

## ARTIGO

# Quantificar o desempenho da matriz acústica

Mais do que contar microfones

**Patrick W.A. Wijnings, MSc**  
Doutorando de Engenharia  
Elétrica

## Introdução

Nas últimas décadas, a tecnologia, que vai desde o desempenho dos computadores [1] ao número de píxeis numa câmara digital [2], demonstrou um crescimento impressionante. Esta é uma consequência da lei de Moore [3], que consiste tanto na observação quanto na previsão de que o número de transístores no interior de um circuito integrado aumenta exponencialmente ao longo do tempo. Pode ser observada uma tendência semelhante nas matrizes acústicas: devido aos avanços nos circuitos integrados, os microfones digitais baseados na tecnologia de sistemas microeletromecânicos (MEMS) [4] surgiram como uma alternativa económica e miniaturizada aos microfones condensadores analógicos para aplicação em matrizes.

Tal permitiu que as matrizes de microfones atuais tenham entre 32 a 128 microfones, ou mais: a maior matriz de microfones do mundo, de acordo com o Recorde Mundial do Guinness [5], consiste numa impressionante matriz de 4096 microfones. No entanto, é importante não ficar deslumbrado com estes números: de forma semelhante ao mito dos Megahertz para os processadores ou ao mito dos megapíxeis para a fotografia, pode ser formulado um mito dos microfones para as matrizes acústicas. Ao contrário do que se pode sentir tentado a acreditar, o número de microfones apenas não conta toda a história do desempenho acústico. Em particular, a colocação dos microfones é um fator igualmente importante devido às leis da física que, em última análise, limitam o desempenho possível da matriz.

Este documento fornece uma visão geral dos efeitos do número e da colocação de microfones no desempenho da matriz e fornece as ferramentas básicas para o quantificar.

## Efetuar a média das medições reduz o ruído

Cada microfone introduz inevitavelmente algum ruído nas suas medições de pressão sonora: devido às tolerâncias de produção, a sensibilidade varia ligeiramente de microfone para microfone [6], e a eletrónica do microfone também introduz ruído próprio. Quando um som (silencioso) é eclipsado por este ruído, a fonte de som correspondente não pode ser detetada. Como o som decai à medida que se afasta da fonte, isto também pode limitar o alcance de deteção da matriz acústica. Felizmente, um fenómeno bem conhecido no processamento de sinais é o de que efetuar a média das medições de vários microfones tende a reduzir o ruído:

$$\text{Redução de ruído (em dB): } 20 \log_{10} (\sqrt{\text{Número de microfones}})$$

Esta fórmula significa que, cada vez que o número de microfones é duplicado, o ruído é reduzido em 3 dB, o que é pouco perceptível para o ouvido humano em circunstâncias normais [7]. Assim, embora uma matriz acústica modesta supere significativamente um único microfone (por exemplo, uma matriz de 64 microfones reduz o ruído em 18 dB), os retornos diminuem à medida que o número de microfones aumenta (por exemplo, a diferença entre matrizes de 128 e 64 microfones é de apenas 3 dB). Além disso, a certo ponto, o ruído comum a todos os microfones (por exemplo, proveniente da fonte de alimentação) começará a dominar, uma vez que não pode ser reduzido através da média. Finalmente, mais microfones exigem mais processamento de dados, o que provoca a perda de vida útil e a portabilidade da bateria, ou requer compromissos em termos de velocidade sequencial de exibição ou resolução.

Resumindo: embora o aumento do número de microfones reduza o ruído, a certo ponto, os retornos diminuem e não suplantam as desvantagens. Com a tecnologia atual, acreditamos que a quantidade ideal é de cerca de 64 microfones.

## "Beamforming" e propagação da onda

Efetuar apenas a média das medições dos microfones não permite a visualização do som projetado na imagem de uma câmara. Em vez disso, deve ser utilizado um algoritmo de "beamforming" (formação de feixe) [8]. O "beamforming" combina os sinais de todos os microfones na matriz para que as contribuições das fontes em ângulos particulares sofram interferência construtiva enquanto outras sofrem interferência destrutiva.

A física subjacente que permite o "beamforming" é estabelecida pela equação da onda [9]. Em particular, o som propaga-se através do ar a uma velocidade fixa:

$$\text{Velocidade do som} = 343 \text{ m/s.}$$

Isto significa que o som não possui apenas uma frequência, mas também um comprimento de onda:

$$\text{Comprimento de onda (em m)} = \frac{\text{Velocidade do som (em m/s)}}{\text{Frequência (em Hz)}}$$

Se o tempo fosse parado, o comprimento de onda corresponderia ao comprimento físico da onda sonora na direção da sua propagação.

