verdadero estudio comenzó en el siglo XIX, después de que se estableció la ecuación de onda a finales del siglo XVIII. En su comienzo, esta cuestión creó tres corrientes de pensamiento diferentes entre los años 1840-1870: nativistas, empíricos y reduccionistas. En el primer caso, pensaban que la audición espacial era inmediata. En el segundo caso, atribuían la capacidad de localizar el sonido a la experiencia. Los reduccionistas creían que la localización del sonido se construía sobre el uso de otros sentidos, como la vista.

En 1870, Lord Rayleigh en su obra "*On our perception of the direction of a source of sound*" [2] propuso que la distancia entre los oídos debía ser la clave para la localización sonora. Partiendo de esa propuesta se descubrieron fenómenos relacionados con la audición, como el fenómeno binaural o el HRTF (*Head Related Transfer Function*). [1]

En los últimos años, diversos científicos e investigadores han tomado como referencia el oído humano, y lo han tratado de emularlo mediante equipos artificiales. Mediante el uso de micrófonos, y un equipo capaz de realizar el procesado de las señales captadas, es posible obtener la dirección de procedencia del sonido.

Además del desarrollo del equipo para la detección sonora, se crearon diversos métodos para el procesado de las señales acústicas procedentes de los micrófonos. De todos ellos, el más utilizado es el método TDOA (Time Difference of Arrival) [3], que consiste en buscar la diferencia temporal en la llegada de las ondas a los diferentes micrófonos. El problema que presenta este método es su forma no lineal, aunque existen variaciones simplificadas, que pueden ser utilizadas dependiendo de la disposición de los micrófonos. Otro método utilizado en la localización sonora es el método CLSM (*Constant speed localization method*), que fue ideado por Militello y Buenafuente [3][9], donde, en vez de simplificar el problema no lineal, le dieron un nuevo enfoque. Este nuevo enfoque consiste en tomar los diferentes receptores como emisores, y medir el retardo en la llegada de la señal acústica a cada uno de ellos. Entonces, se imagina que cada uno de los micrófonos empieza a emitir, con un retraso igual al medido, de manera que el que esté más lejano a la fuente sería el primero en empezar a emitir. La posición de la fuente es la intersección de las ondas emitidas por todos los micrófonos.

En la actualidad existen numerosos equipos que hacen uso de un sistema similar al mostrado en este documento. Por ejemplo, los sistemas de *Acoustic Camera* [7], desarrollados por *Gfai Tech*, hacen uso de un gran número de micrófonos (variable según el modelo) y de una cámara que permite ver en imágenes las fuentes de ruido y su nivel de presión acústico. De este modo, se pueden estudiar fugas acústicas o rozamientos indebidos, y poder así tomar las medidas adecuadas. Incluso se han creado equipos que hacen uso de este tipo de tecnología. Se pueden encontrar, por ejemplo: equipos de robótica, que lo utilizan para buscar fuentes sonoras [4], equipos de alarmas de hogar, que utilizan este tipo de sensores además de una cámara para mejorar su efectividad en la búsqueda de intrusos [5], o en modelos de teléfonos y tablets, para eliminar ruidos de fondo [6].

2 Materiales y métodos

2.1 Planteamiento y materiales

Se han diseñado dos sistemas de localización sonora distintos: un array lineal, y un array cuadrado, ambos compuestos por 4 micrófonos. Cada uno de estos arrays hacen uso de una variación distinta del método TDOA para obtener la dirección de procedencia de la fuente. Estas variaciones serán comentadas en el apartado siguiente.

2.1.1 Micrófonos

Para cumplir con el objetivo de que los sistemas sean de bajo coste, se ha hecho uso de micrófonos electret con las siguientes especificaciones:

Tabla 1 – Especificaciones de los micrófonos electret utilizados

Especificaciones - Micrófono electret	
Diámetro / Longitud	9 mm / 7mm
Sensibilidad	-45/-66 dB
Rango frecuencial	50 Hz-20 KHz
Consumo de corriente	500 uA
Voltaje de funcionamiento	1.5-10 V
Relación S/N	>58 dB

