DOCUMENTO TÉCNICO

Cuantificación del rendimiento de matrices acústicas

Algo más que contar micrófonos

Patrick W.A. Wijnings, Máster en Ciencias
Doctorando en Ingeniería Eléctrica

Introducción

En las últimas décadas, la tecnología, desde el rendimiento informático [1] hasta el número de píxeles de una cámara digital [2], ha mostrado un crecimiento inigualable. Esto se debe a la ley de Moore [3], la observación y la predicción de que el número de transistores en un circuito integrado aumenta exponencialmente con el tiempo. Se puede observar una tendencia similar para las matrices acústicas: debido a los avances en los circuitos integrados, los micrófonos digitales basados en la tecnología de sistemas microelectromecánicos (MEMS) [4] se han establecido como una alternativa económica y de tamaño mucho más reducido a los micrófonos de condensador analógicos para matrices.

Esto ha permitido que las matrices de micrófonos actuales incorporen entre 32 y 128 micrófonos o incluso más: la matriz de micrófonos más grande del mundo, según el récord Guinness [5], consta de, ni más ni menos, 4096 micrófonos. Sin embargo, estos números no deberían impresionarnos demasiado: al igual que el mito de los megahercios para los procesadores o el mito de los megapíxeles para la fotografía, se podría decir que también existe un mito en lo relativo a los micrófonos para matrices acústicas. Al contrario de lo que podríamos pensar, el número de micrófonos no es lo más importante para conseguir un buen rendimiento acústico. Por ejemplo, la disposición de los micrófonos es un factor igual de relevante debido a las leyes de la física que, en última instancia, limitan el rendimiento que podrá alcanzar la matriz.

En este informe técnico se ofrece una descripción general de los efectos del número y la disposición de los micrófonos en el rendimiento de la matriz y se proporcionan las herramientas básicas para cuantificarlo.

La aplicación de valores medios reduce el ruido

Cada micrófono introduce, inevitablemente, algo de ruido al medir la presión sonora: debido a las tolerancias de producción, la sensibilidad varía ligeramente de un micrófono a otro [6] y la electrónica del micrófono también genera ruido. Cuando un sonido (suave) queda eclipsado por este ruido no se puede detectar la fuente de sonido correspondiente. Dado que el sonido se desintegra a medida que se aleja de la fuente, esto también puede limitar el rango de detección de la matriz acústica. Por suerte, un fenómeno habitual en el procesamiento de señales es que las medidas promedio de varios micrófonos tienden a reducir el ruido:

$$\text{Reducción de ruido (en dB)} = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\text{número de micrófonos}}\right)$$

Esto quiere decir que cada vez que se duplica el número de micrófonos, el ruido se reduce en 3 dB, lo que apenas es perceptible para el oído humano en circunstancias normales [7]. Por lo tanto, mientras que una modesta matriz acústica supera en gran medida a un único micrófono (por ejemplo, una matriz de 64 micrófonos reduce el ruido en 18 dB), los retornos disminuyen al aumentar el número de micrófonos (p. ej., la diferencia entre matrices de 128 y 64 micrófonos solo es de 3 dB). Además, en algún momento, el ruido común a todos los micrófonos (por ejemplo, de la fuente de alimentación) prevalecerá, ya que no se puede reducir mediante la aplicación de valores medios. Por último, un mayor número de micrófonos requerirá un mayor procesamiento de datos, lo que reduce la vida útil de la batería y la portabilidad, o requiere concesiones en términos de resolución o frecuencia de refresco de la pantalla.

En resumen: si bien el aumento del número de micrófonos reduce el ruido, los retornos acaban reduciéndose en algún momento y no compensan los inconvenientes. Gracias a la tecnología que poseemos actualmente, podemos conjeturar que el número óptimo de micrófonos es de aproximadamente 64.

Formación de haces y propagación de ondas

Aplicar valores medios a las medidas del micrófono no permite visualizar el sonido proyectado sobre una imagen de cámara. En su lugar, se debe utilizar un algoritmo de formación de haces [8]. La formación de haces combina las señales de todos los micrófonos de la matriz para que las contribuciones de fuentes en ángulos concretos experimenten interferencias constructivas, mientras que otras experimentarán interferencias destructivas.

La física que hay tras la conformación de haces se establece mediante la ecuación de onda. [9] Concretamente, el sonido se propaga a través del aire a una velocidad fija:

$$\text{Velocidad del sonido} = 343 \text{ m/s.}$$

Esto significa que el sonido no solo tiene una frecuencia sino también una longitud de onda:

$$\text{Longitud de onda (en m)} = \frac{\text{Velocidad del sonido (en m/s)}}{\text{Frecuencia (en Hz)}}$$

Si paráramos el tiempo, la longitud de onda se podría describir como la longitud física de la onda de sonido en la dirección de su propagación.