O "beamforming" explora o facto de diferentes microfones numa matriz acústica medirem diferentes pontos desta onda. Portanto, uma relação adequada entre as distâncias entre os microfones da matriz e o comprimento de onda é crucial para um bom desempenho acústico. A baixas frequências, o comprimento de onda é grande (p. ex., 3,4 m a 100 Hz) e a matriz beneficia de grandes distâncias entre os microfones. A frequências altas e ultrassónicas, o comprimento de onda é pequeno (p. ex., 17 mm a 20 kHz) e a matriz beneficia de pequenas distâncias entre os microfones.

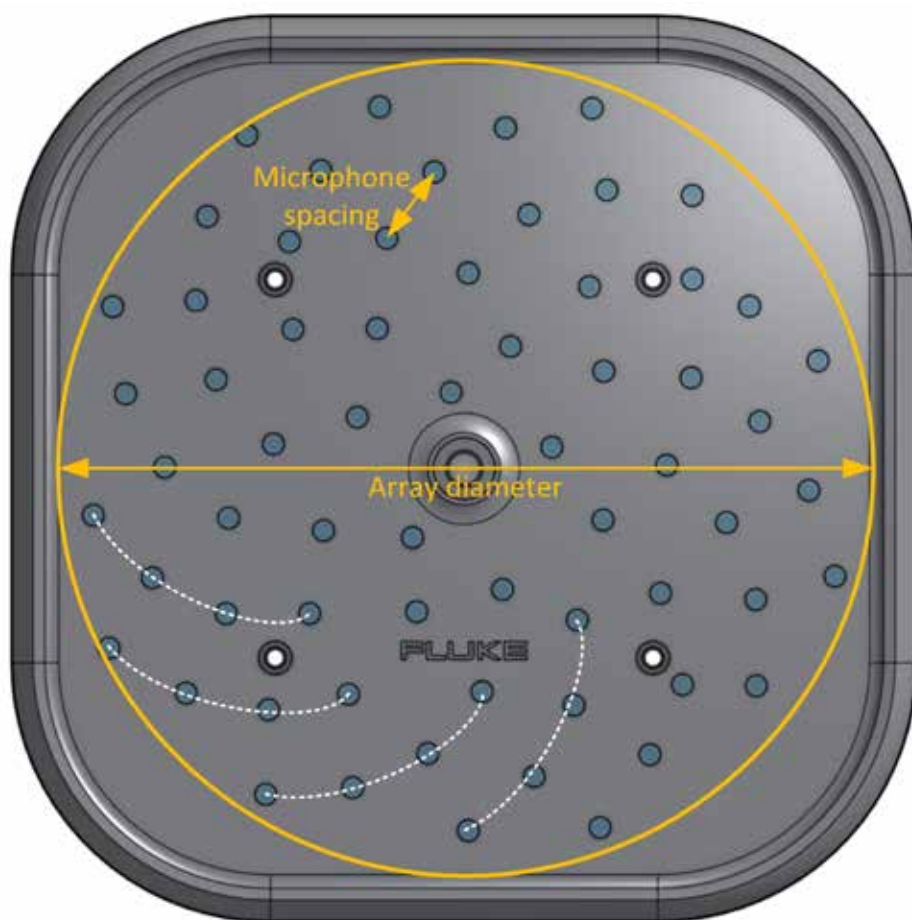
## O diâmetro da matriz determina a resolução a baixas frequências

A maior distância entre microfones corresponde a dois microfones em extremidades opostas da matriz acústica. Assim, o diâmetro da matriz (Fig. 1) está relacionado com a resolução a baixas frequências: quando a matriz é demasiado pequena, as fontes acústicas separadas desfocam-se na imagem de som projetada. Uma analogia pode ser encontrada na astronomia, onde um telescópio com um diâmetro maior (também denominado abertura) é capaz de resolver detalhes mais pequenos.

