

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

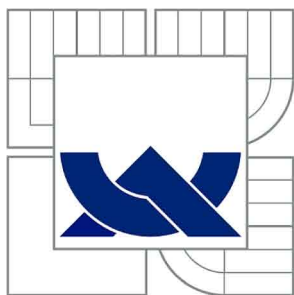
IDENTIFIKACE ZDROJŮ HLUKU POMOCÍ BEAMFORMINGU

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

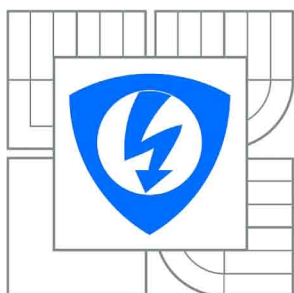
Bc. DAVID KURC

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# IDENTIFIKACE ZDROJŮ HLUKU POMOCÍ BEAMFORMINGU

NOISE SOURCE IDENTIFICATION USING BEAMFORMING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DAVID KURC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. David Kurc

**ID:** 72938

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Identifikace zdrojů hluku pomocí beamformingu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte metody měření akustického tlaku a akustické intenzity pro identifikaci zdrojů hluku a problematiku beamformingu. Realizujte aplikaci pro osobní počítač, která pomocí vícekanálové zvukové karty nebo akviziční karty Agilent bude zaznamenávat akustický tlak snímaný mikrofonním polem až 16 mikrofonů v různých konfiguracích staticky nebo metodou skenování a bude vytvářet a zobrazovat hlukovou mapu nebo mapu intenzity snímaného zvukového pole pomocí metod beamformingu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Brandstein, M., Ward, D. (Eds.) Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications. Springer-Verlag Berlin, 2001. 389 s. ISBN 3-540-41953-5.
- [2] Ryan, J., G., Near-Field Beamforming for Microphone Arrays. IEEE Xplore, 1997. DOI: 0-8186-7919-0/97
- [3] Smetana, C. a kol., Hluk a vibrace, měření a hodnocení. Sdělovací technika, Praha 1998. ISBN: 80-901936-2-5
- [4] Škvor, Z., Akustika a elektroakustika. Praha : Academia, 2001, pp. 527. ISBN 80-200-0464-0

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá systémy identifikace zdrojů hluku pomocí mikrofonních polí, které jako metodu zpracování nasnímaných akustických signálů využívají beamforming. V práci jsou popsány jednotlivé prvky takového systému a je uvedeno srovnání s jinými systémy, které slouží k podobnému účelu (např. NAH). Jsou zmíněny různé typy mikrofonních polí a jejich vliv na výslednou schopnost identifikace zdroje. Dále se práce blíže zaměřuje na techniku Delay-And-Sum, na které jsou vysvětleny základní principy a omezení beamformingu. V praktické části je popsána implementace metody DAS v programovacím prostředí MATLAB a v jazyce C, realizace konkrétních konstrukcí mikrofonních polí a sestavení kompletních systémů schopných identifikace zdrojů hluku. Tyto systémy byly otestovány provedením praktického experimentu. Dosažené výsledky v podobě map rozložení akustické energie ve snímaném prostoru jsou interpretovány v poslední kapitole.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

beamforming, mikrofon, pole, akustický signál, DAS, hluk, identifikace, zvuk

## **ABSTRACT**

This master's thesis is focused on the noise source identification using microphone arrays and beamforming as the signal processing method. It describes parts of such a system and provides a comparison with other systems that serve a similar purpose (eg. NAH). Various types of microphone arrays are mentioned with their influence on the resulting ability to identify the noise source. We are further focusing on Delay-And-Sum technology, on which we are explaining the basic principles and constraints of beamforming. The practical part describes the implementation of the DAS method in MATLAB and C language, the specific structures of built microphone arrays and assembly of complete systems capable of identifying sources of noise. These systems were tested by performing a practical experiment. Achievements in the form of distribution maps of acoustic energy in the focused space are interpreted in the last chapter.

## **KEYWORDS**

beamforming, microphone, array, acoustic signal, delay-and-sum, noise, identification, sound

KURC, David *Identifikace zdrojů hluku pomocí beamformingu*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 74 s. Vedoucí práce byl Ing. Jíří Schimmel, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Identifikace zdrojů hluku pomocí beamformingu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. a také panu Ing. Ivanu Míčovy za užitečnou pomoc a cenné rady při zpracování mé práce.

# OBSAH

Úvod	11
<b>1 Beamforming v akustickém testování a měření</b>	<b>12</b>
1.1 Počátky využití mikrofonních polí . . . . .	12
1.2 Akustický teleskop . . . . .	12
1.3 Zkoumání pohybujících se zdrojů . . . . .	13
1.4 Aerodynamické tunely . . . . .	14
1.5 Akustická kamera . . . . .	14
1.6 Inverzní metody . . . . .	16
<b>2 Metody identifikace zdrojů hluku pomocí mikrofonního pole</b>	<b>17</b>
<b>3 Beamforming</b>	<b>19</b>
3.1 Delay-And-Sum beamforming . . . . .	20
3.1.1 Váhování . . . . .	23
3.1.2 Dynamické vlastnosti Delay-And-Sum beamformeru . . . . .	23
3.1.3 Přijímací charakteristika . . . . .	24
3.1.4 Prostorový aliasing . . . . .	27
3.1.5 Rozlišení . . . . .	28
<b>4 Mikrofonní pole</b>	<b>30</b>
4.1 Pravidelná pole . . . . .	31
4.1.1 Uniformní lineární pole . . . . .	31
4.1.2 Mřížové pole . . . . .	33
4.1.3 Křížové pole . . . . .	33
4.2 Nepravidelná pole . . . . .	34
4.2.1 Optimalizovaná pole . . . . .	34
<b>5 Praktická realizace</b>	<b>36</b>
5.1 Popis prvků systému . . . . .	36
5.2 Konstrukce mikrofonních polí . . . . .	39
5.3 Softwarové zpracování signálů . . . . .	42
5.3.1 Popis algoritmu DAS beamformeru . . . . .	43
5.4 Výsledky identifikace zdrojů hluku . . . . .	49
5.4.1 Systém s mřížovým polem . . . . .	50
5.4.2 Systém s částečným mřížovým polem . . . . .	58
5.4.3 Systém s částečným křížovým polem . . . . .	58
5.4.4 Systém s elipsovým polem . . . . .	58

