Virtual Phased Arrays: nueva técnica de medida para localización de fuentes de ruido

Daniel Fernández Comesaña[1, 2], Dolores García Escribano[2], Hans-Elias de Bree[2]

[1] Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, UK
dfc1e09@soton.ac.uk

[2] Microflown Technologies, the Netherlands
fernandez@microflown.com

Premio Andrés Lara para jóvenes investigadores 2012

PACS: 43.60.Jn, 43.20.Ye, 43.50.Rq

Resumen

La mayoría de los problemas de localización de fuentes de ruido tradicionalmente han sido evaluados empleando técnicas de holografía o beamforming con arrays de micrófonos. Sin embargo, si el campo acústico es estacionario en el tiempo, el número de sensores necesario para llevar a cabo dicha evaluación puede ser reducido drásticamente. El empleo de técnicas de medida basadas en escaneo, como por ejemplo "Scan & Paint", permite adquirir datos del campo sonoro de una manera rápida y sencilla usando tan sólo un sensor y una cámara de video. Además, el uso de un transductor adicional inmóvil durante el proceso de medida permite caracterizar la fase relativa a través del espacio. Esto supone un nuevo punto de partida para llevar a cabo el análisis de la localización y caracterización de las fuentes sonoras presentes en un entorno. Este trabajo presenta las bases teóricas y prácticas de un nuevo método que tan sólo requiere dos sensores para detectar y localizar fuentes de ruido. Mediante las simulaciones y experimentos realizados se ha comprobado que es posible alcanzar la precisión y resolución de técnicas de localización basadas en enormes arrays de micrófonos, dando lugar, por tanto, a "virtual phased arrays".

Abstract

Most sound localization problems have been assessed using acoustic holography or beamforming on data acquired with microphone arrays. However, if the sound field can be assumed time stationary, the number of sensors required for undertaking those analysis can be reduced dramatically. Using scanning techniques such as "Scan & Paint" allow gathering data across the sound field in a fast and efficient way by using only a transducer and a webcam. Furthermore, it is possible to characterize the relative phase field by using additional fixed sensors. This key factor leads to evaluate the data from a novel point of view. This paper presents the theoretical and experimental basis of the proposed a new method for detecting and localizing sound sources using only three transducers. The accuracy and resolution of the method have been proven to be comparable with large microphone array, achieving then the so called "virtual phased arrays".

1 Introducción

Existe una gran variedad de aplicaciones dónde es primordial el uso de redes de transductores o *arrays* para la localización de fuentes de ruido. Los sistemas convencionales de medida tienen asociado un alto coste por la necesidad de uso de complejos equipos de adquisición multicanal y numerosos sensores perfectamente calibrados en fase (*phased arrays*). Asimismo, la resolución de los resultados es directamente proporcional no sólo al número de transductores utilizados sino también a su precisión y disposición espacial. Por otra parte el uso de un número elevado de sensores puede suponer un obstáculo para determinadas longitudes de onda, pudiendo perturbar significativamente el campo sonoro creado por las fuentes de ruido. Por lo tanto, es necesario asumir un compromiso entre el coste y configuración de un array de sensores para minimizar el error en la localización de fuentes de ruido.

Si el campo sonoro puede ser considerado estacionario es posible proponer una técnica de medida que

evite muchas de las limitaciones convencionales. Para ello es esencial trabajar en el dominio frecuencial con el comportamiento relativo entre dos puntos. Este enfoque se traducirá en la necesidad de adquirir valores de magnitud absolutos pero fase relativa. En la práctica, es posible implementar un sistema de medida que tan sólo requiere dos transductores, uno fijo y otro móvil. Es preciso hacer un seguimiento de la posición del sensor móvil para establecer una conexión entre su ubicación y la señal adquirida durante el barrido. Esta técnica puede simplificar muchos problemas debido a su bajo coste y simple proceso de medida. El hecho de sólo usar un transductor móvil implica que no habrá problemas con la calibración o la configuración del *phased array*, pudiendo además adaptar la resolución de los resultados para distintas zonas espectrales durante la etapa de post-procesado, sin necesidad de repetir las medidas.

