

NOISE SOURCE IDENTIFICATION USING BEAMFORMING

David Kurc

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xkurcd00@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Jiří Schimmel

E-mail: schimmel@feec.vutbr.cz

Abstract: This paper is focused on the noise source identification using microphone arrays and beamforming as the signal processing method. It describes parts of the basic system, which consists of two-dimensional grid array of 6 microphones and Delay-And-Sum beamformer implemented in MATLAB. Some of the basic principles and limitations of beamforming are explained and then tested by practical experiment. The results are discussed and another approach is proposed.

Keywords: beamforming, microphone array, acoustic signal, delay-and-sum, noise

1 ÚVOD

V souvislosti s identifikací zdrojů hluku na měřených objektech se jako metoda zpracování signálů snímaných polem mikrofonů kromě akustické holografie v blízkém poli objevuje beamforming. Použití beamformingu se uplatňuje zejména při měření ve středních až dlouhých vzdálenostech od zdroje (ve srovnání s vyzářovanou vlnovou délkou). V praxi hlavně při analýze pohybujících se zdrojů, měření v komplexních prostorách (např. uvnitř automobilu) nebo v aerodynamických tunelech (díky schopnosti potlačení hluku pozadí). V následujícím textu bude představen základní systém pro identifikaci zdrojů hluku, využívající aplikaci vytvořenou v prostředí MATLAB. Vlastnosti tohoto systému budou otestovány uskutečněním praktického experimentu.

2 SYSTÉM PRO IDENTIFIKACI ZDROJŮ HLUKU

Systém určený pro identifikaci zdrojů hluku pomocí beamformingu se skládá z mikrofonového pole a z metody postprocessingu, jejíž úkolem je dále zpracovat získané akustické signály. Typ mikrofonního pole je vhodné volit v souvislosti s konkrétní aplikací, obecně lze však dosáhnout nejlepších výsledků při použití nepravidelných kruhových konfigurací se značným počtem mikrofonů [2]. Typ použité metody beamformingu závisí obzvláště na předpokládaném spektrálním obsahu měřeného akustického signálu. V našem případě byla zvolena základní varianta Delay-And-Sum (DAS) beamformeru, která je vhodná spíše pro zpracování signálů s úzkopásmovým charakterem.

2.1 MIKROFONOVÉ POLE

K dosažení co nejlepších výsledků musí být v poli použity zkalibrované mikrofony jednoho typu se stejnou, ideálně vyrovnanou kmitočtovou charakteristikou. Pro účely identifikace zdroje zvuku v horizontální i vertikální rovině poloprostoru je nutné, aby pole mělo dvoudimenzionální charakter. Toho jsme dosáhli sestavením pravidelného mřížového pole s celkem šesti mikrofony v matici o dvou řadách a třech sloupcích. Ekvidistantní vzdálenost mikrofonů činila $r = 5$ cm. Rozteč 5 cm zaručuje, že při zpracování signálů s vlnovou délkou $\lambda \geq 2r$ (tedy o kmitočtu pod 3,4 kHz při rychlosti šíření zvuku 344 m/s) nebude docházet k prostorovému aliasingu, který má za následek vznik dalších nežádoucích hlavních laloků v přijímací charakteristice [1].

2.2 DELAY-AND-SUM BEAMFORMER

DAS beamformer může být definován jako prostorový filtr, který je zařazen na výstupu sensorového pole a vytváří určitou přijímací charakteristiku [1]. Za účelem zobrazení mapy rozložení akustického tlaku je hlavní lalok přijímací charakteristiky postupně natáčen do všech směrů zkoumaného poloprostoru. Prvním krokem při zpracování funkcí je načtení jednotlivých navzorkovaných signálů z mikrofonů do sloupců matice na základě konfigurace pole. Dále je třeba zadat vzdálenosti mikrofonů vzhledem k referenčnímu mikrofonu (v našem případě levý horní z čelního pohledu). To nám umožní pomocí příslušných vztahů [1] a geometrie pole určit časový rozdíl příchodu signálu (TDOA) na jednotlivé mikrofony. Následuje smyčka pro postupné natáčení směrové charakteristiky a výpočet energie v příslušném směru, která tvoří jádro funkce.