<b>6 Závěr</b>	<b>65</b>
<b>Literatura</b>	<b>66</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>68</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>70</b>
<b>A Obsah přiloženého CD</b>	<b>71</b>
<b>B Spouštění vytvořených funkcí</b>	<b>72</b>
B.1 MATLAB . . . . .	72
B.2 C . . . . .	73

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Zařízení pro lokalizaci letadel používané holandskou armádou v 1. Světové válce [9]. . . . .	13
1.2	První zařízení pro vizualizaci identifikace zdrojů hluku – Akustická kamera [8]. . . . .	15
3.1	Lineární mikrofónové pole s ekvidistantním rozmístěním mikrofónů (typ ULA). . . . .	20
3.2	Natočení mikrofónního pole o úhel $\alpha$ do směru příchodu vln od zdroje.	25
3.3	Přijímací charakteristika mikrofónního pole typu ULA s deseti mikrofóny a parametry $d = 8$ cm, $\alpha = 90^\circ$ a $f = 2$ kHz: (nahore) v polárních souřadnicích, (dole) v Kartézských souřadnicích a v dB. . . . .	26
3.4	Přijímací charakteristika mikrofónního pole typu ULA s deseti mikrofóny při nedodržení teorému prostorového vzorkování (parametry: $d = 8$ cm, $\alpha = 90^\circ$ a $f = 2500$ kHz): (nahore) v polárních souřadnicích, (dole) v Kartézských souřadnicích a v dB. . . . .	29
4.1	Typy mikrofónních polí: a)křížové, b)mřížové, c)náhodné, d)spirálové, e)kotoučové, f)polokotoučové. . . . .	32
5.1	Vzájemné umístění mikrofónního pole a zdroje hluku v bezdozvukové komoře: (nahore) půdorys, (dole) bokorys. Pozn. 1: Vertikální úhly zdrojů vůči poli mají na výstupu beamformeru jiný počátek osy – vertikálnímu úhlu $\beta$ v obrázku tedy odpovídá ve výsledné mapě úhel $180^\circ - \beta$ . Pozn. 2: Měřítko neodpovídá skutečným poměrům velikostí. . . . .	37
5.2	Směrová charakteristika prvního mikrofónu pole pro kmitočty 100, 1000 a 10000 Hz – závislost RMS úrovně harmonického signálu v dB <sub>SPL</sub> na směru příchodu signálu. . . . .	38
5.3	Sestrojená mikrofónní pole: a)mřížové pole s maximální horizontální konfigurací, b)mřížová pole s nižší horizontální konfigurací, c)částečné mřížové pole se zvýšenou vertikální konfigurací, d)čtvercové pole, e)částečné křížové pole, f)elipsovité pole. Pozn.: Všechny uvedené rozměry jsou v centimetrech. . . . .	39
5.4	Přijímací charakteristika mikrofónního pole typu ULA se čtyřmi mikrofóny a parametry $d = 5$ cm, $\alpha = 90^\circ$ a $f = 2$ kHz v Kartézských souřadnicích a v dB. . . . .	41
5.5	Vývojový diagram DAS beamformeru. . . . .	44
5.6	Modulová kmitočtová charakteristika antialiasingové dolní propusti s mezním kmitočtem 3440 Hz. . . . .	51

5.7	Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz v poloze 1: (nahore) závislost velikosti normované energie signálu na úhlu natočení beamformeru, (dole) závislost úrovně normované energie signálu na úhlu natočení beamformeru. . . . .	52
5.8	Identifikace zdroje řeči v poloze 1: závislost velikosti normované energie signálu na úhlu natočení beamformeru. . . . .	53
5.9	Spektrogram použitého úseku řečového signálu filtrovaného dolní propustí z obrázku 5.6. . . . .	53
5.10	Spektrogram akustického signálu holicího strojku bez filtrace dolní propustí z obrázku 5.6. . . . .	54
5.11	Identifikace elektrického holicího strojku v poloze 1: (nahore) bez filtrace antialiasingovou DP, (dole) s použitím filtrace antialiasingové DP. . . . .	55
5.12	Identifikace elektrického holicího strojku v poloze 1 – použití jiného pracovního módu holicího strojku. . . . .	56
5.13	Identifikace vrtačky: (nahore) úsek signálu vrtačky při plném výkonu v poloze 2, (dole) úsek signálu vrtačky bezprostředně po spuštění cca v ose pole. . . . .	57
5.14	Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz systémem s mikrofonním polem z obrázku: (nahore) 5.3b-vlevo, (dole) 5.3b-vpravo. . . . .	59
5.15	Identifikace systémem s mikrofonním polem z obrázku 5.3b-vpravo: (nahore) holicí strojek v poloze 2, (dole) úsek signálu vrtačky bezprostředně po spuštění cca v ose pole. . . . .	60
5.16	Identifikace vrtačky při plném výkonu systémem se čtvercovým mikrofonním polem z obrázku 5.3d. Vrtačka byla umístěna cca v ose pole. . . . .	61
5.17	Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 5 kHz – demonstrace vzniku aliasingu a obrazů fiktivních zdrojů. . . . .	61
5.18	Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz s použitím částečného křížového pole. . . . .	62
5.19	Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz systémem s elipsovým mikrofonním polem z obrázku 5.3f. Zdroj v pozici 1. . . . .	63
5.20	Identifikace holicího strojku systémem s elipsovým mikrofonním polem. Strojek byl v poloze středu předchozích polí. . . . .	63
5.21	Identifikace zdroje řečového signálu v poloze 1 systémem s elipsovým mikrofonním polem. . . . .	64
5.22	Selhání identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 5 kHz systémem s elipsovým mikrofonním polem. . . . .	64

# ÚVOD

Využívání mikrofónových polí při akustických měřeních je dnes poměrně časté. V souvislosti s identifikací zdrojů hluku na měřených objektech se jako metoda zpracování signálů snímaných mikrofony objevuje, kromě akustické holografie, zejména beamforming. V dalším textu se budeme krátce zabývat vývojem systémů využívajících tuto techniku nebo metody založené na podobném principu, které beamformingu předcházely. Součástí bude zároveň popis technických problémů souvisejících s identifikací zdrojů hluku, v jejichž řešení se beamforming nejvíce uplatňuje.

