

Einsatz eines Mikrofonarrays zur Trennung von Quellmechanismen

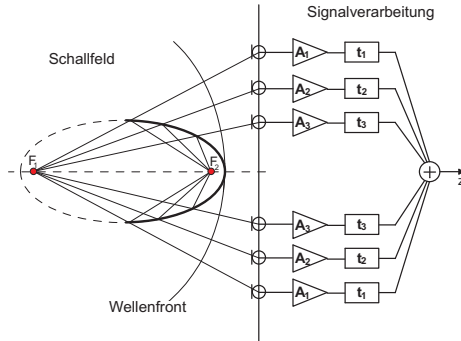
Ennes Sarradj¹, Christian Schulze¹, Andreas Zeibig²¹Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, D-01099 Dresden, Email: ennes.sarradj@akustikforschung.de²Technische Universität Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, D-01062 Dresden

Abbildung 1: Analogie zwischen einem elliptischen Hohlspiegel und einem Mikrofonarray-Beamformer

Einführung

Mikrofonarrays sind mit Hilfe der bekannten „beamforming“-Algorithmen als elektronische Richtempfänger für eine Lokalisierung von Schallquellen mit guter örtlicher Auflösung geeignet. Das Ergebnis ist üblicherweise eine Abbildung der relativen Schalldruckbeiträge (akustische Fotografie). Aus der Abbildung kann jedoch keine Information entnommen werden, wie diese Schalldruckbeiträge einzelnen Quellmechanismen zuzuordnen sind. Darüber hinaus wird durch Rauschen und sogenannte „ghost images“ der Dynamikbereich der Abbildung der Schalldruckbeiträge eingeschränkt. Das führt dazu, dass lediglich die dominierenden Schallquellen abgebildet werden, während weniger starke Schallquellen durch das Rauschen der Abbildung überdeckt werden. Eine Lösung für dieses Problem, die von mehreren vorhandenen Schallquellen ausgeht, soll im folgenden vorgestellt werden.

Mikrofonarray-Beamforming

Mit einem Mikrofonarray wird ein Hohlspiegel als Richtempfänger nachgebildet (siehe Abbildung 1). Die an den M Mikrofonen eintreffenden Schallsignale werden zum Ausgangssignal des Beamformers aufaddiert:

$$z(t) = \sum_{i=1}^M w_i A_i y_i(t - \Delta t_i). \quad (1)$$

w_i sind optionale Wichtungsfaktoren, die noch zusätzlich angewendet werden können. A_i und Δt_i hängen vom Punkt \vec{x}_0 ab, auf den das Array ausgerichtet werden soll. Das Spektrum des Summensignals ist:

$$Z(\omega) = \sum_{i=1}^M w_i e_i(\vec{x}_0) Y_i(\omega), \quad (2)$$

wobei e_i sich aus A_i und Δt_i ergibt. Für das Leistungsspektrum wird nun mit dem komplex konjugierten Summensignal multipliziert:

$$|Z(\omega)|^2 = Z(\omega) Z^*(\omega) = \mathbf{e}(\vec{x}_0)^H \mathbf{W} \mathbf{Y}(\omega) \mathbf{Y}(\omega)^H \mathbf{W}^H \mathbf{e}(\vec{x}_0). \quad (3)$$

$\mathbf{e}(\vec{x}_0)$ ist der „steering vector“. \mathbf{W} ist eine Diagonalmatrix, die alle w_i in der Hauptdiagonale enthält. Das innerste Produkt (3) ist die Kreuzspektralmatrix S_{xy} aller Mikrofon-signale. Wird das Leistungsspektrum von (3) auf das Quadrat der Spur von \mathbf{W} normalisiert, ergibt sich ein Wert, der dem Schalldruckeffektivwertquadrat im Mittelpunkt des Arrays entspricht, der von einer Quelle bei \vec{x}_0 verursacht wird:

$$S(\omega) = \frac{\mathbf{e}(\vec{x}_0)^H \mathbf{W} \mathbf{S}_{xy} \mathbf{W}^H \mathbf{e}(\vec{x}_0)}{(\text{trace } \mathbf{W})^2}. \quad (4)$$

Mehrere Quellen

Meistens ist nicht nur eine Schallquelle vorhanden, sondern viele Quellen bzw. eine Verteilung von Quellen. Um einzelne Quellen gut separieren zu können, muss die Richtcharakteristik des Mikrofonarray-Beamformers eine sehr schmale Richtkeule haben und in alle anderen Richtungen so insensitiv wie möglich sein. Da diese Eigenschaften hauptsächlich von der Anordnung der Mikrofone abhängen, lohnt es sich, diese zu optimieren [1].

Quellmechanismen und orthogonale Schallfelder

In einem realen Schallfeld treten meist mehrere unabhängige aerodynamische, thermische oder mechanische Schallentstehungsmechanismen gleichzeitig auf. Die durch sie jeweils hervorgerufen Teil-Schallfelder überlagern sich zum Gesamt-Schallfeld und sind zeitlich und örtlich nicht korreliert. Deshalb sind die den Teil-Schallfeldern zugeordneten Schalldruckverteilungen orthogonal. Wenn es N durch Quellstärken q beschreibbare Quellmechanismen gibt, dann ist das Ausgangssignal des Mikrofons i :

$$y_i = \sum_{j=1}^N f_{ij} q_j. \quad (5)$$

f_{ij} hängt dabei vom Quellmechanismus und der Mikrofonposition ab.

