

Quantifier les performances des ensembles acoustiques

Plus que compter les microphones

Patrick W.A. Wijnings, Master
Candidat en doctorat
d'ingénierie électrique

Introduction

Au cours des dernières décennies, la technologie (des performances informatiques [1] au nombre de pixels d'un appareil photo numérique [2]) a connu une croissance impressionnante. C'est une conséquence de la loi de Moore [3], qui est à la fois l'observation et la prédiction selon lesquelles le nombre de transistors à l'intérieur d'un circuit intégré augmente de façon exponentielle au fil du temps. Une tendance similaire peut être observée pour les ensembles acoustiques : en raison des progrès réalisés dans les circuits intégrés, les microphones numériques basés sur la technologie des systèmes micro-électromécaniques (MEMS) [4] sont apparus comme une alternative économique et miniaturisée aux microphones à condensateur analogique pour une application dans les réseaux.

Cela a permis aux ensembles de microphones d'aujourd'hui de disposer de 32 à 128 microphones, voire plus : selon Guinness World Records [5], le plus grand ensemble de microphones jamais atteint est de 4 096. Cependant, il est important de prendre ces chiffres avec circonspection : à l'image du mythe des mégahertz pour les processeurs ou celui des mégapixels pour la photographie, on pourrait formuler un mythe des microphones pour les ensembles acoustiques : contrairement à ce que l'on pourrait croire, le nombre de microphones n'est que la pointe de l'iceberg des ensembles acoustiques. Le positionnement des microphones est notamment un facteur tout aussi important en raison des lois de la physique qui limitent les performances des ensembles acoustiques.

Ce livre blanc offre un aperçu des effets du nombre de microphones et de leur positionnement sur les performances des ensembles acoustiques, et fournit les outils de base pour les quantifier.

La moyenne réduit le bruit

Chaque microphone introduit inévitablement du bruit dans ses mesures de la pression sonore : en raison des tolérances de production, la sensibilité varie légèrement d'un microphone à l'autre [6], et l'électronique du microphone introduit également du bruit. Lorsqu'un son (discret) est éclipsé par ce bruit, la source sonore correspondante ne peut pas être détectée. Comme le son diminue lorsqu'il s'éloigne de la source, cela peut également limiter la plage de détection de l'ensemble acoustique. Heureusement, il existe un phénomène bien connu dans le traitement du signal : les mesures moyennes de plusieurs microphones ont tendance à réduire le bruit :

$$\text{Réduction du bruit (en dB)} = 20 \log_{10} (\sqrt{\text{Nombre de microphones}})$$

Cette formule signifie que chaque fois que le nombre de microphones est doublé, le bruit est réduit de 3 dB, ce qui est à peine perceptible par l'oreille humaine dans des conditions normales [7]. Ainsi, si une matrice acoustique modeste surpasse considérablement un seul microphone (par exemple, un ensemble de 64 microphones réduit le bruit de 18 dB), les retours diminuent à mesure que le nombre de microphones augmente (par exemple, la différence entre les ensembles de 128 et 64 microphones est de seulement 3 dB). En outre, à un moment donné, le bruit commun à tous les microphones (par exemple, à partir de l'alimentation) commence à dominer, car il ne peut pas être réduit par la moyenne. Enfin, un plus grand nombre de microphones nécessitent un traitement plus important des données, ce qui peut compromettre l'autonomie de la batterie et la portabilité, ou nécessiter des compromis en matière de fréquence d'images ou de résolution d'affichage.

En résumé : si l'augmentation du nombre de microphones réduit le bruit, les retours diminuent à un moment donné et ne l'emportent pas sur les inconvénients. Avec la technologie actuelle, nous pensons que l'utilisation optimale est d'environ 64 microphones.

Formation de faisceaux et propagation des ondes

Le fait de calculer la moyenne des mesures du microphone ne permet pas de visualiser le son projeté sur une image de caméra. Un algorithme de formation de faisceaux [8] doit être utilisé à la place. La formation de faisceau combine les signaux de tous les microphones de l'ensemble, afin que les contributions de sources à des angles spécifiques subissent des interférences constructives tandis que d'autres subissent des interférences destructives.

La physique sous-jacente qui permet la formation de faisceaux est établie par l'équation d'Alembert. [9] En particulier, le son se propage dans l'air à une vitesse fixe :

$$\text{Vitesse du son} = 343 \text{ m/s.}$$

Cela signifie que le son n'a pas seulement une fréquence, mais aussi une longueur d'onde :

$$\text{Longueur d'onde (en m)} = \frac{\text{Vitesse du son (en m/s)}}{\text{Fréquence (en Hz)}}$$

Si le temps est suspendu, la longueur d'onde correspond à la longueur physique de l'onde sonore dans la direction de sa propagation.