La idea de crear *phased arrays* de una manera *virtual*, usando tan sólo dos sensores, ha sido explorada para localización de fuentes de ruido aplicando distintas funciones de conformación de haz o también conocidos como *beamforming*. Se debe diferenciar entre dos familias de algoritmos aplicables a la técnica propuesta de *virtual phased arrays*: aquellos que requieren usar la matriz de covarianza y los que solamente necesitan el espectro de los transductores virtuales para su implementación.

En trabajos anteriores la técnica de medida ha sido evaluada en dos circunstancias diferentes: para localización de altas frecuencias en laboratorio [1] y baja frecuencia en exteriores [2]. También se ha evaluado la posibilidad de usar un micrófono fijo adicional para reconstruir la matriz de covarianza y poder con ello implementar técnicas de beamforming más complejas [3]. En cambio, los fundamentos de esta técnica no han sido estudiados en detalle desde un punto de vista teórico, simulando y comparando resultados con arrays estáticos convencionales. Por consiguiente esta comunicación presenta las bases teóricas y prácticas de este nuevo método que tan sólo requiere dos sensores para detectar y localizar fuentes de ruido.

2 Teoría

Antes de presentar los resultados obtenidos con la técnica de medida desarrollada es importante hacer hincapié en la base teórica. Esta sección está divida en tres partes: primero se presentan las ecuaciones que describen el campo acústico recibido por un sensor en movimiento; después se introduce el método utilizado para preservar la fase espacial relativa de una forma temporalmente independiente; por último se exponen una serie de métodos de conformación de haz o beamforming para poder estimar la posición de cualquier fuente sonora.

2.1 Campo acústico recibido por un sensor en movimiento

Las ecuaciones que describen el comportamiento de un campo sonoro lineal son bien conocidas y utilizadas en multitud de disciplinas de la acústica. Sin embargo, el problema debe ser analizado desde otro punto de vista cuando fuentes o receptores están en movimiento debido a la aparición de efecto Doppler en la señal captada, lo cual introduce efectos no lineales en el sistema. La derivación que se presenta a continuación está basada en el desarrollo que propone soluciones a un problema análogo en electromagnetismo [4] y que posteriormente fue adaptado a la acústica para fuentes sonoras en movimiento [5]. El presente trabajo está enfocado en estudiar qué sucede cuando es el sensor receptor el que está en movimiento y la fuente esta inmóvil.

Empezaremos describiendo la excitación del sistema con una fuente puntual $Q(\mathbf{x}_0, t)$ situada en una posición arbitraria $\mathbf{x}_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$ cuyo comportamiento temporal varía de acuerdo a cierta función $q(t)$. Por lo tanto,

$$Q(\mathbf{x}_0, t) = q(t)\,\delta(\mathbf{x}_0) \tag{1}$$

Para estudiar el campo sonoro producido por $Q(\mathbf{x}_0, t)$ es primordial definir qué sucede con su potencial de velocidad Ψ asociado. Esto permitirá derivar con facilidad la presión o velocidad de partícula en cualquier punto del entorno. La ecuación de onda en condiciones de campo libre en presencia de una fuente puntual se define como

$$\Delta\Psi - \frac{1}{c^2} + \frac{\partial\Psi}{\partial t^2} = Q(\mathbf{x}_0, t) \tag{2}$$

dónde $\Delta\Psi$ indica el laplaciano del potencial de velocidad y c es la velocidad del sonido en el aire. Para introducir cambios espaciales de fuente o receptor en el modelo analítico es esencial definir la función de Green del sistema y convolucionarla con la excitación producida por $Q(\mathbf{x}_0, t)$. Siguiendo la derivación propuesta en [5] es posible definir el potencial de velocidad $\Psi(\mathbf{x}, t)$ en función de la excitación de la fuente sonora q, la distancia entre fuente y receptor r, así como la velocidad de movimiento del sensor V, evaluados en un instante temporal que depende del tiempo de propagación T desde la fuente sonora hasta el receptor, el cual sigue una trayectoria $\mathbf{x}$. Por consiguiente,

$$\Psi(\mathbf{x}, t) = \frac{q\left(t - \dfrac{r(t-T)}{c}\right)}{4\pi\left(r(t-T) - V\left(t - \dfrac{r(t-T)}{c}\right)\cdot(\mathbf{x}(t-T) - \mathbf{x}_0)\right)} \tag{3}$$

Finalmente, la presión sonora p y el vector de velocidad de partícula $\mathbf{u}$ son obtenidos a partir de la derivación del potencial de velocidad con respecto al tiempo y al espacio,

$$p = -\rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} \tag{4}$$

$$\mathbf{u} = \nabla \Psi \tag{5}$$

En conclusión, la presión y velocidad de partícula medidas por un sensor móvil han sido derivadas, permitiendo predecir si la estimación espectral se verá influenciada significativamente por las condiciones de medida.