Dále uvedeme porovnání pracovních podmínek, za kterých je aplikace beamformingu výhodnější oproti akustické holografii. Teoretický popis funkčnosti beamformingu a vlastností základní metody Delay-And-Sum je součástí kapitoly 3. Zmíníme také kritéria, která je vhodné dodržet pro správnou funkci systému. Kapitola 4 se věnuje různým typům konstrukcí mikrofónných polí a jejich vlivu na výslednou schopnost systému identifikovat zdroje hluku.

Praktická část práce se potom skládá ze sestavení systémů určeného k identifikaci zdrojů hluku, které sestávají z různých typů testovaných mikrofónných polí a softwarového zpracování nasnímaných signálů metodou beamformingu, implementovanou v programovacím prostředí MATLAB a v jazyce C. Popis jednotlivých prvků systému a způsobu jejich realizace je uveden v příslušné kapitole. Výsledkem funkce systémů jsou grafická znázornění mapy rozložení akustického tlaku ve snímaném prostoru. Výsledky dosažené s konkrétními systémy jsou interpretovány v kapitole 5.4.

# 1 BEAMFORMING V AKUSTICKÉM TESTOVÁNÍ A MĚŘENÍ

## 1.1 Počátky využití mikrofonních polí

Signály nasnímané polem mikrofonů lze zpracovat různými způsoby. Beamformingu v akustice předcházely obecnější metody postprocessingu, založené na prakticky totožném principu. Jsou to „Sfázovaná pole mikrofonů“ a „Mikrofonní anténa“. Sfázovaná pole byla vyvinuta jako radarové antény ve druhé světové válce. Ve studené válce potom pomohla vylepšit technologii sonaru pro lokalizaci ponorek. Dnes nachází využití hlavně v lékařském zobrazování pomocí ultrazvuku. V těchto aplikacích se jedná o pole aktivní, neboť vlny jsou nejen přijímány, ale zároveň i polem vyzařovány. Pasivní verzi využívají ponorky ve formě taženého lineárního pole senzorů.

V první světové válce používala francouzská armáda zařízení, pomocí kterého se dal určovat směr přilétajícího nepřátelského letadla [8]. Systém byl velice primitivní, skládal se ze dvou polí, ve kterých bylo umístěno šest obrácených akustických horn, jejichž vývody byly svedeny přes dva zvukovody do uší poslouchající osoby. Obě pole byla ve vzájemné vzdálenosti dvou metrů, což asi desetkrát vylepšilo přirozenou lokalizační schopnost posluchače. Tím byly vlastně položeny základy beamformingu v reálném čase. Podobný lokalizační systém můžete vidět na obrázku 1.1.

## 1.2 Akustický teleskop

První systém založený na použití pole mikrofonů navrhl v roce 1974 John Billingsley pod názvem „Akustický teleskop“ [8]. O dva roky později potom Billingsley a Kinns vyvinuly hardwarový systém pro lokalizaci zdrojů hluku na leteckých motorech v reálném čase. Použili při tom čtrnáct kondenzátorových měřících mikrofonů v uniformním lineárním poli, jejichž výstupy byly zavedeny do mini počítače, kde docházelo k digitalizaci s rozlišením 8 bitů. Vzorkovací kmitočet činil 20 kHz. Analogové signály také byly zaznamenávány na magnetické pásky v rekordéru, což omezovalo počet použitých kanálů. Řetězec obsahoval i analogové dolní propusti pro dodržení vzorkovacího teorému. K dispozici měly pouze dva A/D převodníky pro 14 signálů, muselo tedy docházet k multiplexování. Vzorkovací interval převodníků byl  $6\ \mu\text{s}$  (tedy kmitočet 167 kHz). To vedlo k vzájemnému zpoždění vzorků jednotlivých signálů až  $36\ \mu\text{s}$ , s tím ovšem v dalším zpracování softwarovým vybavením nebylo počítáno. Data byla zpracována a výsledky byly v reálném čase zobrazeny na obrazovce barevného televizoru.



Obr. 1.1: Zařízení pro lokalizaci letadel používané holandskou armádou v 1. Světové válce [9].

Jednalo se tedy o první aplikaci beamformingu na technický problém tohoto typu, konkrétně šlo o měření emisí hluku na leteckém motoru Rolls-Royce, používaném v letadlech Concorde. Technický postup řešení byl už velice podobný těm moderním. Od té doby však došlo k rapidnímu vylepšení v oblastech hardwaru i softwaru.

### 1.3 Zkoumání pohybujících se zdrojů

Schopnost analyzovat zdroje hluku na pohybujících se objektech byla poprvé testována na vysokorychlostních vlacích roku 1977 [8]. Měřicí vzdálenost byla kolem 5 metrů a rychlost vlaku byla asi 80 m/s, zpracování tedy vyžadovalo velice rychlé časy průměrování. Lineární pole s 15-ti uniformě rozmístěnými mikrofony bylo natočeno horizontálně nebo vertikálně, aby byla umožněna identifikace zdrojů hluku v horizontálním i vertikálním směru.

