Beamforming - Zeitbereich versus Frequenzbereich

Olaf Jaeckel, Ralf Schröder

Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI e.V.),
12489 Berlin-Adlershof, Deutschland, Email: jaeckel@gfai.de; schroeder@gfai.de

Einleitung

Bei bildgebenden akustischen Verfahren haben in den letzten Jahren auf dem „Delay-and-Sum“-Beamforming beruhende Kartierungssysteme (Akustische Kamera) größere praktische Bedeutung zur schnellen Lokalisierung der Hauptschallquellen von Maschinen, Anlagen und Geräten erlangt. Bei diesem Verfahren wird ein Mikrofonarray rein rechnerisch auf einen Punkt in der Meßebene bzw. im Raum fokussiert, indem nach Kompensation der Laufzeitunterschiede der einzelnen Mikrofonkanäle eine kohärente Aufaddition aller Zeitsignale und eine anschließende Normierung auf die Kanalzahl vorgenommen werden. Für die derart rekonstruierte Zeitfunktion lassen sich dann interessierende Kenngrößen wie etwa Schalldruck oder Pegelwerte berechnen. Wendet man dieses Prinzip auf alle interessierenden Meßpunkte der Objekt-Ebene bzw. einer Modelloberfläche an, erhält man eine Kartierung der Schalldruckverteilung über dem Objekt, welche in aktuellen Systemen meist als Falschfarbdarstellung mit automatischer Überlagerung eines optischen Fotos bzw. eines daraus extrahierten Kantenbildes des Meßobjektes dargestellt wird.

In diesem Beitrag sollen die praktischen Vor- und Nachteile einer Berechnung des Beamforming-Verfahrens sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich gegenübergestellt werden. Es wird aufgezeigt, daß die in der Akustik sehr stark tradierte, einseitige Betrachtung von Signalen ausschließlich im Frequenzbereich in der Historie des Beamforming (Einschränkung auf Schmalband-Beamforming) und in der Theorie der Arraymeßtechnik oftmals den Blick auf die eigentliche Leistungsfähigkeit des Verfahrens versperrt hat. Die Bedeutung einer hohen Signalbandbreite für ein erfolgreiches Beamforming wird demonstriert.

Berechnung im Zeitbereich

Die unmittelbare Berechnung des Delay-and-Sum-Beamforming im Zeitbereich ist die einfachste und zugleich historisch älteste Methode, siehe z.B. [1].

Für ein Sensor-Array mit M Mikrofonen ergibt sich die rekonstruierte Zeitfunktion eines Ortes $\mathbf{x}$ nach Gleichung (1). Dabei sind die $f_i(t)$ die gemessenen Zeitfunktionen der einzelnen Mikrofone, die w_i sind optionale Gewichte, und die Δ_i stellen die relativen Laufzeitdifferenzen zwischen den einzelnen Mikrofonkanälen dar. Diese berechnen sich dem Betrage nach durch Abziehen des Minimums direkt aus den absoluten Laufzeiten $\tau_i = |\mathbf{r}_i| / c$.

$$\hat{f}(\mathbf{x},t) = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} w_i f_i(t-\Delta_i) \qquad (1)$$

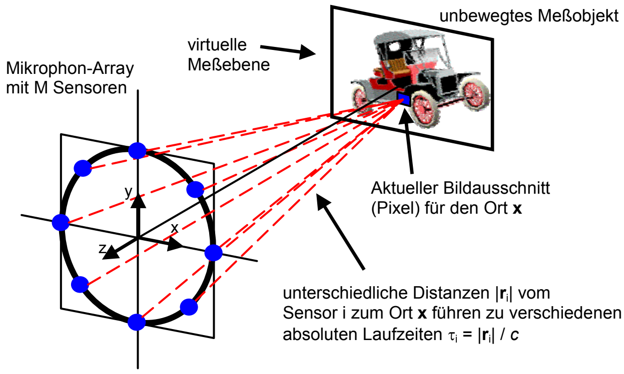

Abbildung 1: Prinzip des Delay & Sum – Beamforming: Ein Mikrofonarray wird rein rechnerisch auf einen Meßpunkt fokussiert, für den der Schalldruck bestimmt wird. Abscannen der gesamten Meßebene liefert eine akustische Karte der Schalldruckverteilung des Objektes.