2.2 Adquisición de fase

La estimación de la fase absoluta de una señal requiere mantener una posición de medida fija en el espacio. Esto conlleva que para caracterizar distintos puntos de un campo sonoro necesitamos disponer de múltiples sensores. La técnica de medida propuesta se basa en escaneos manuales usando tan sólo un transductor, por lo que la fase del campo sonoro debe ser evaluada de una forma alternativa. Si la excitación puede considerarse estacionaria en el tiempo, podrá llevarse a cabo un análisis de la fase relativa en lugar de la absoluta. Para ello es necesario calcular el espectro cruzado entre el sensor fijo en el espacio y el móvil,

$$S_{p_m p_n}(\omega) = \lim_{T \to \infty} \frac{E\{P^*_m P_n\}}{T} \tag{6}$$

dónde P^*_m denota el espectro conjugado de en un punto de medida fijo m; y P_n el espectro de un sensor móvil cuando se encuentra pasando por el punto n. Evaluando esta expresión para un caso simple (con una esfera pulsante de amplitud A en campo libre) la expresión analítica refleja que la fase del espectro cruzado no tiene dependencia temporal, tan sólo cambia de acuerdo con la frecuencia evaluada ω y la diferencia de distancias entre el sensor fijo y móvil a la fuente $(r_m - r_n)$,

$$S_{p_m p_n}(\omega) = \frac{A^2}{r_m r_n} e^{jk(r_m - r_n)} \tag{7}$$

En conclusión, el cálculo del espectro cruzado entre dos sensores permite estudiar variaciones de fase de una determinada frecuencia a través del espacio. Esto hace posible la adaptación de algoritmos de conformación de haz o beamforming para su uso con las señales adquiridas asíncronamente.

2.3 Beamforming

La localización de fuentes de ruido en campo lejano es una de las aplicaciones comunes que tradicionalmente requiere usar múltiples sensores. Una de las técnicas más extendida y sencilla para este propósito es el *sum and delay beamforming*, el cual suma de forma coherente las señales de los sensores tras aplicar retrasos temporales dependiendo de la orientación evaluada. La dirección que maximiza la función de beamforming indicará pues la localización de la fuente sonora. Este algoritmo puede ser aplicado tanto en el dominio temporal como en el frecuencial. Dado que la técnica de medida presentada se basa en preservar la fase relativa en el dominio de la frecuencia, conviene adaptar las definiciones clásicas usando los datos adquiridos. Una función general de beamforming $B(\omega)$ puede definirse como la media de N espectros cruzados $S_{p_m p_n}(\omega)$, cuya fase relativa ha sido previamente compensada de acuerdo con un parámetro ϕ_c, tal que

$$B(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} S_{p_m p_n}(\omega) e^{j\phi_c} \tag{8}$$

Si la separación entre fuente y plano de medida es conocida de antemano, será posible definir ϕ_c proporcional a la diferencia de distancias entre sensor fijo y móvil. Además, esto permite corregir la atenuación por propagación y por consiguiente conocer la presión emitida

$$B_{NF}(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} S_{p_m p_n}(\omega) r_m r_n e^{-jk(r_m - r_n)} \tag{9}$$

Si por el contrario la distancia a la fuente es desconocida, el algoritmo no será capaz de proporcionar información sobre la energía acústica emitida. No obstante, sí es posible deducir de dónde proviene el sonido definiendo ϕ_c como el producto escalar de la posición del sensor móvil $\mathbf{x}$ con un vector unitario $\mathfrak{I}^l$, orientado en la dirección l, tal que

$$B_{FF}(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} S_{p_m p_n}(\omega) e^{-jk(\mathfrak{I}^l \cdot \mathbf{x})} \tag{10}$$

3 Simulaciones

El propósito de esta sección es implementar las ecuaciones presentadas anteriormente y evaluar la viabilidad y precisión del sistema propuesto. Para ello ha sido necesario simular las medidas realizadas con un array de micrófonos estáticos y comparar los resultados con los obtenidos mediante técnicas de escaneo valiéndose de un solo sensor móvil.