La formation de faisceaux exploite le fait que les différents microphones d'un ensemble acoustique mesurent différents points de cette onde. Par conséquent, un bon rapport entre les distances séparant les microphones de l'ensemble et la longueur d'onde est essentiel pour de bonnes performances acoustiques. A basse fréquence, la longueur d'onde est importante (par exemple 3,4 m à 100 Hz) et l'ensemble bénéficie de grandes distances entre les microphones. A haute fréquence et fréquence ultrasonique, la longueur d'onde est faible (par exemple 17 mm à 20 kHz) et l'ensemble bénéficie de faibles distances entre les microphones.

Le diamètre du réseau détermine la résolution basse fréquence

La plus grande distance entre les microphones correspond à deux microphones situés aux deux extrémités de l'ensemble acoustique. Ainsi, le diamètre de la matrice (Fig. 1) est lié à la résolution à basses fréquences : lorsque l'ensemble est trop petit, des sources acoustiques distinctes se brouillent ensemble dans l'image sonore projetée. Une analogie existe en astronomie, où un télescope de plus grand diamètre (ouverture) permet d'apercevoir des détails plus petits.

Le critère de Rayleigh quantifie cet effet en calculant l'angle minimum entre deux sources acoustiques en dessous duquel elles se brouilleront :

$$\text{Angle (en degrés)} = 69,88 \times \frac{\text{Longueur d'onde (en m)}}{\text{Diamètre de l'ensemble (en m)}}$$

Bien entendu, l'augmentation du diamètre de l'ensemble réduit considérablement la portabilité. Heureusement, de nombreuses sources sonores intéressantes telles que les fuites d'air et les décharges électriques émettent principalement du son à des fréquences élevées. Pour ces applications, un ensemble acoustique compact n'a pas d'impact significatif sur les performances.

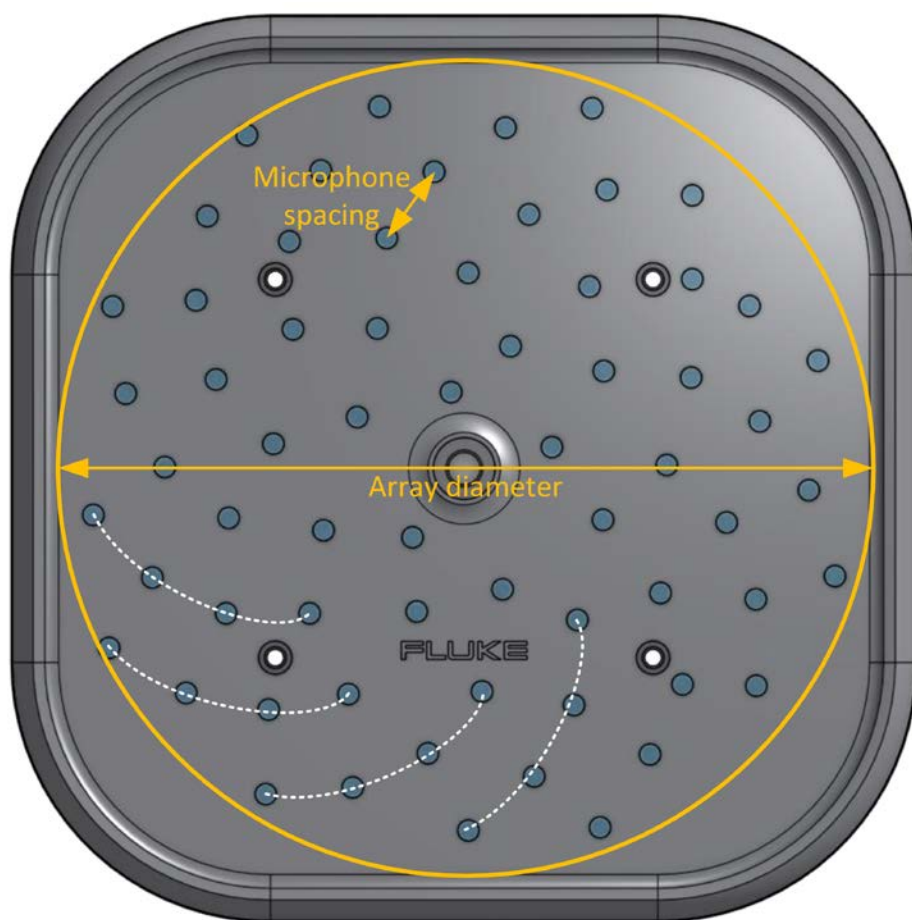


Fig. 1 : Le diamètre de la matrice et l'espacement entre les microphones constituent deux paramètres importants d'un ensemble acoustique. Les ensembles de grande taille offrent une meilleure résolution à basses fréquences, et les ensembles de microphones plus proches améliorent les artefacts de repliement à hautes fréquences. Les performances à hautes fréquences peuvent être améliorées en plaçant les microphones dans une spirale (indiqué par les lignes blanches en pointillés).