První fází je synchronizace. Vypočtené časové rozdíly, závislé na požadovaném úhlu natočení pole, jsou po vynásobení vzorkovacím kmitočtem převedeny na počet vzorků. Tato hodnota se rozdělí na celou a zlomkovou část. Celočíslná část potřebného zpoždění (či předstihu), vyjádřená v počtu vzorků, je vnucena do signálů přidáváním (či ubíráním) odpovídajícího počtu nulových vzorků na začátek příslušných sloupců matice. Tím dojde k vzájemnému časovému posunutí signálů. Aby nedocházelo k chybám v důsledku zaokrouhlení, které se projevují zejména v krajních polohách natočení, nesmí se zanedbat ani zlomková část zpoždění. Hodnoty signálu však máme k dispozici pouze v časech, které jsou celočíselné násobky vzorkovací periody. Řešením může být buď rekonstrukce a převzorkování signálu, nebo častěji využití metod interpolace. Pro naše účely byla zvolena Lagrangeova interpolace realizovaná Farrowovou strukturou [3]. Jedná se prakticky o FIR filtr, jehož koeficienty jsou závislé na hodnotě konkrétního zlomkového zpoždění a lze je získat pomocí vztahů uvedených v [3]. Výsledného zpoždění signálů o neceločíselnou hodnotu se dosáhne konvolucí příslušných FIR filtrů s jednotlivými sloupci signálové matice. Všechny tyto zpožďovací úkony mají za následek natočení výsledné přijímací charakteristiky do požadovaného směru. Komponenty signálu, přicházející na mikrofony z tohoto směru, jsou potom synchronizovány. Ve druhé fázi dochází k váhování časově sladěných signálů (sloupců matice) a následně k jejich sečtení, aby vytvořily jediný výstupní signál beamformeru. Tento proces je popsán vztahem

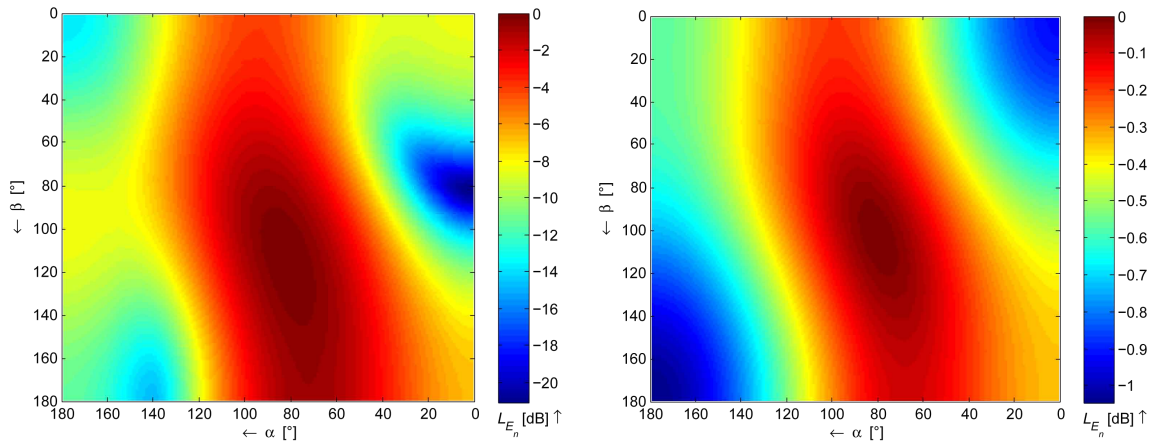
$$p(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m y_{a,m}, \quad (1)$$

kde $p(t)$ je výstupní signál Delay-And-Sum beamformeru v čase t , $y_{a,m}$ je zpožděný výstupní signál m -tého mikrofonu a w_m je váhovací konstanta m -tého mikrofonu. Synchronizační část tedy řídí směr natočení pole a vážené součty řídí šířku hlavního laloku přijímací charakteristiky pole a charakter postranních laloků. Váhovací koeficienty je pro naše účely vhodné nastavit na hodnotu 1 [2]. Z výstupního signálu získáme příslušným výpočtem hodnotu energie signálu v konkrétním směru natočení pole. K samotné identifikaci potom dojde postupným natáčením pole do všech horizontálních i vertikálních poloh, sledováním hodnot energie v každém ze směrů natočení a jejich vynesením do výsledné mapy. V okamžiku, kdy bude pole natočeno přímo do směru zdroje hluku, signály na jednotlivých mikrofonech se budou sčítat ve fázi a dojde k maximálnímu nárůstu energie.

