TANITIM BELGESİ

Akustik dizi performansı ölçümü

Mikrofonları saymaktan daha fazlası

Patrick W.A. Wijnings, MSc
Elektrik Mühendisliği, Doktora adayı

Giriş

Geçtiğimiz on yıllarda teknoloji, bilgisayar performansından [1] dijital fotoğraf makinelerindeki piksel sayısına [2] kadar birçok alanda etkileyici bir gelişme gösterdi. Bu, entegre bir devredeki transistör sayısının hem gözlem hem de tahmin olarak zaman içinde üssel biçimde arttığını gösteren Moore yasasının [3] bir sonucudur. Akustik dizilerde de benzer bir eğilim gözlemlenebilir: Entegre devrelerdeki gelişmeler nedeniyle mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) teknolojisini [4] temel alan dijital mikrofonlar, dizi uygulamalarında analog kondansatör mikrofonlarına ekonomik, minyatür bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır.

Bu, günümüzde mikrofon dizilerinin 32–128 mikrofona, hatta daha fazlasına sahip olmasını sağladı: Guinness dünya rekorlarına [5] göre dünyanın en büyük mikrofon dizisi, etkileyici bir şekilde 4.096 mikrofondan oluşuyor. Ancak bu sayılardan gözlerimizin kamaşmaması gerekir: İşlemcilerdeki megahertz veya fotoğrafçılıktaki megapiksel efsanelerine benzer şekilde, akustik diziler için de bir mikrofon efsanesi olduğu söylenebilir: İnsanların inanmak isteyeceği şeyin aksine, mikrofon sayısı akustik performansa dair her şeyi değiştiren bir ölçüt değildir. Özellikle ulaşılması mümkün olan dizi performansının sınırlarını belirleyen fizik kuralları nedeniyle, mikrofonların yerleşimi de aynı derecede önem teşkil eden bir faktördür.

Bu tanıtım belgesi, mikrofon sayısının ve yerleşiminin dizi performansına etkisi hakkında genel bilgiler vermekte ve söz konusu performansı ölçen temel araçları sunmaktadır.

Ortalama işlemi, gürültüyü azaltır

Her mikrofon, ses basıncı ölçümlerinde kaçınılmaz olarak bir miktar gürültü çıkarır: Üretim toleransları nedeniyle hassasiyet mikrofondan mikrofona biraz değişiklik gösterir [6] ve mikrofonun elektronik aksamı da kendi kendine gürültü çıkarmasına neden olur. (Sessiz) bir ses bu gürültü tarafından gölgede bırakıldığında, ilgili ses kaynağı algılanamaz. Ses, kaynaktan uzaklaştıkça bozulduğundan, bu durum akustik dizinin algılama aralığını da sınırlayabilir. Neyse ki sinyal işlemede bilinen bir olgu, birden fazla mikrofonun ortalama ölçümlerinin gürültüyü azalttığıdır:

$$\text{Gürültü azaltma (dB cinsinden)} = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\text{Mikrofon Sayısı}}\right)$$

Bu formül, mikrofon sayısının iki katına çıktığı her durumda gürültünün 3 dB azaltılacağı anlamına gelir ve bu fark, normal koşullarda insan kulağı tarafından çok az ayırt edilir [7]. Bu nedenle mütevazı bir akustik dizi tek bir mikrofondan çok daha yüksek performans gösterirken (örneğin 64 mikrofonluk bir dizi gürültüyü 18 dB azaltır), mikrofon sayısı daha da arttığında kazanç azalır (örneğin, 128 ve 64 mikrofonluk diziler arasındaki fark yalnızca 3 dB'dir). Ayrıca, ortalama alma işlemiyle azaltılamayacağı için bir noktada tüm mikrofonlarda (ör. güç kaynağından gelen) ortak olan gürültü baskın olmaya başlar. Son olarak, daha fazla mikrofon ya pil ömrünü ve taşınabilirliği feda ettiği ya da görüntü kare hızı veya çözünürlük açısından ödün verilmesini gerektirdiği için daha fazla veri işleme gerektirir.

Özetle: Mikrofon sayısını artırmak gürültüyü azaltırken, bazı durumlarda kazanç azalır ve dezavantajların önüne geçemez. Günümüzün teknolojisiyle optimum mikrofon sayısının 64 civarında olduğuna inanıyoruz.

Hüzmeleme ve dalga yayılımı

Yalnızca mikrofon ölçümlerinin ortalamasını alma işlemi, görüntüleme cihazı görüntüsünün üzerine yansıtılmış sesin görselleştirilmesini sağlamaz. Bunun yerine bir hüzmeleme algoritması [8] kullanılmalıdır. Hüzmeleme dizideki tüm mikrofon sinyallerini birleştirir; böylece kaynaklardan gelen katkılar belirli açılarda yapıcı bir parazit deneyimlerken diğerleri yıkıcı parazitlerle karşılaşmaktadır.