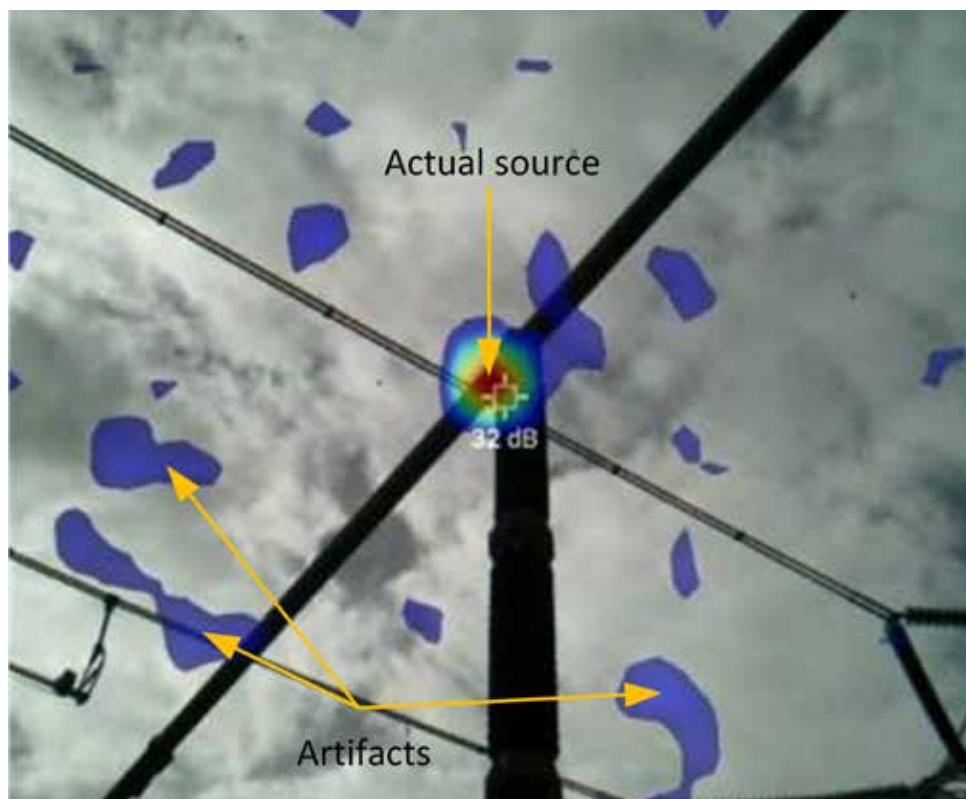
O teorema de Rayleigh quantifica este efeito, aproximando o ângulo mínimo entre duas fontes acústicas abaixo do qual essas serão desfocadas:

$$\text{Ângulo (em graus): } 69,88 \times \frac{\text{Comprimento de onda (em m)}}{\text{Diâmetro da matriz (em m)}}$$

É claro que o aumento do diâmetro da matriz reduz significativamente a portabilidade. Felizmente, muitas fontes de som interessantes, tais como fugas de ar e descargas elétricas, emitem principalmente som a altas frequências. Para estas aplicações, uma matriz acústica compacta não tem um impacto significativo no desempenho.



**Fig. 1:** O diâmetro da matriz e o espaçamento entre microfones são dois parâmetros importantes de uma matriz acústica. As matrizes grandes têm uma melhor resolução a baixas frequências e as matrizes com microfones mais próximos melhoram os artefactos de distorção a altas frequências. O desempenho a altas frequências pode ser melhorado colocando os microfones em espiral (indicada pelas linhas tracejadas brancas).



**Fig. 2:** Exemplo de artefactos na imagem de som projetada.

## O espaçamento entre os microfones determina os artefactos de alta frequência

A menor distância entre microfones corresponde a dois microfones adjacentes (Fig. 1). Assim, o espaçamento entre os microfones está relacionado com o desempenho a altas frequências: quando o espaçamento é demasiado grande, as ondas sonoras não podem ser resolvidas de forma exclusiva, o que resulta em distorção (também conhecido como lóbulos laterais fortes). Isto manifesta-se na forma de artefactos ou fontes "fantasma" (que não estão realmente presentes) na imagem de som projetada (Fig. 2). Uma analogia pode ser encontrada na fotografia, onde podem ocorrer os padrões de Moiré se os píxeis de uma imagem forem demasiados grandes. Se os microfones estiverem posicionados numa rede regular, a frequência acima da qual pode ocorrer distorção é quantificada de acordo com o teorema de Nyquist:

$$\text{Frequência de distorção (em Hz): } 0,5 \times \frac{\text{Velocidade do som (em m/s)}}{\text{Espaçamento entre microfones (em m)}}$$

Para reduzir o espaçamento entre os microfones, o diâmetro da matriz deve ser reduzido (o que afeta a resolução de baixa frequência) ou o número de microfones deve ser aumentado (o que afeta a vida útil da bateria); ambos têm efeitos indesejáveis.