Dabei ist c die Schallgeschwindigkeit in Luft und $\mathbf{r}_i$ bezeichnet den Ortsvektor vom Mikrofon i zum aktuellen Fokuspunkt $\mathbf{x}$ des Arrays. Abbildung 1 zeigt das Prinzip. Es hat sich aus praktischer Sicht als günstig erwiesen, für die Berechnung des Abstandes immer mit dem Kugelwellenradius zu rechnen, da dieser bei größeren Meßentfernungen automatisch in das Modell der ebenen Welle übergeht.

Trotz der offensichtlichen Einfachheit von Gleichung (1) hat sich das Delay-and-Sum-Verfahren als in der Praxis äußerst leistungsfähig erwiesen. Dabei bietet die direkte Berechnung im Zeitbereich insbesondere bisher kaum erkannte Vorteile für transiente und stark impulshaltige Signale.

Berechnung im Frequenzbereich

In der traditionellen Akustik sind theoretische Betrachtungen von Wellenmodellen vorherrschend. Signale werden üblicherweise nicht direkt im Zeitbereich verwendet, sondern als Superposition harmonischer Basis-Funktionen im komplexen Frequenzbereich betrachtet. Mit der Verfügbarkeit schneller Fouriertransformationen und immer leistungsfähigerer Signalprozessoren und Rechner wurde diese Dominanz auch in den Anwendungen weiter verstärkt.

Gleichung (1) läßt sich unter Ausnutzung der Linearität sowie des Verschiebungssatzes der Fourier-Transformation auch im Frequenzbereich berechnen. Nach der Fouriertransformation der einzelnen Mikrofonsignale ergibt sich nun:

$$\hat{F}(\mathbf{x},\omega) = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} w_i F_i(\omega)\cdot e^{-j\theta_i}. \qquad (2)$$

Dabei sind die $\theta_i = \omega\Delta_i(\mathbf{x})$ die ortsabhängigen Phasenwinkel, um die jede Teilfrequenz ω eines Signales verschoben werden muß, um in der Gesamtüberlagerung aller Spektralkomponenten nach (2) gerade die relative Laufzeitverschiebung der einzelnen Mikrofonsignale untereinander zu kompensieren. Die richtungsabhängigen Terme $exp(-j\theta_i)$ in der Gleichung (2) werden oft zu einem Vektor zusammengefaßt und dieser wird als Steuer- oder auch „Steering"-Vektor bezeichnet.

Vor- und Nachteile beider Domänen

Unbestritten bietet die Rechnung im Frequenzbereich auf den ersten Blick einige Vorteile. So sind die Mikrofonsignale im Fourier-Bereich nicht mehr konvolutiv, sondern nur noch über eine komplexe Multiplikation mit der Ortsinformation verknüpft. Diese Entkopplung erlaubt die unabhängige Verwendung der Kreuzspektralmatrix der transformierten Mikrofonsignale für eine verbesserte Signalverarbeitung. Dies führte zur Entwicklung einer Vielzahl angepaßter und weiterentwickelter Algorithmen (adaptives Beamforming, Eigenraum-Verfahren etc.) zur Lösung spezieller Aufgaben im Frequenzbereich, siehe hierzu z.B. [1] und [2].

Ein Nachteil der Arbeit im Frequenzbereich ist jedoch offensichtlich: Da die Fourier-Domäne überhaupt keine Informationen über Zeitpunkte bzw. Zeitdifferenzen kennt, sondern *nur* Phaseninformationen (theoretisch unendlich langer) harmonischer Basisfunktionen, wird der Aufwand zur Berechnung von (2) für jeden Meßpunkt gerade für breitbandige Signale beträchtlich. Die erforderliche Phasenrotation θ_i ist nämlich bei konstantem Δ_i für jede einzelne Frequenzkomponente ω eine andere, der Phasenwinkel muß somit für jede Spektrallinie separat bestimmt werden.

In der Zeit, als die grundlegende Theorie des Beamforming bereits entwickelt wurde, standen die dafür erforderlichen Rechenleistungen einfach noch nicht zur Verfügung. Das führte zu einer überaus starken Dominanz von Schmalbandverfahren in der gesamten Array- und Beamformingliteratur. Betrachtet man nur eine einzige Frequenzkomponente, dann kann man eine konstante Laufzeitdifferenz auch als eine konstante Phasenverschiebung für diese Frequenz auffassen. Auf dieser Grundlage wurden die meisten traditionellen Beamforming-Verfahren entwickelt.