Tres fuentes sonoras han sido simuladas en campo libre excitando con una señal sinusoidal simple $q(t) = \omega^{-1}\sin(\omega t)$, para frecuencias de 200, 400 y 800 Hz. Dichas fuentes han sido posicionadas a 10 metros de separación de la zona de medida en el plano Y. Coordenadas en X han sido calculadas para que los frentes de onda incidan en la normal al array con 0º, 20º y 40º de inclinación. Un array estático de 40 sensores perfectamente calibrados ha sido distribuido a lo largo de 2 metros del espacio de simulación en el eje X. Por otra parte, implementando las ecuaciones 3 y 4 ha sido posible simular también un barrido con un sensor móvil a una velocidad de 0.1 m/s que cubre la zona de medida en unos

20 segundos. En la Figura 1 se puede observar un esquema de la geometría de la simulación realizada.

A continuación se ha calculado la señal percibida por cada uno de los micrófonos del array, así como la del sensor móvil, mediante superposición de los campos sonoros generados por cada una de las fuentes. Tras convertir las señales al dominio frecuencial, se ha podido aplicar una técnica de beamforming convencional al array estático. Por otra parte, la señal del sensor móvil fue dividida en 40 bloques de 0.5 segundos de longitud, asociando cada segmento a una posición del array estático. Acto seguido, se aplicó el beamforming introducido en la ecuación 10 al "virtual phased array". La Figura 2 muestra los resultados obtenidos tanto a la salida del beamforming como la estimación de fase del array virtual y estático.

Como se puede apreciar en esta figura, los datos obtenidos con el algoritmo de conformación de haz o beamforming son prácticamente idénticos tanto usando arrays convencionales de múltiples micrófonos como con arrays virtuales de un solo elemento móvil y una referencia fija. Además, los máximos coinciden perfectamente con las direcciones esperadas (a 0º, 20º y 40º). Esta simulación muestra el potencial de la técnica presentada para aplicaciones en las cuales no es posible usar múltiples sensores, ya sea por su prohibitivo precio o por los largos tiempos de montaje.

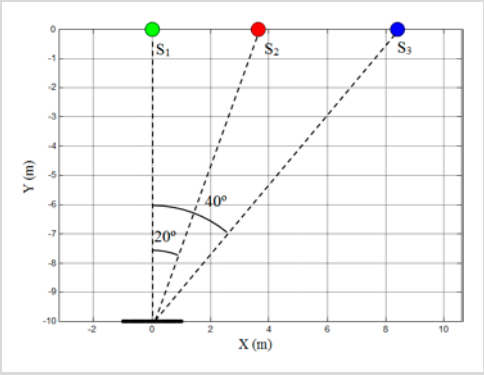

Figura 1. Plano esquemático del entorno simulado.

En la respuesta de fase presentada en la parte derecha de la Figura 2 puede verse que la fase relativa (línea discontinua) sigue el mismo patrón que la fase absoluta (línea continua) independientemente de la frecuencia de la fuente o su posición. La constante diferencia de nivel se debe a que la fase relativa depende de la diferencia de fase entre dos sensores, pero por ser espacialmente constante no tiene ningún efecto a la hora de aplicar los algoritmos de localización de fuentes.

4 Implementación práctica

Dados los buenos resultados obtenidos en las simulaciones con arrays virtuales o "virtual phased array", se ha llevado a cabo una implementación práctica de la técnica propuesta para localización tanto en azimut como en elevación. Para ello se ha integrado la técnica de medida por escaneo Scan & Paint con los algoritmos de localización de fuentes. Esta sección presenta en detalle el proceso de medición, el entorno elegido para testear el sistema y los resultados obtenidos con la técnica propuesta.