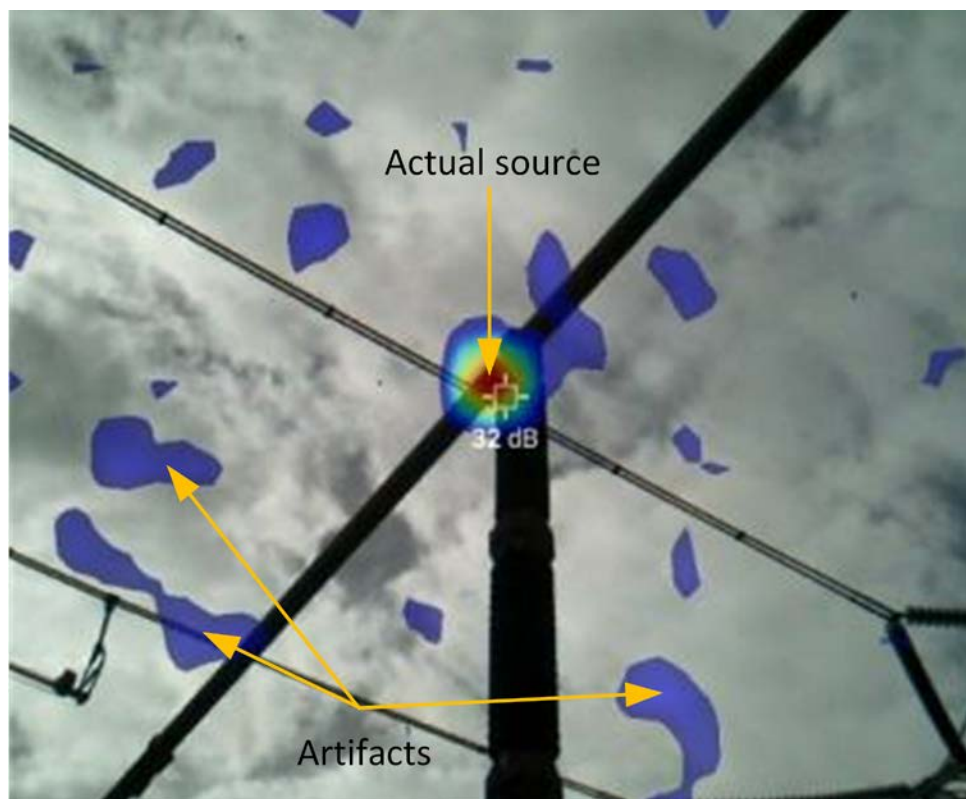


Fig. 2 : exemple d'artefacts dans l'image sonore projetée.

L'espacement entre les microphones détermine les artefacts haute fréquence

La plus petite distance entre les microphones correspond à deux microphones adjacents (Fig. 1). Ainsi, l'espacement entre les microphones est lié aux performances à hautes fréquences : lorsque l'espacement est trop important, les ondes sonores ne peuvent pas être résolues de manière unique, ce qui entraîne un repliement (c'est-à-dire des lobes secondaires forts). Cela se manifeste par des artefacts ou des sources fantômes (qui n'existent pas vraiment) dans l'image sonore projetée (Fig. 2). Il existe une analogie dans la photographie, où des motifs moirés peuvent se produire si les pixels d'une image sont trop grands. Si les microphones sont positionnés sur une grille régulière, la fréquence au-dessus de laquelle le repliement peut se produire est quantifiée à l'aide du critère Nyquist :

$$\text{Fréquence de repliement (en Hz)} = 0,5 \times \frac{\text{Vitesse du son (en m/s)}}{\text{Espacement entre les microphones (en m)}}$$

Pour réduire l'espacement entre les microphones, le diamètre de la matrice doit être réduit (ce qui affecte la résolution à basses fréquences) ou le nombre de microphones doit être accru (ce qui a un impact sur l'autonomie de la batterie) ; les deux ont des effets indésirables.