La formación de haces aprovecha que los diferentes micrófonos de una matriz acústica miden diferentes puntos de esta onda. Por lo tanto, es imprescindible para un buen rendimiento acústico que haya una relación adecuada entre las distancias que separan los micrófonos de la matriz y la longitud de onda. En frecuencias bajas hay una gran longitud de onda (p. ej. 3,4 m a 100 Hz) y la matriz aprovecha las grandes distancias entre los micrófonos. En frecuencias altas y de ultrasonidos, la longitud de onda es pequeña (p. ej., 17 mm a 20 kHz) y la matriz aprovecha la pequeña distancia entre micrófonos.

El diámetro de la matriz determina la resolución de baja frecuencia

La mayor distancia entre micrófonos corresponde a dos micrófonos situados en los extremos opuestos de la matriz acústica. Así, el diámetro de la matriz (Fig. 1) está relacionado con la resolución a bajas frecuencias: cuando la matriz es demasiado pequeña, las fuentes acústicas separadas se difuminarán hasta no distinguirse en la imagen de sonido proyectada. Se puede comparar con una analogía de la astronomía, en la que un telescopio con un diámetro mayor (o abertura) es capaz de captar detalles más pequeños.

El criterio de Rayleigh cuantifica este efecto aproximando el ángulo mínimo entre dos fuentes acústicas, por debajo del cual quedarán difuminadas:

$$\text{Ángulo (en grados)} = 69{,}88 \times \frac{\text{Longitud de onda (en m)}}{\text{Diámetro de matriz (en m)}}$$

Evidentemente, aumentar el diámetro de la matriz reduce considerablemente la portabilidad. Por suerte, muchas fuentes de sonido interesantes, como las fugas de aire y las descargas eléctricas, suelen emitir sonidos a altas frecuencias. Para estas aplicaciones, una matriz acústica compacta no afecta al rendimiento de forma notable.