Došlo k vylepšení odstupů signálu od šumu ve výsledných hlukových mapách pomocí implementace lineární interpolace mezi získanými vzorky v časové oblasti. Úroveň nejbližších postranních laloků klesla na rozdíl 26 dB oproti hlavnímu laloku.

Výsledkem těchto testů nakonec bylo zjištění, že vyzařování hluku kol není závislé na rychlosti vlaku, ale pouze na vlastních kmitočtech kol. Porovnání aplikovaných hlukových absorbérů tím pádem mohlo proběhnout pouze při jednom průjezdu vlaku

a měření se velice urychlilo.

Dalším stupněm vývoje byla vnořená pole, která měla za úkol vyřešit problémy s prostorovým aliasingem u kmitočtů s vlnovou délkou menší než dvojnásobek vzdálenosti mezi mikrofony (viz kapitola 3.1.4). S použitím 29-ti mikrofونů se vytvořila 3 vnořená pole po 15-ti, přičemž menší pole mělo vždy poloviční vzdálenost mezi mikrofony.

Vytvořením polí ve tvaru písmene „X“ (tzv. křížová pole) mohli být zobrazeny přímo dvoudimenzionální mapy. Při použití základního beamformingu je však směrová charakteristika tohoto typu pole silně ovlivněna postranními laloky a výsledné mapy jsou značně zkresleny. Tento problém ale může být alespoň částečně kompenzován speciálními metodami postprocessingu [4].

Velkou oblastí využití beamformingu se stala identifikace zdrojů hluku na letících letadlech [4]. Pouze měření v průběhu letu totiž může poskytnout spolehlivé výsledky emisí hluku konkrétních typů letadel. Zobrazení akustických emisí letícího letadla bylo poprvé provedeno v roce 1986 [8]. O dvanáct let později potom ve Frankfurtu nad Mohanem poprvé použili vývojovou strategii Monte Carlo pro stanovení umístění mikrofونů v poli. Následkem byla schopnost potlačit nežádoucí boční laloky na třech kmitočtech vzdálených o oktávu.

U testování externích hlukových emisí automobilů našel beamforming využití zejména proto, že velká část emitovaného hluku závisí na interakci kol s vozovkou, což může být jen těžko testováno s realistickou zátěží pneumatik v laboratoři nebo aerodynamickém tunelu.

## 1.4 Aerodynamické tunely

V aerodynamických tunelech je problémem především vysoká úroveň hluku v pozadí. Díky uzavřeným prostorům se musí brát v potaz odrazy od stěn. Také je třeba uvažovat ovlivnění zvukových vln proudem vzduchu v tunelu. Z různých metod pro zpracování naměřených dat je např. postup potlačení hluku proudu vzduchu odstraněním diagonálních prvků křížové spektrální matice. Touto problematikou společně s výzkumem vlivu odrazů od stěn se zabývá například Robert P. Dougherty [4].

## 1.5 Akustická kamera

Kombinace Akustické antény s digitální kamerou byla poprvé předvedena roku 1999 na veletrhu v Hannoveru pod názvem „Akustická kamera“ (viz obrázek 1.2) [8]. Kamera zobrazovala snímanou scénu a téměř v reálném čase ji překrývala vypočtenou

hlukovou mapou zobrazující umístění zdrojů na objektech vydávajících zvuk. Média tento přístroj značně zaujal, což umožnilo technice mikrofonních polí stát se jednou z důležitých metod pro akustická testování. V prvním modelu byla použita základní metoda beamformingu DAS a pole s mikrofony umístěnými podél hran akusticky neprůzvučné obdélníkové konstrukce. To mělo za následek ovlivnění výsledků velkou kmitočtovou závislostí citlivosti pole. Přístroje podobné tomuto, ovšem s výrazně vylepšenou funkčností, jsou dnes k dispozici od různých výrobců [7]. Dalším stupněm vývoje se staly soustavy s mikrofonním polem kulového charakteru, které umožňují všesměrové zpracování, vhodné obzvláště v uzavřených prostorách. Mohou být použity navíc i k rekonstrukci zvukového pole v blízkosti snímací koule.



Obr. 1.2: První zařízení pro vizualizaci identifikace zdrojů hluku – Akustická kamera [8].

## 1.6 Inverzní metody

Zvukové mapy získané pomocí beamformingu jsou výsledkem konvoluce bodových zdrojů s funkcí rozložení zdrojů zvuku [4]. Úrovně akustického tlaku zobrazované mapou jsou spolehlivé pouze v případech, kdy se jedná o bodové zdroje s dostatečnou vzájemnou vzdáleností. Výsledky záleží na šířce paprsku (hlavního laloku) přijímací charakteristiky pole (viz kapitola 3.1.3). Důsledkem je, že amplitudy zdrojů zvuku jsou z takovýchto map obtížně odvoditelné. Hladiny zdrojů zvuku mohou být stanoveny pouze v případě, že je možné invertovat konvoluci. Výsledkem bude soubor bodových zdrojů. V tomto případě musí být funkce rozložení zdrojů v poli vypočtena pro všechny možné pozice zdrojů a pro každé kmitočtové pásmo, které nás zajímá. Následně se stanoví úrovně neznámých zdrojů pomocí metody nejmenších čtverců s podmínkou, že se uvažují pouze pozitivní úrovně. Tato dekonvoluce je v zásadě možná, ale vede k objemným a složitým výpočtům, k jejichž řešení jsou třeba iterativní postupy. Jednou z jednodušších metod je tzv. CLEAN algoritmus nebo metoda DAMAS [4]. Dekonvoluce map zobrazujících pohyblivé zdroje je potom ještě složitější.