4.1 Scan & Paint

La eficiente técnica de escaneo conocida como Scan & Paint [6-8] ha sido adaptada para poder aplicar algoritmos de localización de fuentes con el objetivo de agilizar la adquisición de datos y maximizar la flexibilidad a un coste reducido. El proceso de adquisición se basa en hacer un seguimiento del transductor analizando las imágenes grabadas con una cámara de video durante la medida. Las coordenadas relativas son extraídas de la imagen de fondo, lo que implica que los grados de libertad del plano de medida se ven reducidos a dos dimensiones. Esto no

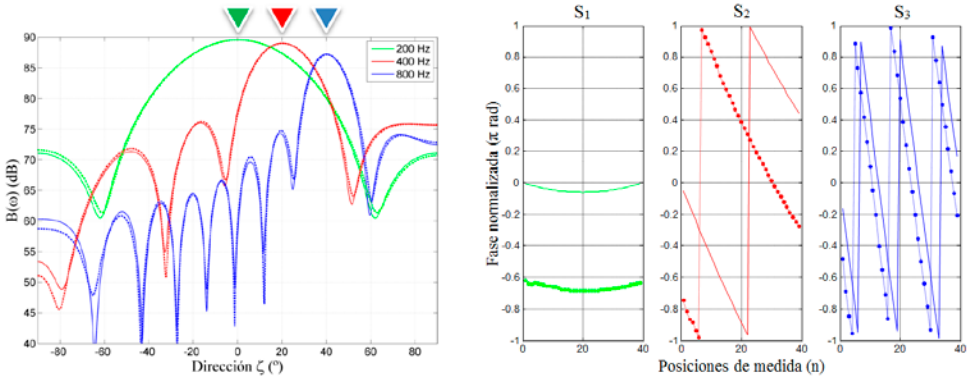

Figura 2. Comparación de los niveles del beamforming (izquierda) y la estimación de fase (derecha) de datos adquiridos con sensores estáticos (línea sólida) y un sensor en movimiento (línea discontinua) para distintas frecuencias. Los triángulos de la parte izquierda indican la posición teórica de las fuentes.

supondrá un problema siempre y cuando el escaneo se realice moviéndose a través de un plano bidimensional.

4.2 Montaje

Todas las medidas presentadas en esta comunicación fueron realizadas usando una sonda Microflown PU que contiene un micrófono de presión y un sensor de velocidad de partícula. Además, un micrófono adicional de Microflown fue usado para medir una presión de referencia en un posición fija. Una cámara Logitech Webcam Pro 9000 fue también utilizada para grabar en video el proceso de medida y así poder extraer la posición de la sonda durante el escaneo.

Varios barridos fueron realizados cubriendo una superficie de 6 metros de ancho por 2 metros de alto. El tiempo de medida requerido para adquirir los datos fueron 4 minutos. En una etapa posterior a la medida, el espacio fue discretizado en una matriz con áreas de 0.06 m^2, dando lugar a un "virtual phased array" de 192 elementos. Pantallas protectoras de viento fueron utilizadas para prevenir el ruido en los transductores debido a las condiciones meteorológicas.

En la parte izquierda de la Figura 3 puede verse una foto del montaje. La fuente de ruido presente en el entorno fue una chimenea quemadora de gas que claramente era dominante a bajas y medias frecuencias.

Como puede verse en la parte derecha de la Figura 3, existe un desajuste entre la normal al plano de medida (línea roja) y el eje central de la cámara (línea verde). Este error es debido a la dificultad de un ajuste preciso de ambos, pero que ha sido corregido en la etapa de post-procesado utilizando el plano aéreo de la zona para localizar con precisión dichos ejes y corregir la diferencia de ángulo.

El tiempo total requerido para realizar el experimento, incluyendo el proceso de montaje y medida, fue inferior a 15 minutos, proporcionando por tanto una alternativa rápida a los sistemas convencionales de localización de fuentes sonoras.

4.3 Resultados

La Figura 4 presenta mapas de localización de fuentes para distintas frecuencias. Para realizar estos gráficos ha sido necesario superponer los resultados obtenidos con un algoritmo de beamforming a una imagen extraída del video grabado durante la medida. Como puede verse en las figuras, la localización en el plano horizontal funciona de forma muy precisa, incluso a bajas frecuencias como 100 Hz. Sin embargo, la localización de la fuente en el plano vertical no alcanza tanta precisión a bajas frecuencias, pero si en frecuencias medias. Esto es debido a las dimensiones del plano de medida (6 metros de ancho por 2 metros de alto), que cubre una mayor área en el plano horizontal. Para todo array, ya sea convencional o virtual, las limitaciones físicas imponen que su tamaño debe ser proporcional a la longitud de onda a evaluar. Por tanto, para mejorar los resultados en el plano vertical deberíamos repetir las medidas cubriendo un área con mayor altura.