2.1.2 Circuito de amplificación

El funcionamiento de los transductores electret requiere de una tensión de polarización entre sus terminales. Además, los micrófonos electret emiten un voltaje muy bajo, quedando fuera del margen dinámico de la mayoría de sistemas de adquisición. Por estas razones se ha implementado un circuito de amplificación (uno por cada micrófono) como el mostrado en la figura siguiente:

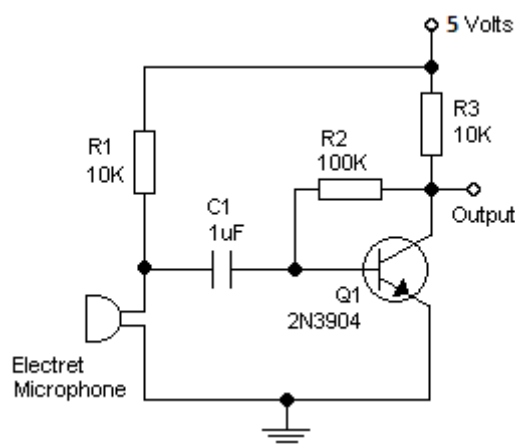


Figura 1 – Circuito de amplificación para micrófonos electret [10]

2.1.3 Adquisición

Para la adquisición de las señales recibidas por los micrófonos se utilizó una tarjeta de sonido modelo UMC 404HD de la marca Behringer [11]. Esta tarjeta permite la captación de la señal de 4 entradas de manera simultánea, con una frecuencia de muestreo máxima de 192KHZ. Asimismo, la tarjeta permite una regulación del nivel de las entradas tanto de manera individual como de manera grupal.

2.1.4 Procesado

El análisis y procesado de las señales adquiridas se llevó a cabo por medio del lenguaje de programación MATLAB, y para la adquisición en tiempo real se utilizará una herramienta basada en programación orientada a objetos que permite el tratamiento de datos de una manera sencilla llamada *ITA Toolbox* [12]. Esta herramienta fue creada por el *Institute of Technical Acoustics* de la *RWTH Aachen University*. Con ella se puede realizar la adquisición de señales de forma simultánea. Asimismo, establece la configuración de diferentes parámetros como un filtro paso banda de las señales a grabar, los canales que se van a grabar, la duración de las grabaciones, entre otros.

2.2 Métodos - TDOA (Time Difference of Arrival)

Este método emplea la diferencia temporal de llegada de la onda a los diferentes micrófonos. Conociendo el valor de la diferencia temporal de llegada de la onda y la posición relativa de los micrófonos, se puede calcular la dirección de procedencia de la fuente, trabajando por pares de micrófonos [3].

A continuación se comentarán las diferentes variaciones utilizadas para la localización sonora.

2.2.1 Array lineal – Estimación de la dirección de procedencia

Para el caso de un *array* de micrófonos lineal, donde la distancia entre todos ellos es la misma y los micrófonos forman una línea recta, no es posible localizar la posición exacta de la fuente, pero sí es posible estimar el ángulo respecto a la fuente sonora. La estimación del ángulo parte de la asunción de que las ondas recibidas provienen de campo lejano, incidiendo sobre los micrófonos de manera plana. Esto es un requisito necesario debido a que en campo cercano, las ondas presentan una propagación curva, y los cálculos trigonométricos no serían correctos [8]. Reduciendo los cálculos a una pareja de micrófonos, la siguiente imagen muestra el esquema mediante el cual se puede obtener la dirección de la fuente sonora.

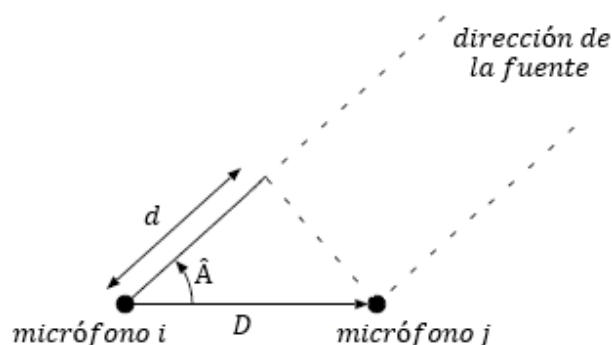


Figura 2 – Esquema para la obtención del ángulo de la fuente sonora [6] (modificado)