## 2 METODY IDENTIFIKACE ZDROJŮ HLUKU POMOCÍ MIKROFONNÍHO POLE

Pro identifikaci zdrojů hluku pomocí mikrofonního pole se obecně používají dvě metody, je to

- **Akustická holografie v blízkém poli (NAH),**
- **Beamforming.**

Pomocí NAH můžeme získat hlukové mapy s vysokým rozlišením [5]. K měření používá pole ve tvaru pravidelné mřížky, umístěné v blízkosti zdroje. Pro správnou funkci musí tato mřížka zachytit větší část celkové zvukové energie vyzařené měřeným zdrojem do poloprostoru. To znamená, že musí pokrýt nejen celý zdroj ale navíc úhel vyzařování zdroje přibližně  $45^\circ$  [7]. Aby nedocházelo k aliasingu, velikost rozteče mezi jednotlivými mikrofony v mřížce musí být menší než polovina vlnové délky nejvyššího kmitočtu vyzařovaného měřeným zdrojem. Z toho důvodu se množství potřebných měřících bodů (mikrofonů) rychle zvyšuje v případě, kdy je velikost zdroje mnohem větší než nejmenší vlnová délka, kterou vyzařuje, což se u vyšších kmitočtů stává často. Stejný problém nastane v případě, že z nějakého důvodu není možné umístit měřící mřížku do dostatečné blízkosti zdroje. Potom, díky požadovanému úhlu pokrytí  $45^\circ$ , musí být oblast měření obrovská (čelní plocha vlnoplochy odpovídající vyzařovacímu úhlu  $45^\circ$  roste kvadraticky se vzdáleností od zdroje). V těchto případech je mnohem vhodnější použít pro zpracování signálů z mikrofonů metodu beamformingu [7].

Beamforming je měřící technika využívající mikrofonní pole k lokalizaci zdrojů zvuku ve středních až dlouhých vzdálenostech od zdroje. Lokalizace zdroje je provedena v podstatě určením amplitud rovinných vln, dopadajících na pole z vybraného souboru směrů. Úhlové rozlišení je nepřímo úměrné průměru pole v jednotkách vlnové délky, takže pole by mělo být výrazně větší než vlnová délka, abychom dostali dostatečně jemné rozlišení. Na nízkých kmitočtech je ale toto kritérium jen velice těžko splnitelné. Zde bude tedy rozlišení špatné.

Narozdíl od holografie ale beamforming nevyžaduje, aby pole mělo větší rozměry nežli zdroj. V případě pro beamforming typických nepravidelných polí nesmí být vzdálenost od zdroje o mnoho menší, než je průměr pole [7]. Na druhou stranu se ale snažíme udržet tuto vzdálenost co nejmenší, abychom dosáhli co nejjemnějšího rozlišení na povrchu zdroje.

Důležitým rozdílem mezi beamformingem a akustickou holografií je, že beamforming je schopen využívat nepravidelné geometrie polí, například dokonce i geometrie náhodné. Na použití konečného počtu měřících bodů v rovině lze nahlížet jako na prostorové vzorkování zvukového pole. Holografie naopak vyžaduje pravidel-

nou obdélníkovou strukturu měřících bodů vhodnou pro aplikaci dvoudimenzionální prostorové diskretní Fourierovy transformace (prostorová 2D DFT). Ve vzdáleném poli bude pravidelná mřížka potlačovat prostorový aliasing velmi dobře, avšak jen do doby, než rozteč mikrofونů překročí polovinu nejmenší vlnové délky zdroje, pak začnou být nežádoucí artefakty aliasingu velice rušivé. Oproti tomu nepravidelná pole mohou nabídnout mnohem hladší přechod [5]. Efekt prostorového aliasingu dokáží držet na přijatelné úrovni až do podstatně vyšších kmitočtů a to se stejnou průměrnou hustotou vzorkování. Tím se vysvětluje, proč jsme pomocí beamformingu schopni měřit na poměrně vysokých kmitočtech s docela malým množstvím mikrofونů.

### 3 BEAMFORMING

Beamforming může být použit v oblastech detekování přítomnosti určitých signálů, získání směru příchodu (DOA), zvýraznění signálu v záznamu ovlivněném šumem, ostatními nežádoucími zdroji signálu a odrazy. Obvykle je definován jako prostorový filtr, který je zařazen na výstupu sensorového pole a má za úkol zajistit určitý vzor směrovosti [1]. Průběh takové prostorové filtrace se dá rozdělit do dvou částí:

- synchronizace,
- vážené sčítání.

Synchronizační proces spočívá ve zpoždění (nebo naopak urychlení) výstupu každého senzoru (mikrofonu) o vhodnou hodnotu času tak, aby komponenty signálu přicházející z požadovaného směru byly synchronizovány. V tomto kroku je potřeba určit časový rozdíl příchodu jednotlivých signálů (TDOA), který se dá získat z měření mikrofonním polem za použití k tomu určených technik odhadu časového zpoždění. Ve druhém kroku (vážené sčítání) se váží sladěné signály a následně se sčítají dohromady, aby vytvořily jediný výstup.

Oba tyto procesy hrají významnou roli ve vytváření výsledné přijímací charakteristiky. Synchronizační část řídí směr natočení a vážené součty řídí šířku hlavního laloku a charakteristiku postranních laloků. Velká pozornost je často věnována právě druhému kroku, obzvláště stanovení váhovacích koeficientů. V mnoha aplikacích mohou být váhovací koeficienty získány na základě požadované přijímací charakteristiky, obvykle je ale výhodnější odhadovat tyto koeficienty adaptivním způsobem založeným na charakteru konkrétního signálu a šumu [3].

Beamformery (tvarovače paprsku) založené na prostorové filtraci byly navrženy pro úzkopásmové signály, které mohou být charakterizovány jediným kmitočtem. Pro širokopásmové signály, které mají bohatý kmitočtový obsah (jako například řeč nebo širokopásmový šum) nebudou tyto beamformery poskytovat stejnou přijímací charakteristiku na různých kmitočtech a šířka paprsku se bude snižovat s rostoucím kmitočtem (jde tedy o nepřímou úměru) [3]. To je dáno vzájemnou vzdáleností mikrofónů v poli vůči velikosti vlnové délky na různých kmitočtech, které signál obsahuje. Pokud takovýto systém použijeme, pak když bude směr natočení paprsku jiný než úhel dopadajícího signálu, dojde k filtraci nízkých kmitočtů spektra signálu [1]. Navíc šum, který přichází ze směru odlišného než je natočení paprsku beamformeru, nebude potlačen stejnoměrně v celém jeho spektru, což vede k určitým rušivým artefaktům na výstupu pole. Proto musely být vyvinuty metody širokopásmového beamformingu s neměnnou odezvou [3].