3 PRAKTICKÝ EXPERIMENT

Pro realizaci experimentu bylo pomocí šesti zkalibrovaných mikrofonů Behringer ECM-8000 zkonstruováno mřížové pole popsané v části 2.1. Všechna měření probíhala z důvodu eliminace rušivých elementů uvnitř bezdovukové komory. Předpokladem přesné funkce DAS beamformeru je, že dopadající zvukové vlny se dají považovat za rovinné, tedy vzdálenost pole od zdroje zvuku je několikanásobně větší než vlnová délka emitovaného zvuku, případně rozměry zdroje. Při rostoucí vzdálenosti pole od zdroje se však zhoršuje schopnost úhlové rozlišitelnosti systému. Výsledná vzdálenost je tedy formou kompromisu. V našem případě byla (i z důvodu omezené velikosti prostoru komory) zvolena

vzdálenost 151 cm. Jako zdroj hlukového signálu sloužila aktivní dvoupásmová reproduktorová soustava, která přehrávala testovací zvukový signál. Osa reprosoustavy byla umístěna ve směru cca 80° horizontálně, 110° vertikálně. Současně snímané signály byly z mikrofonů přes předzesilovače a A/D převodníky (při použitím vzorkovacím kmitočtu 48 kHz) vedeny do PC, kde došlo k jejich záznamu v programu Cubase a následnému zpracování funkcí `beamformer_2D.m`. Jako hlukový signál byl použit harmonický signál o kmitočtu 2 kHz, který vzhledem k rozměrům pole s rezervou vyhovuje podmínce prostorového aliasingu i předpokladu vzdáleného pole. Jako další testovací signál jsme použili krátký záznam řeči. Výsledné mapy rozložení akustického tlaku jsou zobrazeny na obrázku 1.



Obrázek 1: Identifikace zdroje hluku v poloprostoru – závislost úrovně normované energie signálu na úhlu natočení beamformery v horizontálním (α) a vertikálním (β) směru. Hlukový signál má charakter: (vlevo) harmonický – úzkopásmový, (vpravo) řečový – širokopásmový.

4 ZÁVĚR

V mapách z obrázku 1 můžeme pozorovat, že maximum energie je soustředěno přibližně v oblasti kolem souřadnic osy reprosoustavy. To lze i vzhledem k rozměrům použitého zdroje hluku považovat za úspěšný výsledek (kmitočet 2 kHz se totiž pravděpodobně blíží dělicímu kmitočtu reprosoustavy, k reprodukci jsou tedy použity oba reproduktory). Zdroj je přesněji lokalizován v horizontální rovině než ve vertikální (pravděpodobně díky rozložení mřížky pole 2:3). Značný rozptyl vyšších hodnot energie je způsoben velkou šířkou hlavního laloku a nezanedbatelnou velikostí postranních laloků přijímací charakteristiky pole. Tyto nedostatky lze zlepšit zvýšením počtu mikrofonů nebo změnou geometrické konfigurace pole. Dále pozorujeme, že hodnoty úrovně energie se v případě řečového signálu pohybují pouze v rozmezí cca 1 dB, na rozdíl od 21 dB v případě harmonického signálu. Důvodem může být periodicitu harmonického signálu nebo širokopásmovost signálu řečového. Experimentem jsme ověřili, že tento základní systém je schopen identifikace zdrojů hluku s určitou přesností. Byly také uvedeny některé postupy, které přispívají ke zlepšení jeho funkčnosti.

REFERENCE

- [1] BENESTY, J., CHEN, J., HUANG, Y. *Microphone array signal processing*. Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 240 s. ISBN 978-3-540-78611-5.
- [2] CHRISTENSEN, J.J., HALD, J. *Beamforming*. Brüel&Kjær Technical Review No. 1, 2004, 54 s. ISSN 0007–2621.
- [3] VÄLIMÄKI, V. *Discrete-Time Modeling of Acoustic Tubes Using Fractional Delay Filters*. Helsinki, December 1995. 192 s. ISBN 951-22-2880-7.