Orthogonales Beamforming

Wird (5) in (2) eingesetzt, ergibt sich

$$Z(\omega) = \sum_{i=1}^M w_i e_i(\vec{x}_0) \sum_{j=1}^N f_{ij} Q_j(\omega). \quad (6)$$

Sind die Teilschallfelder orthogonal, dann kann das auch für die Vektoren $\mathbf{f}_j q_j$ angenommen werden (falls eine große Zahl von Mikrofonen vorhanden ist). Die Quellme-

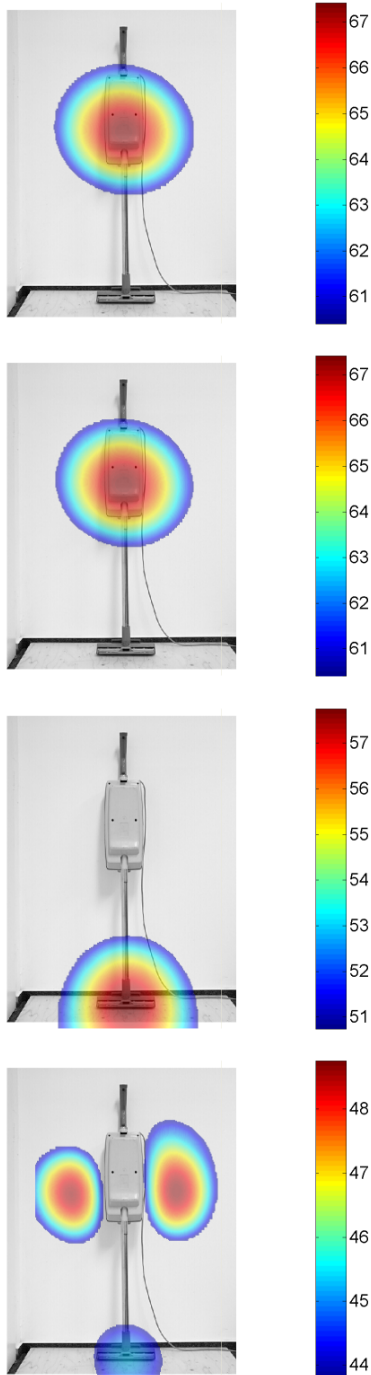


Abbildung 2: Quellmechanismen an einem Handstaubsauger (1 kHz-Oktavband): Schalldruckpegel aller Anteile zusammen (oben), 1., 2. und 3. Komponente (Mitte und unten)

chanismen können als unterschiedlich *definiert* werden, falls $\mathbf{f}_j Q_j$ orthogonal sind. Wegen der Orthogonalität gilt $\mathbf{f}_j Q_j Q_k^* \mathbf{f}_j^H = 0$, wenn $j \neq k$. Somit kann die bei Umformung von (6) die auftretende Kreuzspektralmatrix als Summe von Komponenten geschrieben werden:

$$\mathbf{S}_{xy} = \sum_{j=1}^N \mathbf{S}_{xyj}. \quad (7)$$

Jede dieser Komponenten repräsentiert einen Quellmechanismus. Somit kann das durch jeden Quellmechanismus erzeugte Schalldruckquadrat einzeln abgebildet werden:

$$S(\omega)_j = \frac{\mathbf{e}(\vec{x}_0)^H \mathbf{W} (\mathbf{S}_{xyj} - \text{diag } \mathbf{S}_{xyj}) \mathbf{W}^H \mathbf{e}(\vec{x}_0)}{(\text{trace } \mathbf{W})^2 - \text{trace } \mathbf{W}}. \quad (8)$$

Damit können Quellen und Quellmechanismen sehr effektiv voneinander getrennt werden. Der nutzbare Dynamikbereich wird erheblich erweitert.

Beispiel-Ergebnisse

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens soll kurz anhand eines Beispiels demonstriert werden. Ein Handstaubsauger (Abbildung 2) wurde mit einem Mikrofonarray mit 32 Mikrofonen, angeordnet in zwei konzentrischen Kreisen (Außendurchmesser 1,30 m) untersucht.

Das Gesamtgeräusch wird bei 1 kHz durch die Turbine im Innern des Staubsaugers dominiert (1. Komponente), weitere Anteile liefern das Ansaugergeräusch (2. Komponente) und Strömungsgeräusche aus dem Innern des Gerätes, die hauptsächlich durch die seitlichen Luftauslassöffnungen des Staubsaugers abgestrahlt werden (3. Komponente). Der Schalldruckpegel der zuletzt genannten Geräusche liegt etwa 20 dB unter dem dominierenden Turbinengeräusch. Ohne orthogonales Beamforming wäre es durch den eingeschränkten Dynamikumfang des Arrays nicht möglich gewesen, die zugehörigen Schallquellen zu orten.

Zusammenfassung

Die automatische Trennung von Quellmechanismen ist durch den Einsatz des orthogonalen Beamforming mit Mikrofonarray möglich. Aus einer Aufnahme lassen sich so mehrere Schallquellenverteilungen berechnen, was auch den Nachweis schwacher oder durch Störgeräusche überlagert Schallquellen ermöglicht.

Literatur

- [1] C. Schulze, E. Sarradj, A. Zeibig: Characteristics of Microphone Arrays. Proc. Inter-Noise 2004, Prague
- [2] C. Schulze, E. Sarradj, A. Zeibig: Der Einfluss unterschiedlicher Geometrien bei praktischen Messungen mit Mikrofonarrays. DAGA 2005