Běžný způsob jak vytvořit takový beamformer je provést dekompozici spektra signálu do úzkých pásem a tato pásma zpracovat nezávisle jednotlivými úzkopásmovými beamformery [1]. To je vlastně ekvivalentní s aplikací prostorově proměnného

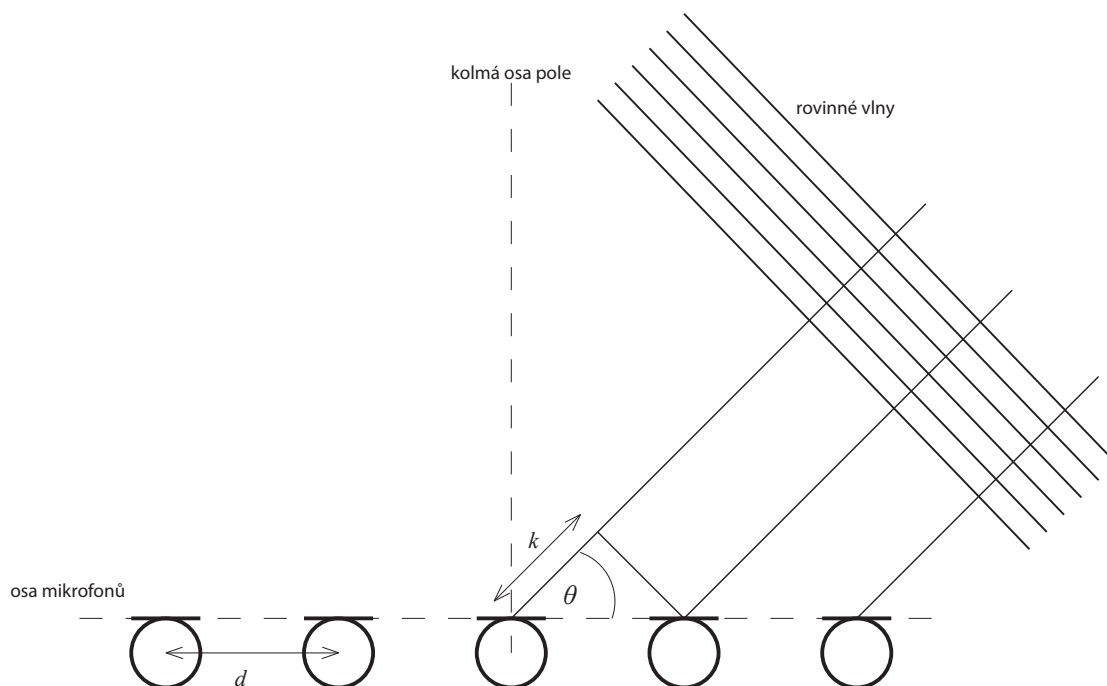
filtru na výstupy pole. Tato struktura je obecně známa pod názvem Filter-And-Sum (filtrované sčítání). Jádrem problému širokopásmového beamformingu se pak stává určování koeficientů prostorově proměnného filtru.

Beamforming má tedy dvě související oblasti využití [12]. Jednou je lokalizace zdrojů zvuku a druhou je prostorová filtrace. Lokalizace zdroje se snaží zjistit pozici zdroje v prostoru odkud signál přichází. Prostorová filtrace vytváří vlastně elektronicky natočitelnou anténu s úzkým paprskem, která má velký zisk v jednom určeném směru a v ostatních směrech má značný útlum.

Lokalizace zdroje zvuku probíhá vlastně na podobném principu, na jakém funguje lokalizace pomocí našich dvou uší v mozku. Podobně je také náš mozek schopen zaměřit se na jeden konkrétní zvuk a zbytek nevnímat, dokonce i pokud jsou okolní rušivé zvuky poměrně hlasité.

### 3.1 Delay-And-Sum beamforming

Principy beamformingu jsou nejlépe patrné z popisu základního beamformery Delay-And-Sum (DAS). Uvažujme uniformní lineární pole mikrofonů jako na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Lineární mikrofónové pole s ekvidistantním rozmístěním mikrofonů (typ ULA).

Počet mikrofonů v poli je  $M$  a mají konstantní vzájemnou vzdálenost  $d$  v rovině  $xy$  našeho souřadného systému. Vzdálenost  $m$ -tého mikrofonu od referenčního pak je

$d_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ). Předpokládáme, že signál v každém kanálu bude mít určité zpoždění a útlum. Výstupy mikrofonů pole v čase  $t$  tedy budou

$$y_m(t) = a_m s[t - t_s - \mathcal{F}_m(\tau)] + v_m(t) \quad (3.1)$$

$$= x_m(t) + v_m(t) . \quad (3.2)$$

kde  $a_m$  je útlum kanálu zapříčiněný způsobem šíření vlny a má hodnotu v intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ ,  $s(t)$  je neznámý signál produkovaný zdrojem (může být obecně úzkopásmový nebo širokopásmový),  $t_s$  je čas šíření vlny od zdroje k referenčnímu mikrofonu,  $v_m(t)$  je aditivní šum na  $m$ -tém mikrofonu,  $\tau$  je relativní zpoždění mezi mikrofony (často je také nazýváno právě TDOA),  $\mathcal{F}_m(\tau)$  je relativní zpoždění mezi mikrofony 1 a  $m$ , přičemž  $\mathcal{F}_1(\tau) = 0$  a  $\mathcal{F}_2(\tau) = \tau$ ,  $x_m(t)$  je akustický signál snímaný mikrofonem v čase  $t$ .