Donde D es la distancia entre micrófonos y d es la diferencia de distancia en los caminos, que se puede obtener utilizando la siguiente expresión, llamada expresión de TDOA:

$$d = c \cdot \Delta T_{12} \quad (1)$$

En la ecuación anterior, c es la velocidad del sonido en el medio (340m/s) y ΔT_{12} es la diferencia en el tiempo de llegada de la señal a ambos micrófonos (conocido como retardo entre micrófonos). Conocida la diferencia de caminos, es posible realizar una estimación del ángulo de incidencia \hat{A} con el que ha llegado la onda sonora, y esto se realiza mediante la ley del coseno:

$$\hat{A} = \cos^{-1}(d/D) \quad (2)$$

2.2.2 Array cuadrado – Aproximación de Z. El Hajj

El método *Hyperbolic Localization* [3] permite determinar la posición de la fuente mediante el uso de un array de micrófonos no lineal, es decir, que los micrófonos no se encuentren dispuestos en línea recta (para un array de 2 dimensiones) o en el mismo plano (para un array de 3 dimensiones). Conociendo el TDOA que existe entre un par de micrófonos, es posible calcular todas las posiciones en las que se puede encontrar la fuente. El sistema de ecuaciones que se forma se puede resolver de manera iterativa, lo que supone un proceso muy largo y costoso.

En este sentido, Z. El Hajj en [4] establece una simplificación, asumiendo que siempre se radia el sonido en campo lejano, de manera que las ondas incidentes son planas. Mediante esta aproximación únicamente se obtiene la dirección de la fuente sonora, no su posición. A cambio, se puede obtener un sistema de ecuaciones lineal. La siguiente figura muestra de forma esquemática los diferentes parámetros que se usan en la obtención de las ecuaciones:

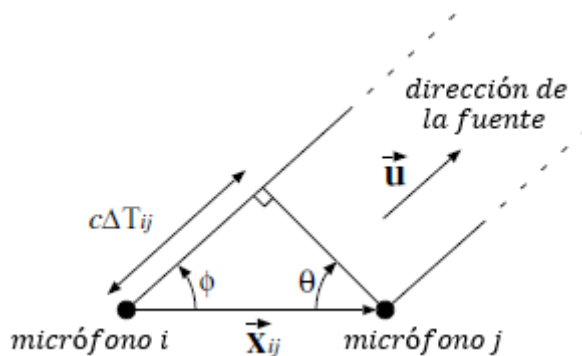


Figura 3 – Esquema inicial para la obtener las ecuaciones simplificadas del TDOA [6]

Donde \vec{u} es un vector unitario de dirección de la fuente sonora, \vec{x}_{ij} es un vector con origen en el micrófono i y apunta al micrófono j , $\vec{s} = \{x, y, z\}$ es la posición de una fuente con respecto al *array* (no la fuente real) y $\vec{m}_n = \{x_n, y_n, z_n\}$, es la posición del micrófono al que se haga referencia. La ecuación para el cálculo del ángulo se puede obtener igualando la multiplicación vectorial de \vec{u} y \vec{x}_{ij} a la razón trigonométrica del cateto contiguo dividido por la hipotenusa. La ecuación resultante es la siguiente:

$$x(x_2 - x_1) + y(y_2 - y_1) + z(z_2 - z_1) = c \cdot \Delta T_{12} \quad (3)$$

Donde c es la velocidad del sonido en aire y Δt_{ij} es el TDOA medido. Con varios pares de micrófonos dispuestos de manera no lineal y de posiciones conocidas, se puede obtener un sistema de ecuaciones. Para el caso particular de un *array* bidimensional (todos los micrófonos dispuestos en el mismo plano), el sistema se reduce a dos ecuaciones con dos incógnitas, y es necesario el uso de dos pares de micrófonos (3 micrófonos). El sistema de ecuaciones se puede resolver mediante el método de la matriz inversa:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \\ (y_3 - y_1) & (y_3 - y_1) \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} c \cdot \Delta T_{12} \\ c \cdot \Delta T_{13} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Aunque tenga ciertas limitaciones en cuanto a la disposición de los micrófonos, este método presenta una gran velocidad de ejecución.