5 Arrays convencionales versus "virtual phased arrays"

Uno de los principales problemas de los sistemas convencionales de beamforming es el elevado coste de los equipos. El precio es muy alto no sólo por la necesidad de utilizar numerosos transductores sino también por los complejos hardware de adquisición multicanal requeridos. Por ello, una solución basada en tan sólo dos sensores presenta una alternativa atractiva y práctica desde un punto de vista comercial.

Los barridos manuales de una sola sonda proporcionan un método muy rápido y eficaz para la caracterización

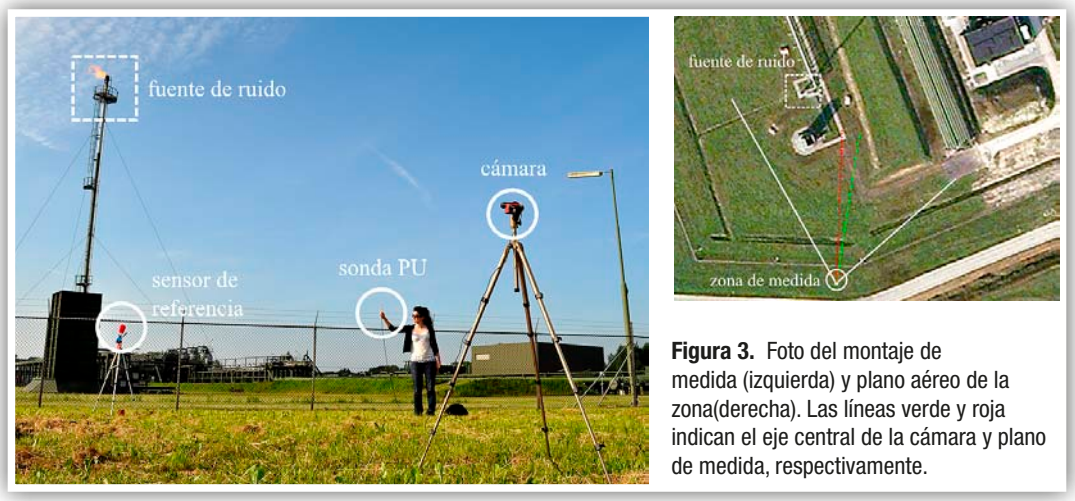

Figura 3. Foto del montaje de medida (izquierda) y plano aéreo de la zona(derecha). Las líneas verde y roja indican el eje central de la cámara y plano de medida, respectivamente.