Heureusement, il existe une solution plus intelligente : Le critère Nyquist peut être surpassé en rompant la régularité de la grille de microphones. Dans le traitement des signaux, ce phénomène est appelé échantillonnage épars (détection de compression), car une grille irrégulière peut être construite en échantillonnant des points (et en éliminant d'autres) à partir d'une grille régulière beaucoup plus fine. Bien sûr, à une certaine fréquence, même un échantillonnage épars va se décomposer, mais s'il est mis en œuvre correctement, cette fréquence peut être poussée très loin dans la plage ultrasonique.

Il existe de nombreuses façons de choisir une grille irrégulière adaptée.[10] Une solution pertinente s'inspire de la nature : la spirale de Fermat qui décrit la distribution des graines dans une tête de tournesol. Cette « spirale de tournesol » répartit les microphones de manière efficace et quasi uniforme sur la surface du réseau, mais de sorte que les distances entre les paires de microphones varient légèrement (Fig. 1). Cela permet à un ensemble de type tournesol d'atténuer considérablement les artefacts de distorsion par rapport à un ensemble classique comptant le même nombre de microphones, ou inversement, d'offrir les mêmes performances acoustiques avec moins de microphones et donc une autonomie accrue de la batterie.

Conclusions

Nous avons donné un aperçu des effets du nombre de microphones et de leur positionnement sur les performances des ensembles acoustiques, et fourni les outils de base pour les quantifier. Un réseau compact de type tournesol comprenant environ 64 microphones, comme la caméra Fluke ii900, offre un excellent équilibre entre les performances acoustiques (notamment pour les sources causées par des fuites d'air ou des décharges électriques) et des considérations d'utilisation telles que l'autonomie de la batterie et la portabilité.

Références

- [1] Karl Rupp, « 48 Years of Microprocessor Trend Data », <https://github.com/karlrupp/microprocessor-trend-data> [date de consultation : 7 août 2020], août 2020.
- [2] Nathan Myhrvold, « Moore's Law Corollary: Pixel Power », « New York Times », juin 2006.
- [3] Gordon E. Moore, « Cramming more components onto integrated circuits », *Electronics*, vol. 38, no. 8, avril 1965.
- [4] Siti Aisyah Zawawi, Azrul Azlan Hamzah, Burhanuddin Yeop Majlis et Faisal Mohd-Yasin, « A Review of MEMS Capacitive Microphones », *Micromachines*, vol. 11, no. 5, pp. 484, mai 2020, numéro : 5 Editeur : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [5] Guinness World Records, « Large microphone array », <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/largest-microphone-array/> [date de consultation : 18 septembre 2020].
- [6] Patrick W.A. Wijnings, Sander Stuijk, Rick Scholte et Henk Corporaal, « Characterization of MEMS Microphone Sensitivity and Phase Distributions with Applications in Array Processing », 2020, en cours de révision.
- [7] ABD Engineering and Design, « How Much is a Decibel? Sound Perception Vs. Reality », <https://www.abdengineering.com/blog/perception-vs-reality/> [date de consultation : 8 novembre 2020].
- [8] B. D. van Veen et K. M. Buckley, « Beamforming: a versatile approach to spatial filtering », *IEEE ASSP Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, avril 1988.
- [9] Hans Bodén, Ulf Carlsson, Ragnar Glav, Hans-Peter Wallin et Mats Åbom, *Sound and Vibration*, Marcus Wallenberg Laboratory, KTH, Stockholm, Suède, 2007.
- [10] Zebb Prime et Con Doolan, « A comparison of popular beamforming arrays », in *Proceedings of Acoustics 2013 Victor Harbor*, Victor Harbor, Australie du Sud, 2013, Australian Acoustical Society.

Soyez à la pointe du progrès avec Fluke.

Fluke France SAS
20 Allée des érables
93420 Villepinte
France
Téléphone: +33 17 080 0000
E-mail: cs.fr@fluke.com
www.fluke.com/fr-fr

Fluke Belgium N.V.
Kortrijksesteenweg 1095
B9051 Gent
Belgium
Tel: +32 2402 2100
E-mail: cs.be@fluke.com
www.fluke.com/fr-be

Fluke (Switzerland) GmbH
Industrial Division
Hardstrasse 20
CH-8303 Bassersdorf
Tel: +41 (0) 44 580 7504
E-mail: roc.switzerland@fluke.com
www.fluke.com/fr-ch

©2021 Fluke Corporation.
Tous droits réservés. Informations modifiables
sans préavis. 05/2021 210512-fr

La modification de ce document est interdite sans
l'autorisation écrite de Fluke Corporation.