3 Setup experimental

3.1 Soporte

Para ambos arrays diseñados, se ha creado una carcasa mediante técnicas aditivas, de manera que el conjunto de los diferentes elementos estén encapsulados.

Para la carcasa del *array* lineal se decidió distribuir 4 micrófonos en línea recta, con una distancia de 10cm entre micrófonos, que permite una localización de frecuencias de aproximadamente hasta 3300Hz. El circuito de amplificación implementado se colocó en la parte central de la estructura, y en el exterior se dispusieron 4 puertos minijack, para que el *array* pudiese ser conectado a la tarjeta de sonido.

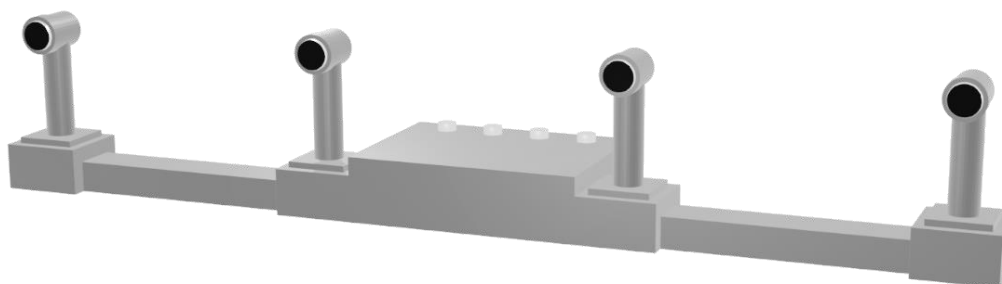


Figura 4 – Conjunto finalizado de las piezas de soporte para *array* lineal

Con esta configuración, es posible localizar el ángulo de procedencia en un ángulo de 180°, ya que el sistema no hace diferenciación entre parte frontal y trasera.

Para la carcasa del *array* cuadrado, se mantuvo la distancia entre micrófonos, y éstos fueron colocados en los vértices de un cuadrado. El resto de la estructura es muy similar:

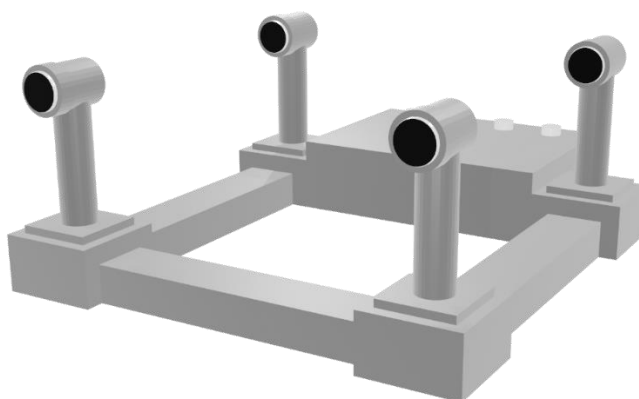


Figura 5 – Conjunto finalizado de las piezas de soporte para *array* cuadrado

Con esta configuración es posible determinar el ángulo de procedencia del sonido en un ángulo de 360°, lo cual es una mejora respecto al *array* lineal.

Para ambos diseños, el uso de más micrófonos de lo necesario permite el cálculo de varios ángulos, pudiendo eliminar las medidas erróneas, y mejorando la precisión del sistema.

3.2 Medidas

Para comprobar la precisión de ambos sistemas, se hicieron una serie de medidas a 50cm del array, en pasos de $\pi/32$ radianes. Se realizaron dos tipos de mediciones: en interior, con un bajo ruido de fondo, y en exterior, con un ruido de fondo mucho más elevado. Para cada posición se hicieron 20 medidas, y se hizo la media de los errores.