Felizmente, existe uma solução mais inteligente: O teorema de Nyquist pode ser ultrapassado quebrando a regularidade da rede de microfones. No processamento de sinais, este fenómeno é denominado por amostragem dispersa (também conhecida como detecção compressiva), porque uma rede irregular pode ser construída por pontos de amostragem (e, entre outros) a partir de uma rede regular muito mais fina. É claro que, a determinada frequência, até mesmo a amostragem dispersa irá falhar, mas quando implementada corretamente, esta frequência pode ser empurrada para dentro do intervalo ultrassónico.

Existem várias formas de escolher uma rede irregular adequada [10]. Uma solução interessante é inspirada pela natureza: A espiral de Fermat, que descreve a distribuição de sementes numa cabeça de girassol. Esta "espiral de girassol" distribui os microfones de forma eficiente e quase uniformemente na superfície da matriz, mas de tal forma que as distâncias entre pares de microfones variam ligeiramente (Fig. 1). Tal permite que uma matriz em espiral de girassol alivie significativamente os artefactos de distorção em comparação com uma matriz regular com o mesmo número de microfones, ou inversamente, proporciona o mesmo desempenho acústico com menos microfones e, consequentemente, uma maior duração da bateria.

## Conclusões

Fornecemos uma visão geral das considerações relacionadas com o número e a colocação de microfones com impacto no desempenho da matriz e fornecemos as ferramentas básicas para o quantificar. Uma matriz de girassol compacta com cerca de 64 microfones, como a Fluke ii900, proporciona um excelente equilíbrio entre o desempenho acústico, nomeadamente para fontes causadas por fugas de ar ou descargas de energia elétrica, e considerações de utilização, como a vida útil e a portabilidade da bateria.

## Referências

- [1] Karl Rupp, "48 Years of Microprocessor Trend Data," <https://github.com/karlrupp/microprocessor-trend-data> [Consultado em: 7 de agosto de 2020], agosto de 2020.
- [2] Nathan Myhrvold, "Moore's Law Corollary: Pixel Power," The New York Times, junho de 2006.
- [3] Gordon E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," Electronics, vol. 38, n.º 8, abril de 1965.
- [4] Siti Aisyah Zawawi, Azrul Azlan Hamzah, Burhanuddin Yeop Majlis, and Faisal Mohd-Yasin, "A Review of MEMS Capacitive Microphones," Micromachines, vol. 11, n.º 5, pp. 484, maio de 2020, número: 5, editora: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [5] Guinness World Records, "Largest microphone array," <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/largest-microphone-array/> [Consultado em: 18 de setembro 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, em revisão.
- [7] ABD Engineering and Design, "How Much is a Decibel? Sound Perception Vs. Reality," <https://www.abdengineering.com/blog/perception-vs-reality/> [Consultado em: 8 de novembro de 2020].
- [8] B. D. van Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: a versatile approach to spatial filtering," IEEE ASSP Magazine, vol. 5, n.º 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, Suécia, 2007.
- [10] Zebb Prime and Con Doolan, "A comparison of popular beamforming arrays," in Proceedings of Acoustics 2013 Victor Harbor, Victor Harbor, Austrália do Sul, 2013, Australian Acoustical Society.

**Fluke. Keeping your world up and running.®**

**Fluke Ibérica, S.L.**  
Pol. Ind. Valportillo  
C/ Valgrande, 8  
Ed. Thanworth II · Nave B1A 28108  
Alcobendas Madrid  
Tel: +34 91 414 0100  
E-mail: [cs.es@fluke.com](mailto:cs.es@fluke.com)  
[www.fluke.pt](http://www.fluke.pt)

**AresAgante, Lda.**  
Rua Caminho das Congostas,  
320 4250-159 Porto  
Tel: +351 2 2832 9400  
E-mail: [geral@aresagante.pt](mailto:geral@aresagante.pt)  
[www.aresagante.pt](http://www.aresagante.pt)

©2021 Fluke Corporation.  
Todos os direitos reservados. Os dados fornecidos  
estão sujeitos a alterações sem aviso prévio.  
05/2021 210512-pt

A modificação deste documento não é permitida sem  
a autorização escrita da Fluke Corporation.