Hüzmeleme işlevini etkinleştiren temel fizik, dalga denklemi tarafından oluşturulur.[9] Özellikle ses, havada sabit bir hızla yayılır:

$$\text{Ses hızı} = 343 \text{ m/sn.}$$

Bu, sesin yalnızca frekansı değil, dalga boyu da olduğu anlamına gelir:

$$\text{Dalga boyu (m cinsinden)} = \frac{\text{Ses hızı (m/sn.)}}{\text{Frekans (Hz cinsinden)}}$$

Dalga boyu, zaman dondurulabilseydi ses dalgasının yayılımı yönündeki fiziksel uzunluğu olarak ifade edilebilirdi.

Hüzmeleme, bir akustik dizisindeki farklı mikrofonların bu dalganın farklı noktalarını ölçmesini sağlar. Bu nedenle, dizinin mikrofonları ile dalga boyu arasındaki mesafenin doğru bir oranda olması, iyi bir akustik performans için çok önemlidir. Düşük frekanslarda dalga boyu büyüktür (ör. 100 Hz'de 3,4 m) ve dizi, mikrofonlar arasındaki uzun mesafelerden de faydalanır. Yüksek ve ultrasonik frekanslarda dalga boyu küçüktür (ör. 20 kHz'de 17 mm) ve dizi, mikrofonlar arasındaki küçük mesafelerden faydalanır.

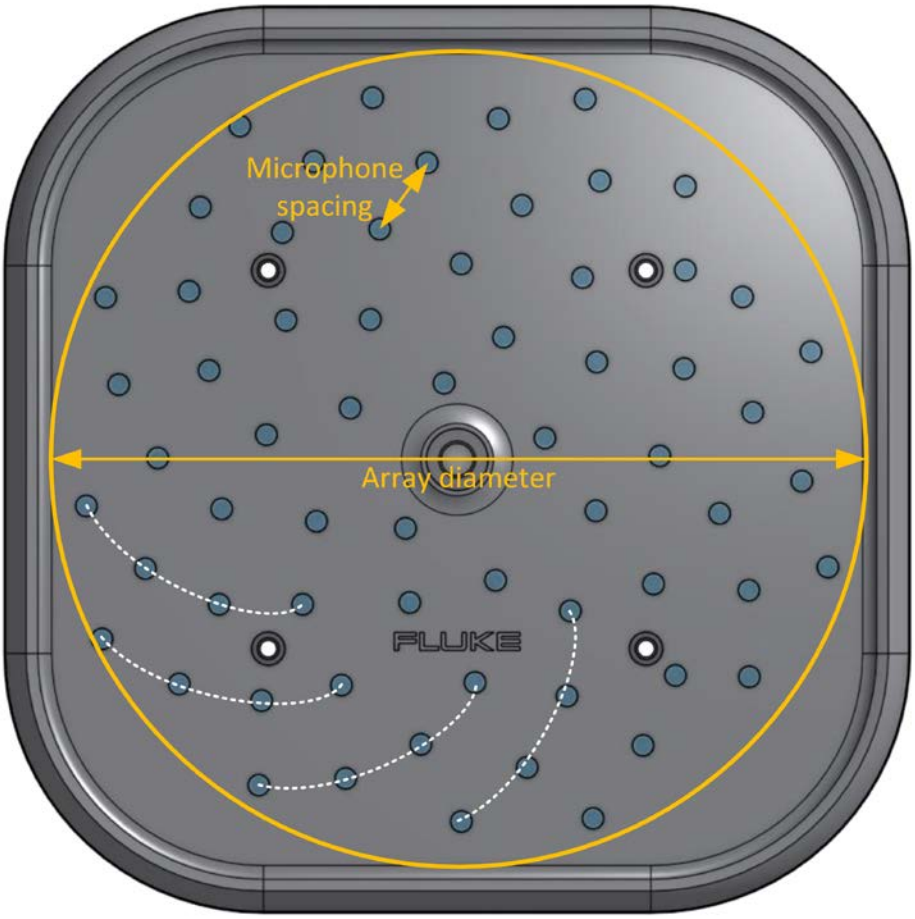
Dizi çapı düşük frekans çözünürlüğünü belirler

Mikrofonlar arası en uzun mesafe, akustik dizinin zıt kenarlarındaki iki mikrofona karşılık gelir. Bu yüzden dizinin çapı (Şekil 1) düşük frekanslardaki çözünürlükle ilgilidir: Dizi çok küçükse, yansıtılan ses görüntüsünde ayrı akustik kaynaklar birbirine karışarak bulanıklaşır. Burada astronomiyle benzerlik kurulabilir: Çapı (yani diyafram açıklığı) daha büyük bir teleskobun daha küçük ayrıntıları çözümleyebilmesi örnek verilebilir.