Las configuraciones utilizadas para las medidas se muestran en las siguientes figuras:

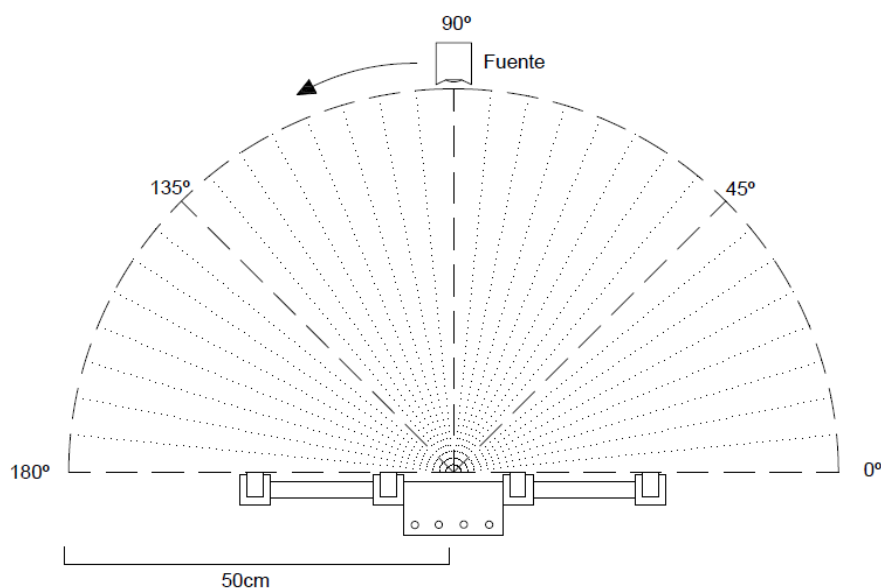


Figura 6 – Esquema de realización de las pruebas – Array lineal

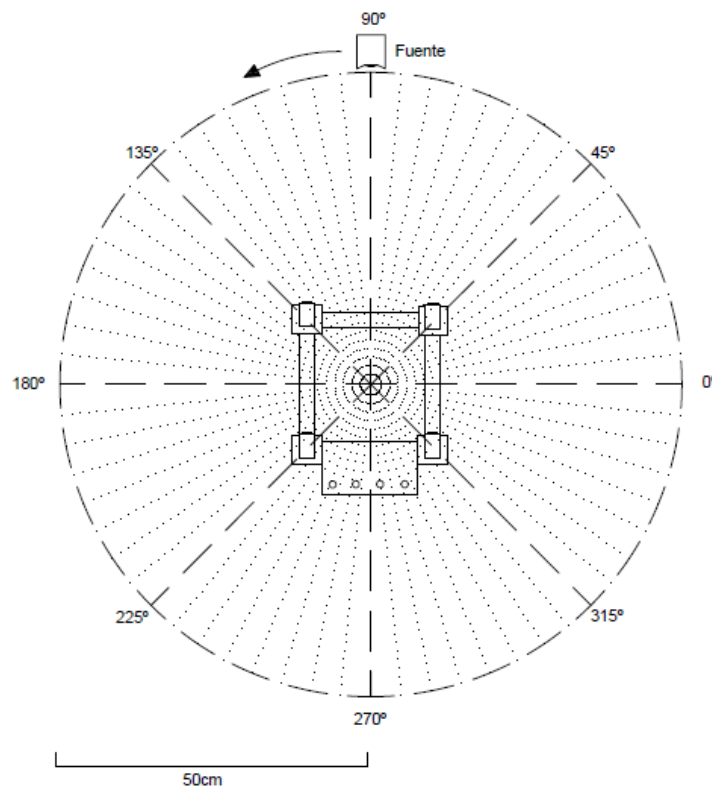


Figura 7 – Esquema de realización de las pruebas – Array cuadrado

4 Resultados y discusión

Las gráficas presentadas muestran la comparativa del error medio cometido por cada *array* en función del ángulo de incidencia de la fuente, para bloques de 512 muestras, tanto en interior como en exterior.