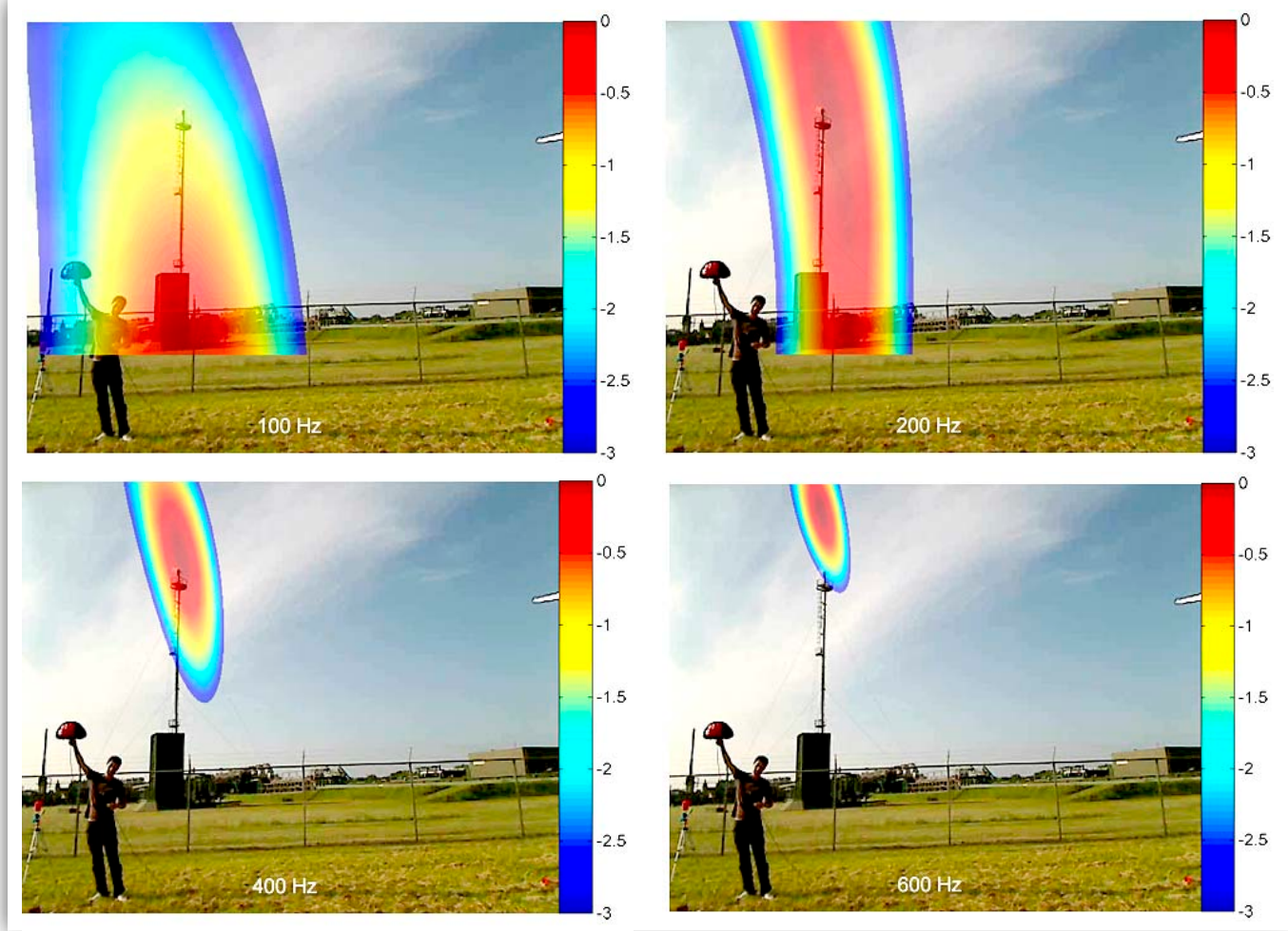

Figura 4. Mapas sonoros obtenidos usando el algoritmo de beamforming con un sólo sensor móvil.

de un campo sonoro. Las medidas presentadas en este trabajo fueron realizadas en menos de 15 minutos, lo cual puede considerarse un tiempo más que razonable para localizar fuentes dominantes, incluso a bajas frecuencias. Existen otras alternativas comerciales que también son portables y fáciles de montar, pero su rango frecuencial útil es muy reducido, especialmente para analizar bajas frecuencias ya que el tamaño del array tiene que ser proporcional a la longitud de onda que se quiere localizar.

El procedimiento de medida es muy intuitivo, la utilización de fotos del entorno de medida y superposición de los mapas de localización proporcionan una información directa y fácil de interpretar. Por ello, la presentación de resultados sobre imágenes reales es la filosofía que en los últimos años han seguido la mayoría de los nuevos sistemas de localización multicanal. Además, el uso de una cámara de video permite detectar, a posteriori, cualquier error cometido durante el proceso de medida.

La flexibilidad de los "virtual phased array" es una de sus mejores ventajas contra los equipos multicanal. Este nuevo método permite escanear desde áreas muy pequeñas para localizar fuentes de alta frecuencia; hasta grandes espacios para detectar ruido de baja frecuencia. Por otra parte, los sistemas convencionales de beamforming tienen sus micrófonos montados en una estructura fija, lo que dificulta modificar el espacio entre transductores para llevar a cabo un análisis en uno u otro rango frecuencial y así adaptarse a un problema concreto.