Za předpokladu, že zvuková vlna vznikla v dostatečné vzdálenosti, abychom mohli prostor s mikrofonním polem považovat za vzdálené pole, půjde o rovinnou vlnoplochu. V tomto případě jsme schopni pomocí trigonometrie změřit a modelovat zpoždění dopadu vlny na jednotlivé mikrofony [12]. Potom vzdálenost  $k_m$ , což je vzdálenost kterou musí zvuková vlna k mikrofonu  $m$  urazit navíc oproti referenčnímu mikrofonu, je rovna

$$k_m = d_m \cos \theta . \quad (3.3)$$

kde  $\theta$  je ostrý úhel mezi normálou vlnoplochy procházející mikrofonem a rovinou mikrofonního pole a  $d_m$  je vzdálenost mezi referenčním a  $m$ -tým mikrofonem. Tento rozdíl vzdálenosti může být převeden na časový rozdíl

$$\mathcal{F}_m(\tau) = \frac{k_m}{c} , \quad (3.4)$$

pomocí známé rychlosti zvuku ve vzduchu  $c$ , která činí při normálních podmínkách 344 m/s.  $\tau$  lze určit z rovnic 3.3 a 3.4 při hodnotě  $m=1$ . Platí

$$\mathcal{F}_m(\tau) = m\tau . \quad (3.5)$$

Kompenzací zpoždění  $\mathcal{F}_m(\tau)$  jednotlivých mikrofonů a následným sečtením všech vstupů můžeme získat obnovený původní signál. Po provedení časových posunů tedy získáme

$$y_{a,m}(t) = y_m[t + \mathcal{F}_m(\tau)] \quad (3.6)$$

$$= a_m s(t - t_s) + v_{a,m}(t) \quad (3.7)$$

$$= x_{a,m}(t) + v_{a,m}(t) , \quad (3.8)$$

kde

$$v_{a,m}(t) = v_m[t + \mathcal{F}_m(\tau)] , \quad (3.9)$$

a index „a“ značí, že se jedná o sfázovanou verzi signálu.

Dalším krokem je sečtení jednotlivých sfázovaných signálů:

$$p(t) = \sum_{m=1}^M y_{a,m}(t) . \quad (3.10)$$

V případě rovnice 3.10 by při perfektním zaměření beamformeru na směr příchodu signálu od zdroje došlo k zesílení tohoto signálu počtem kanálů  $M$ . Z tohoto důvodu se výstup Delay-And-Sum beamformeru normalizuje počtem použitých kanálů

$$p(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M y_{a,m}(t) . \quad (3.11)$$

Tuto rovnici lze přepsat do tvaru

$$p(t) = a_s s(t - t_s) + \frac{1}{M} v_s(t) , \quad (3.12)$$

kde

$$a_s = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M a_m \quad (3.13)$$

$$v_s(t) = \sum_{m=1}^M v_{a,m}(t) \quad (3.14)$$

$$= \sum_{m=1}^M v_m[t + \mathcal{F}_m(\tau)] . \quad (3.15)$$

a index „s“ značí sumu.

Pokud však signál přichází z jiného směru, zpoždění budou jiná. Jednotlivé signály nasnímané mikrofony tedy nebudou sfázovány a při jejich součtu bude docházet k vzájemnému vyrušení (díky sčítání stejných signálů v protifázi). Tím v podstatě vytváříme prostorový filtr, který může být zaměřen na jakýkoli bod prostoru nebo poloprostoru (to záleží na formě mikrofonního pole – rovinná nebo trojrozměrná) pouze změnou jednotlivých zpoždění mikrofonů [7].

Pro lokalizaci zdroje hluku tedy můžeme postupně natáčet paprsek filtru, procházet tak požadovanou oblast a zaznamenávat energii signálů přijatých z každého

měřeného bodu.

### 3.1.1 Váhování

Z důvodu vylepšení vlastností beamformery, jako je šířka jeho hlavního laloku nebo odstup úrovně hlavního laloku od nežádoucích postranních laloků (neboli Signal To Noise Ratio – SNR), se do vzorce 3.11 mohou přidat váhovací koeficienty  $w_m$ , které udávají jakou měrou se bude na výsledném výstupu beamformery podílet konkrétní kanál:

$$p(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m y_{a,m}(t) . \quad (3.16)$$

Váhování může být provedeno například násobením vyhlazovací okénkovou funkcí (např. Hammingovým oknem). V případě, že váhy nechceme použít, nastaví se hodnoty všech koeficientů  $w_m$  na stejnou, uniformní hodnotu (například na hodnotu 1) a nemusí se tím pádem dále uvažovat. Hlavní rozdíl ve vlastnostech beamformery při použití vhodných váhovacích koeficientů je, že dojde k rozšíření hlavního laloku a zároveň ke snížení úrovně postranních laloků – jinými slovy vzroste dynamický rozsah na úkor prostorového rozlišení [1].

### 3.1.2 Dynamické vlastnosti Delay-And-Sum beamformery

Použití beamformingu je výhodné pouze v případě, že signál  $p(t)$  na výstupu beamformery je dobrou aproximací originálního signálu zdroje  $x_m(t)$  a má větší SNR než je SNR na výstupech jednotlivých mikrofonů.

Lze dokázat [1], že za předpokladu, že šumové signály  $v_m(t)$  na mikrofonech jsou nekorelovány, mají všechny stejný rozptyl a že útlum  $a_m$  všech kanálů je roven 1, můžeme určit

$$\text{SNR}_o = M \cdot \text{SNR}_i \quad (3.17)$$

kde index „i“ značí vstup beamformery a index „o“ jeho výstup. Znamená to tedy, že za dodržení uvedených podmínek můžeme pomocí časového posunutí a součtu jednotlivých výstupů mikrofonů tolikrát zvýšit SNR, kolik použijeme mikrofonů v poli.