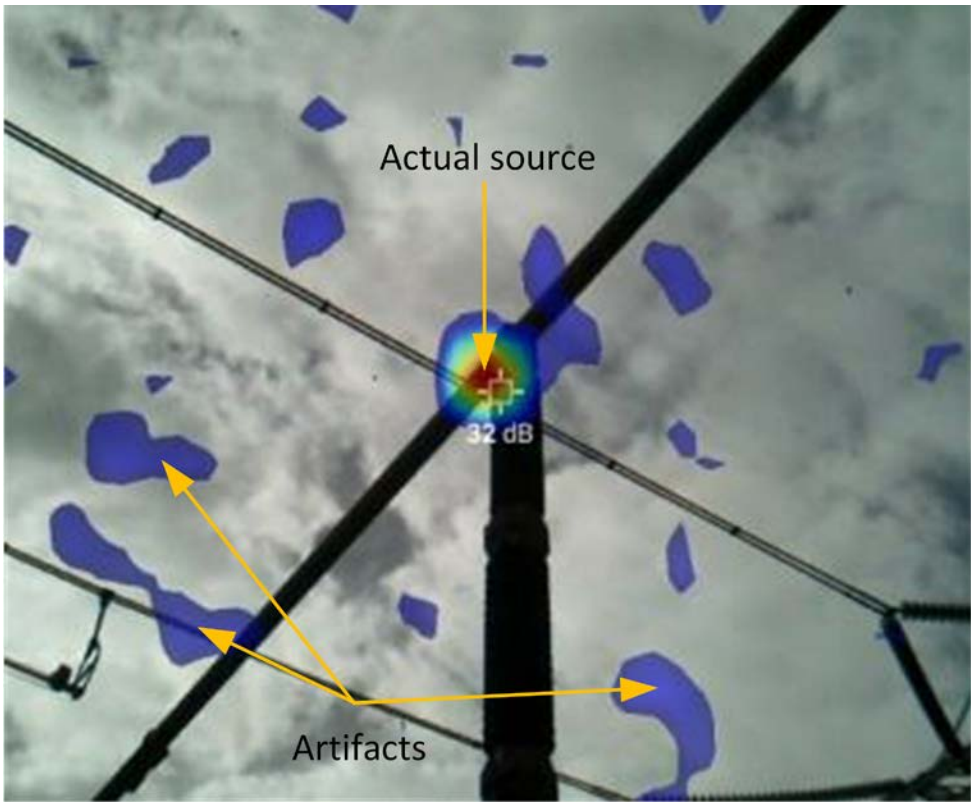
Rayleigh kriteri, iki akustik kaynak arasında, altına düşüldüğünde birlikte bulanıklaşmaya neden olacak minimum açıyı yakınsayarak bu etkiyi ölçer:

$$\text{Açı (derece cinsinden)} = 69{,}88 \times \frac{\text{Dalga boyu (m cinsinden)}}{\text{Dizi çapı (m cinsinden)}}$$

Elbette dizinin çapının artırılması taşınabilirliği büyük ölçüde azaltır. Neyse ki, hava sızıntıları ve elektrik deşarjları gibi birçok ilginç ses kaynağı çoğunlukla yüksek frekanslarda ses yayar. Bu uygulamalarda kompakt bir akustik dizi, performansı önemli ölçüde etkilemez.



Şekil 1: Dizi çapı ve mikrofonlar arası mesafe, akustik dizinin iki önemli parametresidir. Büyük dizilerde düşük frekanslarda daha iyi çözünürlük elde edilir ve birbirine daha yakın mikrofonlara sahip dizilerde yüksek frekanslarda bozulma artefaktları artar. Yüksek frekanslarda performans, mikrofonlar spiral bir formda yerleştirilerek (beyaz kesikli çizgilerle belirtilir) daha da artırılabilir.



Şekil 2: Yansıtılan ses görüntüsündeki artefaktlara örnek.