Uno de los principales requisitos de una técnica de localización de fuentes es el ser capaz de asegurar la veracidad y precisión de los resultados. Los cuasi-nulos niveles de error reflejados en las simulaciones de arrays estáticos con "virtual phased arrays" demuestran el claro potencial de esta técnica. También cabe destacar que el no tener directamente posiciones fijas de micrófonos conlleva a minimizar los errores de discretización, que afectaría en forma de aliasing espacial.

Una vez elegida la separación entre transductores y el tamaño del array, el rango frecuencial útil convencionalmente queda limitado. Sin embargo, usando técnicas de

escaneo, los segmentos temporales a evaluar pueden acortarse o alargarse en función de los requisitos del usuario después de haber realizado las medidas, en la etapa de post-procesado. Evitando, por consiguiente, la repetición de la misma si es necesario cambiar el rango frecuencial.

6 Conclusiones

La nueva técnica de medida "Virtual Phased Arrays" ha sido validada tanto desde un punto de vista teórico como práctico para la localización de fuentes sonoras estacionarias.

Las simulaciones de beamforming a partir de los datos obtenidos del array de micrófonos o de un sólo sensor móvil muestran prácticamente los mismos resultados, aportando una clara evidencia de la solidez de la base teórica de la técnica de medida. Líneas futuras de investigación deberán estar enfocadas hacia la búsqueda de nuevos algoritmos de localización que aumenten las prestaciones del método propuesto.

La implementación práctica ha demostrado la flexibilidad, bajo coste y enorme potencial que tienen "Virtual Phased Arrays" para localización de fuentes, especialmente para bajas frecuencias. Esto contrasta con la mayoría de los demás sistemas comerciales que se ven muy limitados en cualquier de estos aspectos.

Referencias

[1] Fernández Comesaña, D.; Wind J.; Holland K.; y Grosso, A. Far field source localization using two transducers: a virtual array approach. In *18th International Congress of Sound and Vibration*, 2011.

[2] Fernández Comesaña, D.; Wind J.; de Bree, H.-E.; y Holland, K. "Virtual Arrays", a novel broadband source localization technique, *NOVEM: Emerging Methods,* 2012.

[3] Fernández Comesaña, D.; Wind J.; de Bree, H.-E.; y Holland, K. Adapting beamforming techniques for virtual sensor arrays. *BeBeC*, 2012.

[4] De Hoop, A. T. Electromagnetic radiation from moving, pulsed source distributions: The 3D time-domain relativistic Doppler effect. *Wave motion*, 46, 74–77, 2009.

[5] Camier, C; Blais, J-F; Lapointe, R. y Berry, A. A time-domain analysis of 3D non-uniform moving acoustic sources: application to source identification and absolute quantification via beamforming. *BeBeC*, 2012.

[6] Tijs, E.; de Bree, H.-E.; y Steltenpool, S. A novel acoustic pressure-velocity based method to access acoustic leakages of an acoustic enclosure in non anechoic conditions. *Euronoise*, 2009.

[7] Tijs, E.; de Bree, H.-E.; y Steltenpool, S. Scan & paint: a novel sound visualization technique. *Internoise*, 2010.

[8] De Bree, H.-E.; Wind, J.; Tijs, E.; y Grosso, A. Scan & paint, a new fast tool for sound source localization and quantification of machinery in reverberant conditions. *VDI Maschinenakustik*, 2010.

Índice de anunciantes

	Pág.
Isover	**2**
Audiotec	**10**
Microflown	**20**
Cesva Instruments	**31-32**
Rockwool	**39**
Brüel & Kjaer	**42-43**
Vibcon	**44**
Ursa	**47**
Acusttel	**53**
Alava Ingenieros	**80**
Decustik	**86**

Audiotec

Ingeniería y Control del Ruido

Mapas de Ruido. Planes de Acción
Ensayos y Mediciones Certificadas
Aislamiento y Acondicionamiento Acústico
Certificación de Productos en Cámaras Normalizadas
Proyectos de Soluciones Acústicas: industria y edificación
Centro de Formación y Consultoría

Centro Tecnológico de Acústica

902 37 37 99
www.audiotec.es
info@audiotec.es

Madrid, Barcelona, Valladolid, Valencia, Bilbao, Cantabria, La Rioja y Zaragoza

ENAC
ENSAYOS
Nº 149/LE367

efr empresa familiarmente responsable

www.audiotec.es