4.1.1 Resultados – Comparativa en interior

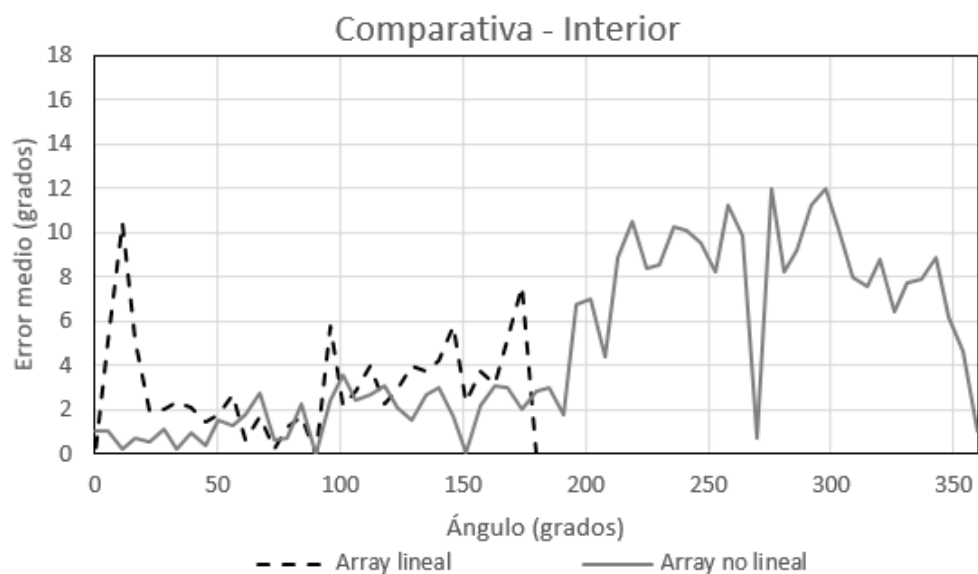


Figura 8 – Comparativa de precisión para 512 muestras en interior

4.1.2 Resultados – Comparativa en exterior



Figura 9 – Comparativa de precisión para 512 muestras en exterior

4.1.3 Resultados – Tablas resumen

De manera que se facilite la visualización de los errores obtenidos, se añaden las siguientes tablas resumen de los resultados medios en los rangos mostrados:

Tabla 2 – Error medio cometido por los sistemas en interior

Nº muestras	Error (grados) - en interior			
	Rango: 0°-180°		Rango: 180°-360°	
	Lineal	Cuadrado	Lineal	Cuadrado
256	3,06	1,84	-	7,63
512	3,03	1,78	-	7,62
1024	2,23	1,67	-	4,73

Tabla 3 – Error medio cometido por los sistemas en exterior

Nº muestras	Error (grados) - en exterior			
	Rango: 0°-180°		Rango: 180°-360°	
	Lineal	Cuadrado	Lineal	Cuadrado
256	2,17	1,95	-	4,80
512	2,13	1,93	-	4,50
1024	2,05	1,86	-	4,10

4.1.4 Discusión de los resultados

Para comenzar, se puede observar que la precisión del *array* lineal en las zonas cercanas a los extremos es poco precisa. Este comportamiento deja una apertura útil (error menor a 3°) de 129°.

A pesar de que en exterior se produzca un mayor ruido de fondo, y por ello la dificultad de localizar la fuente sonora es mayor (el error es mayor), en interior se producen reflexiones debidas a las paredes y los muebles de la sala, lo cual resulta en picos de error, para ambos *arrays*.

Los dos sistemas presentan un error similar en el rango de 0 ° a 180°. El *array* no lineal tiene un comportamiento más plano en el primer semicírculo que el lineal, y además, el error cometido es ligeramente menor. Tampoco se producen picos en los extremos como los producidos con el *array* lineal. El error producido en el semicírculo posterior, es notablemente más alto que en el semicírculo frontal, pero se puede solucionar con una colocación de los micrófonos distinta (por ejemplo: mirando hacia arriba). En este caso se decidió conseguir el menor error posible en un rango dado.

En definitiva, el *array* no lineal presenta una mejor precisión que el lineal en el rango compartido por ambos (0°-180°), y además, su cobertura es de 360°.

5 Conclusiones

En primer lugar, se creó un *array* lineal completamente funcional de cuatro micrófonos, separados 10cm. Es capaz de detectar la dirección en un rango de 180°. El rango frecuencial en el que puede actuar es de 60Hz a aproximadamente 3400Hz. El límite inferior es debido a la necesidad de eliminar el ruido procedente de la red de 50Hz, y el límite superior depende de la separación de los micrófonos y de la temperatura. Debido al uso de micrófonos electret, la distancia límite de localización es de aproximadamente 80cm. Las pruebas realizadas confirman el correcto funcionamiento del *array*, tanto en interior como en exterior, con un error medio en la localización para una apertura de 129° es inferior a 3°.