Diese nicht prinzipiell, sondern nur historisch bedingte Einschränkung auf den Schmalbandfall verstellte aber in der Folge die Sicht des Akustikers auf die Stärken und Vorzüge einer direkten Implementierung von Gleichung (1) im Zeitbereich bis heute nahezu vollständig. Das Rechnen im Zeitbereich besitzt jedoch immer dann sehr große Vorteile, wenn die Signale ohnehin breitbandig sind, also bei allen impulshaltigen, transienten Signalen und überhaupt bei den meisten technischen Geräuschen, welche überwiegend breitbandige Spektren haben und eher selten nur aus ganz wenigen tonalen Komponenten zusammengesetzt sind.

Die Vor- und Nachteile einer Berechnung des Beamformings im Zeit- und Frequenzbereich sind aus der Sicht unserer praktischen Anwendungserfahrung in der Tabelle 1 zusammengefaßt.

Tabelle 1: Zeit- und Frequenzbereich, Vor- und Nachteile

Merkmal, Eigenschaft	**Eignung BF im Zeitbereich**	**Eignung BF im Frequenzbereich**
Signale: periodisch, sinusoidal, schmalbandig, stark tonal	schlecht (Aliasing)	schlecht (Aliasing)
Signale: Schmalband-Rauschen	eher schlecht	eher schlecht
Signale: Breitband-Rauschen, statistisch stationäre Signale	sehr gut	sehr gut
Signale: Impulse, Transienten, statistisch instationäre Signale	sehr gut	schlecht
Realisierbarkeit kurzer Rechenzeiten	gut	eher schlecht
Anwendung von algorith. Korrekturverfahren	eher schlecht	sehr gut

Diskussion und Schlußfolgerungen

Die Tabelle zeigt: Beamforming ist, unabhängig von der Domäne der Berechnung, für schmalbandige Signale prinzipiell am schlechtesten geeignet. Die im Akustiklabor üblichen Terzbandauswertungen sehen die Methode deshalb auch immer nur am Rande des Versagens, aber nie im Bereich ihrer eigentlichen Leistungsfähigkeit. Beamforming ist in der Praxis als Breitband-Analyseverfahren einzusetzen, zur Signalortung ist der Umweg über den Frequenzbereich meist gar nicht nötig (s. Abb. 2).

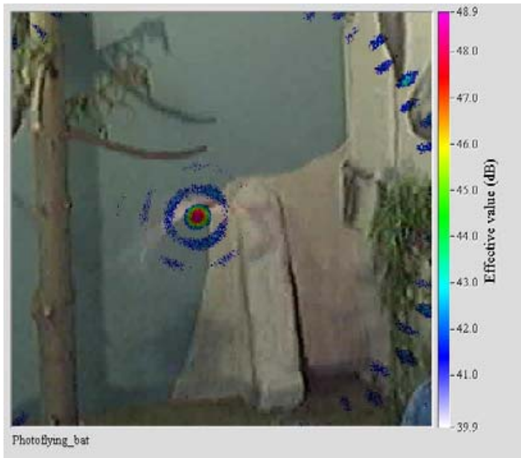

Abbildung 2: Akustisches Foto einer Fledermaus, nach Filterung (25kHz bis 50kHz) im Zeitbereich berechnet.

Beamforming im Frequenzbereich hat mit Transienten die gleichen Probleme wie das Spektrogramm: Ist die Zeitauflösung fein genug, um das Signal zu finden, ist die Frequenzauflösung meist schon sehr schlecht. Fensterung, Überlappen und Mitteln helfen nur bedingt weiter. Das Wellenmodell ist hier einfach nicht adäquat. Demgegenüber sind zeitlich hochaufgelöste akustische Filme auch stark pulshaltiger Signale im Zeitbereich problemlos realisierbar.

Literatur

[1] Johnson, D.H.; Dudgeon, D.E.: Array Signal Processing. Concepts and Techniques. Prentice Hall PTR: Englewood Cliffs, NJ, 1993.

[2] H. von Trees: Optimum Array Processing. J. Wiley & Sons, 2002.