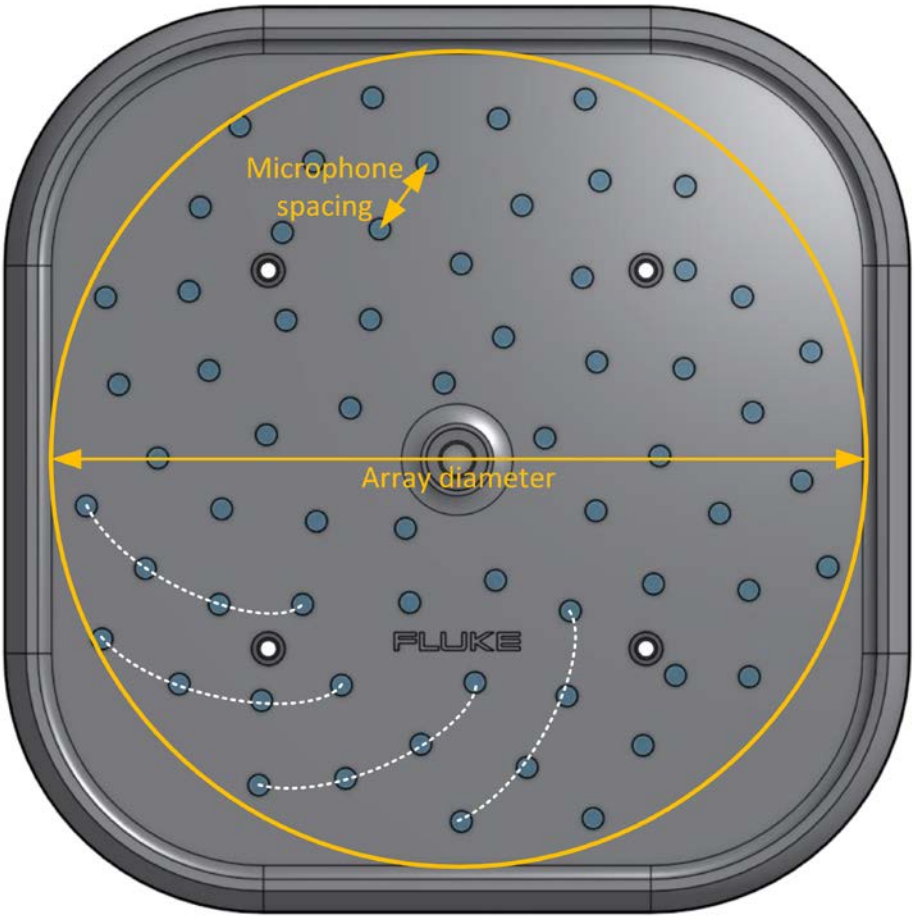

Fig. 1: El diámetro de la matriz y el espacio entre los micrófonos son dos parámetros importantes de una matriz acústica. Las matrices grandes tienen mejor resolución a bajas frecuencias y las matrices con micrófonos más cercanos mejoran los fenómenos de solapamiento a altas frecuencias. El rendimiento a altas frecuencias puede mejorarse aún más colocando los micrófonos en una espiral (indicada por las líneas discontinuas blancas).

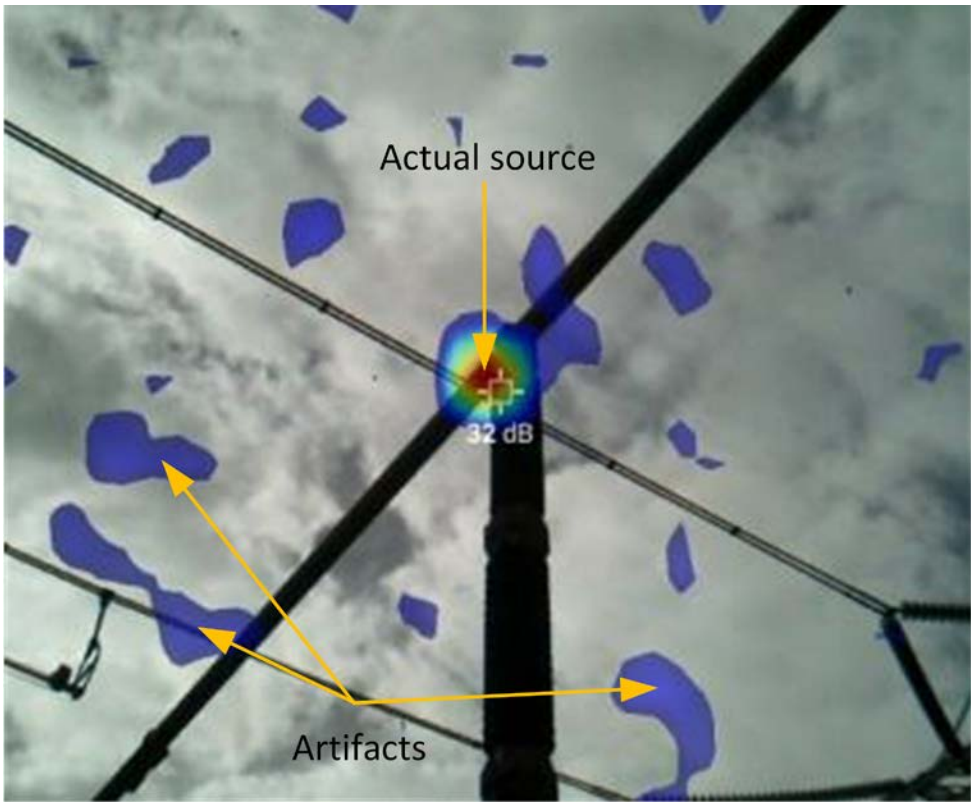

Fig. 2: Ejemplo de fenómenos producidos en la imagen de sonido proyectada.

El espacio entre los micrófonos determina los fenómenos de alta frecuencia

La distancia mínima entre micrófonos corresponde a dos micrófonos adyacentes (Fig. 1). Por lo tanto, el espacio entre los micrófonos está relacionado con el rendimiento a altas frecuencias: cuando hay demasiado espacio, las ondas de sonido no pueden resolverse de forma única, lo que provoca un solapamiento (también conocido como lóbulos laterales intensos). Esto provoca fenómenos o fuentes "fantasma" (que no están realmente presentes) en la imagen de sonido proyectada (Fig. 2). Se puede comparar con la fotografía, cuando aparece un patrón de muaré si los píxeles de una imagen son demasiado grandes. Si los micrófonos se colocan en una red uniforme, la frecuencia por encima de la cual se puede producir el solapamiento se cuantifica mediante el criterio de Nyquist:

$$\text{Frecuencia de solapamiento (en Hz)} = 0{,}5 \times \frac{\text{Velocidad del sonido (en m/s)}}{\text{Espacio entre micrófonos (en m)}}$$

Para reducir el espacio entre los micrófonos se debe reducir el diámetro de la matriz (lo que afecta a la resolución de baja frecuencia) o aumentar el número de micrófonos (lo que afecta a la vida útil de la batería). Sin embargo, ambos procedimientos tienen efectos no deseados.