Mikrofonlar arası mesafe yüksek frekans artefaktlarını belirler

Mikrofonlar arası en kısa mesafe, iki bitişik mikrofona karşılık gelir (Şekil 1). Bu nedenle mikrofonlar arası mesafe, yüksek frekanslardaki performansla ilişkilidir: Mesafe çok büyük olduğunda, ses dalgaları benzersiz bir şekilde çözümlenemez ve bu da bozulmayla sonuçlanır (yani, güçlü yan loblar). Bu durum, yansıtılan ses görüntüsünde artefaktlar veya "hayalet" kaynaklar (gerçekte orada olmayan) olarak ortaya çıkar (Şekil 2). Bu durum fotoğrafçılıkta şu şekilde örneklendirilebilir: Bir fotoğrafın pikselleri çok büyükse Moiré desenleri ortaya çıkabilir. Mikrofonlar normal bir ızgaraya yerleştirilirse, üzerine çıkıldığında bozucu etki oluşabilecek frekans Nyquist kriteri kullanılarak ölçülür:

$$\text{Frekans bozulması (Hz cinsinden)} = 0{,}5 \times \frac{\text{Ses hızı (m/sn.)}}{\text{Mikrofonlar arası mesafe (m cinsinden)}}$$

Mikrofonlar arası mesafeyi azaltmak için dizinin çapı küçültülmeli (düşük frekans çözünürlüğünü etkiler) veya mikrofon sayısı artırılmalıdır (bu da pil ömrünü etkiler); her ikisinin de istenmeyen etkileri vardır.

Neyse ki daha akıllı bir çözüm bulunmaktadır: Nyquist kriteri, mikrofon ızgarasının düzeni bozularak aşılabilir. Sinyal işlemede bu olguya seyrek örnekleme (veya sıkıştırılmış algılama) adı verilir, çünkü düzensiz bir ızgara çok daha ince ve düzenli bir ızgaradan örnekleme noktaları kullanılarak (ve diğerleri atılarak) oluşturulabilir. Elbette bazı frekanslarda seyrek örnekleme bozulsa da bu frekans doğru şekilde uygulandığında ultrasonik aralığın çok daha içine doğru itilebilir.

Uygun bir düzensiz ızgara seçmenin birçok yolu vardır.[10] Doğadan ilham alınarak ortaya konulan ilginç bir çözüm vardır: Fermat spirali, tohumların ayçiçeğinin üzerindeki dağılımını tanımlar. Bu "ayçiçeği spirali", mikrofonları dizi yüzeyine etkili ve neredeyse eşit bir şekilde dağıtır ancak mikrofon çiftleri arasındaki mesafeler biraz farklılık gösterir (Şekil 1). Bu, ayçiçeği dizisinin aynı sayıda mikrofona sahip normal bir diziye kıyasla bozulma artefaktlarını büyük ölçüde azaltmasına veya bunun tersine, daha az mikrofonla aynı akustik performansı sunmasına ve dolayısıyla daha uzun pil ömrü sağlamasına olanak tanır.

Sonuç

Mikrofon sayısı ve yerleşiminin dizi performansını etkilemesiyle ilgili hususlara dair genel bir bakış sunduk ve bunu ölçen temel araçlardan bahsettik. Fluke ii900 gibi 64 civarında mikrofona sahip kompakt bir ayçiçeği dizisi, özellikle hava sızıntıları veya elektrik deşarjlarının neden olduğu kaynaklar için akustik performans ile pil ömrü ve taşınabilirlik gibi kullanılabilirlik konuları arasında mükemmel bir denge sağlar.

Referanslar

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

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

[3] Gordon E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," Electronics, 38. Cilt, No. 8, Nisan 1965.

[4] Siti Aisyah Zawawi, Azrul Azlan Hamzah, Burhanuddin Yeop Majlis ve Faisal Mohd-Yasin, "A Review of MEMS Capacitive Microphones," Micromachines, 11. Cilt, No. 5, Sayfa no: 484, Mayıs 2020, Numara: 5 Yayıncı: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

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

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

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

[8] B. D. van Veen ve K. M. Buckley, "Beamforming: a versatile approach to spatial filtering," IEEE ASSP Magazine, 5. Cilt, No. 2, Sayfa no: 4–24, Nisan 1988.

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

[10] Zebb Prime ve Con Doolan, "A comparison of popular beamforming arrays," Şu yayından: Proceedings of Acoustics 2013 Victor Harbor, Victor Harbor, Güney Avustralya, 2013, Australian Acoustical Society.

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

Fluke TURKIYE
P.O. Box 1186
5602 BD Eindhoven
The Netherlands
www.fluke.com.tr

For more information call:
In the U.S.A. (800) 443-5853
In TR +31 (0)40 267 5100
In Canada (905) 890-7600
From other countries +1 (425) 446-5500

©2021 Fluke Corporation. All rights reserved.
Data subject to alteration without notice.

05/2021 210512-tr

Modification of this document is not permitted without written permission from Fluke Corporation.