En segundo lugar, se creó un *array* no lineal de cuatro micrófonos. Este sistema comparte los límites frecuenciales con el lineal. Con esta configuración, se mejoró la precisión obtenida con el primer sistema, y además, se consigue una cobertura efectiva de 360°. El error medio cometido en el semicírculo frontal es inferior a 2°, y en el semicírculo posterior varía desde los 4° hasta los 7.6°.

Ambos sistemas han cumplido el propósito con creces, y se ha demostrado su correcta funcionalidad y precisión.

6 Líneas futuras

Como continuación de este trabajo, se pueden derivar múltiples líneas de estudio:

Puede abrirse una línea para el perfeccionamiento de los dispositivos, puesto que los *arrays* mostrados en este trabajo presentan limitaciones. El diseño de estos *arrays* se puede mejorar para que su rango de uso sea más amplio y su funcionamiento más preciso.

Otra posible línea sería la mejora de los resultados obtenidos utilizando diferentes configuraciones o tipos de micrófonos, o mediante cambios en los métodos y algoritmos. Por ejemplo, con los métodos *Hyperbolic Localization* y CSLM es posible obtener la posición de la fuente para arrays no lineales.

Agradecimientos

Se agradece al Grupo de Acústica Aplicada de la Universidad de Alicante por su interés e implicación en la elaboración de este trabajo, así como a la propia Universidad de Alicante, por permitir el uso de sus laboratorios.

Referencias

- [1] W. A. Yost, “History of sound source localization: 1850-1950,” *Proc. Meet. Acoust.*, vol. 30, no. 1, 2017.
- [2] Strutt J.W. (Lord Rayleigh), On our perception of the direction of a source of sound. 1876.
- [3] P. Strumillo, *ADVANCES IN SOUND LOCALIZATION Edited by Pawe Strumi o.* .
- [4] J. M. Valin, F. Michaud, J. Rouat, and D. Létourneau, “Robust Sound Source Localization Using a Microphone Array on a Mobile Robot,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 2, pp. 1228–1233, 2003.
- [5] Q. Nguyen, G. Shen, and J. S. Choi, “Sound Detection and Localization in Windy Conditions for Intelligent Outdoor Security Cameras,” *Circuits, Syst. Signal Process.*, vol. 35, no. 1, pp. 233–251, 2016.
- [6] Z. El Hajj, “Analysis of Sound Localization and Microphone Arrays,” *Ingenium Rev. la Fac. Ing.*, vol. 15, no. 29, p. 49, 2014.
- [7] “Acoustic Camera - acoustic-camera.com.” [Online]. Available: <https://www.acoustic-camera.com/>. [Accessed: 16-Feb-2020].
- [8] B. Al-Sheikh *et al.*, “Sound source direction estimation in horizontal plane using microphone array,” *2013 IEEE Jordan Conf. Appl. Electr. Eng. Comput. Technol. AEECT 2013*, no. December 2014, 2013.
- [9] C. Militello and S. Buenafuente, An exact noniterative linear method for locating sources based on measuring receiver arrival times. .
- [10] “audio - Can I use a PNP Transistor with an Electret Microphone to get an non-inverting output for my Arduino? - Electrical Engineering Stack Exchange.” [Online]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/57683/can-i-use-a-pnp-transistor-with-an-electret-microphone-to-get-an-non-inverting-o>. [Accessed: 16-Mar-2020].
- [11] “UMC404HD | Interfaces | Computer Audio | Behringer | Categories | Music Tribe - Behringer.” [Online]. Available: <https://www.behringer.com/Categories/Behringer/Computer-Audio/Interfaces/UMC404HD/p/POBK1>. [Accessed: 16-Mar-2020].
- [12] “(PDF) The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/317256502_The_ITA-Toolbox_An_Open_Source_MATLAB_Toolbox_for_Acoustic_Measurements_and_Signal_Proce ssing. [Accessed: 16-Mar-2020].