Por suerte, existe una solución más inteligente: El criterio Nyquist puede superarse rompiendo la uniformidad de la red del micrófono. En el procesamiento de señales, este fenómeno se denomina muestreo aleatorio (también denominado detección comprimida) ya que se puede construir una red no uniforme mediante puntos de muestreo (y descartar otros) procedentes de una red uniforme mucho más refinada. Evidentemente, en algunas frecuencias incluso el muestreo aleatorio será defectuoso, pero cuando se implementa correctamente, esta frecuencia puede llegar muy lejos en el rango de ultrasonidos.

Hay muchas maneras de elegir una red no uniforme adecuada. [10] Una solución interesante está inspirada en la naturaleza: la espiral de Fermat, que describe la distribución de las semillas en la flor del girasol. Esta "espiral de girasol" distribuye los micrófonos de forma eficaz y casi uniforme por la superficie de la matriz, pero de forma que las distancias entre pares de micrófonos varían ligeramente (Fig. 1). Esto permite que una matriz de girasol alivie en gran medida el solapamiento respecto a una matriz normal con el mismo número de micrófonos, o por el contrario, proporciona el mismo rendimiento acústico con menos micrófonos y, por tanto, una mayor vida útil de la batería.

Conclusiones

Hemos ofrecido una visión general de las consideraciones relacionadas con el número y la disposición de los micrófonos que afectan al rendimiento de la matriz y hemos proporcionado las herramientas básicas para cuantificarlo. Una matriz de girasol compacta con unos 64 micrófonos, como en la Fluke ii900, proporciona un excelente equilibrio entre el rendimiento acústico, especialmente para fuentes causadas por fugas de aire o descargas eléctricas, y aspectos relacionados con el uso como la autonomía de de la batería y la portabilidad.

Referencias

[1] Karl Rupp, "48 Years of Microprocessor Trend Data," https://github.com/karlrupp/microprocessor-trend-data [Acceso: 7 de agosto de 2020], agosto de 2020.

[2] Nathan Myhrvold, "Moore's Law Corollary: Pixel Power", The New York Times, junio de 2006.

[3] Gordon E. Moore, "Cramming more components on integrated circuits", Electronics, vol. 38, nº 8, abril de 1965.

[4] Siti Aisyah Zawawi, Azrul Azlan Hamzah, Burhanuddin Yeop Majlis y Faisal Mohd-Yasin, "A Review of MEMS Capacitive Microphones", Micromachines, vol. 11, nº 5, pp. 484, mayo de 2020, Número: 5, Editorial: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

[5] Guinness World Records, "Largest microphone array," https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/largest-microphone-array/ [Acceso: 18 de septiembre de 2020].

[6] Patrick W.A. Wijnings, Sander Stuijk, Rick Scholte, and Henk Corporaal, "Characterization of MEMS Microphone Sensitivity and Phase Distributions with Applications in Array Processing," 2020, en revisión.

[7] ABD Engineering and Design, "How Much is a Decibel? Sound Perception Vs. Reality," https://www.abdengineering.com/blog/perception-vs-reality/ [Acceso: 8 de noviembre de 2020].

[8] B. D. van Veen y K. M. Buckley, "Beamforming: A Versatile approach to spatial filter", IEEE ASSP Magazine, vol. 5, nº 2, pp. 4–24, abril de 1988.

[9] Hans Bodén, Ulf Carlsson, Ragnar Glav, Hans-Peter Wallin, and Mats Åbom, Sound and Vibration, Marcus Wallenberg Laboratory, KTH, Estocolmo, Suecia, 2007.

[10] Zebb Prime y Con Doolan, "A comparison of popular beamforming arrays," en Proceedings of Acoustics 2013 Victor Harbor, Victor Harbor, South Australia, 2013, Australian Acoustical Society.

Fluke. *Manteniendo su mundo en marcha.*

Fluke Ibérica, S.L.
Avda de la Industria, 32
Edificio Payma
28108 Alcobendas (Madrid)
Spain
Tel: +34 91 414 0100
E-mail: cs.es@fluke.com
www.fluke.es

©2021 Fluke Corporation.
Reservados todos los derechos. Información sujeta a modificación sin previo aviso.
05/2021 210512-es

No se permite ninguna modificación de este documento sin permiso escrito de Fluke Corporation.