V další úvaze předpokládáme, že šumové signály mají stejnou energii a útlum všech kanálů je opět uniformní, roven 1. Pokud šumové signály na mikrofonech budou zcela korelovány, pak

$$\text{SNR}_o = \text{SNR}_i \quad (3.18)$$

V tomto případě s technikou Delay-And-Sum nedosáhneme žádného zisku SNR. S klesající vzájemnou korelací šumových signálů  $v_m(t)$  ale poměr SNR roste.

### 3.1.3 Přijímací charakteristika

Další možností, jak posuzovat jednotlivé beamformery je pomocí přijímací charakteristiky jejich mikrofonního pole (v anglické literatuře se označuje jako beampattern). Ten poskytuje kompletní charakteristiku vstupně-výstupního chování systému. Jak bylo uvedeno výše, beamformer je vlastně  $M$ -bodový prostorový filtr. Jeho přijímací charakteristika je potom definována jako modul směrové odezvy tohoto prostorového filtru [3]. Z rovnic 3.8 a 3.12 můžeme určit  $m$ -tý koeficient prostorového filtru jako

$$c_m = \frac{1}{M} e^{j2\pi f \mathcal{F}_m(\tau)}, \quad (3.19)$$

kde  $f$  značí kmitočet. Směrová odezva takového filtru lze nalézt s pomocí Fourierovy transformace. Protože  $\mathcal{F}_m(\tau)$  je závislé na geometrii pole a zároveň i na pozici zdroje, přijímací charakteristika bude funkcí geometrie pole a pozice zdroje. Navíc bude přijímací charakteristika i funkcí počtu mikrofónů použitých v poli a kmitočtu signálu přicházejícího od zdroje. V případě, že máme opět pole typu ULA z obrázku 3.1, může být směrová charakteristika DAS prostorového filtru získána Fourierovou transformací tohoto filtru jako

$$S(\psi, \alpha) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[ e^{j2\pi f d_m \cos \alpha / c} \right] e^{-j2\pi f d_m \cos \psi / c} \quad (3.20)$$

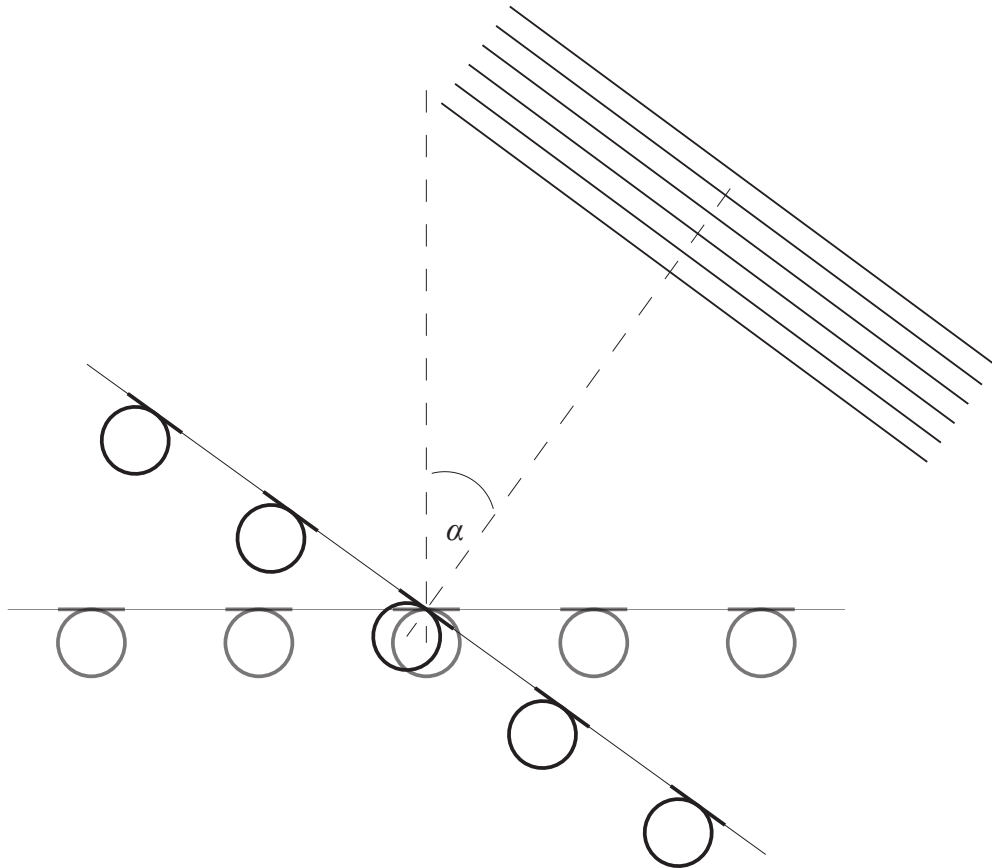
$$= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M e^{-j2\pi f d_m [\cos \psi - \cos \alpha] / c}, \quad (3.21)$$

kde  $\psi$  ( $0 \leq \psi \leq \pi$ ) je horizontální směrový úhel a  $\alpha$  je úhel natočení pole. Přijímací charakteristika  $K(\psi, \alpha)$  je vyjádřena jako

$$K(\psi, \alpha) = |S(\psi, \alpha)| \quad (3.22)$$

$$= \left| \frac{\sin [M2\pi f d (\cos \psi - \cos \alpha) / c]}{M \sin [2\pi f d (\cos \psi - \cos \alpha) / c]} \right|. \quad (3.23)$$

Nutno poznamenat, že v rámci předchozích rovnic leží úhel  $\alpha$  také v intervalu ( $0 \leq \alpha \leq \pi$ ). Úhel natočení mikrofonního pole  $\alpha$  je vidět na obrázku 3.2. Příklad přijímací charakteristiky pro pole s deseti mikrofony ( $M = 10$ ) rozmístěnými 8 cm od sebe, pro úhel natočení  $90^\circ$  a kmitočet 2 kHz je vyobrazen na obrázku 3.3.

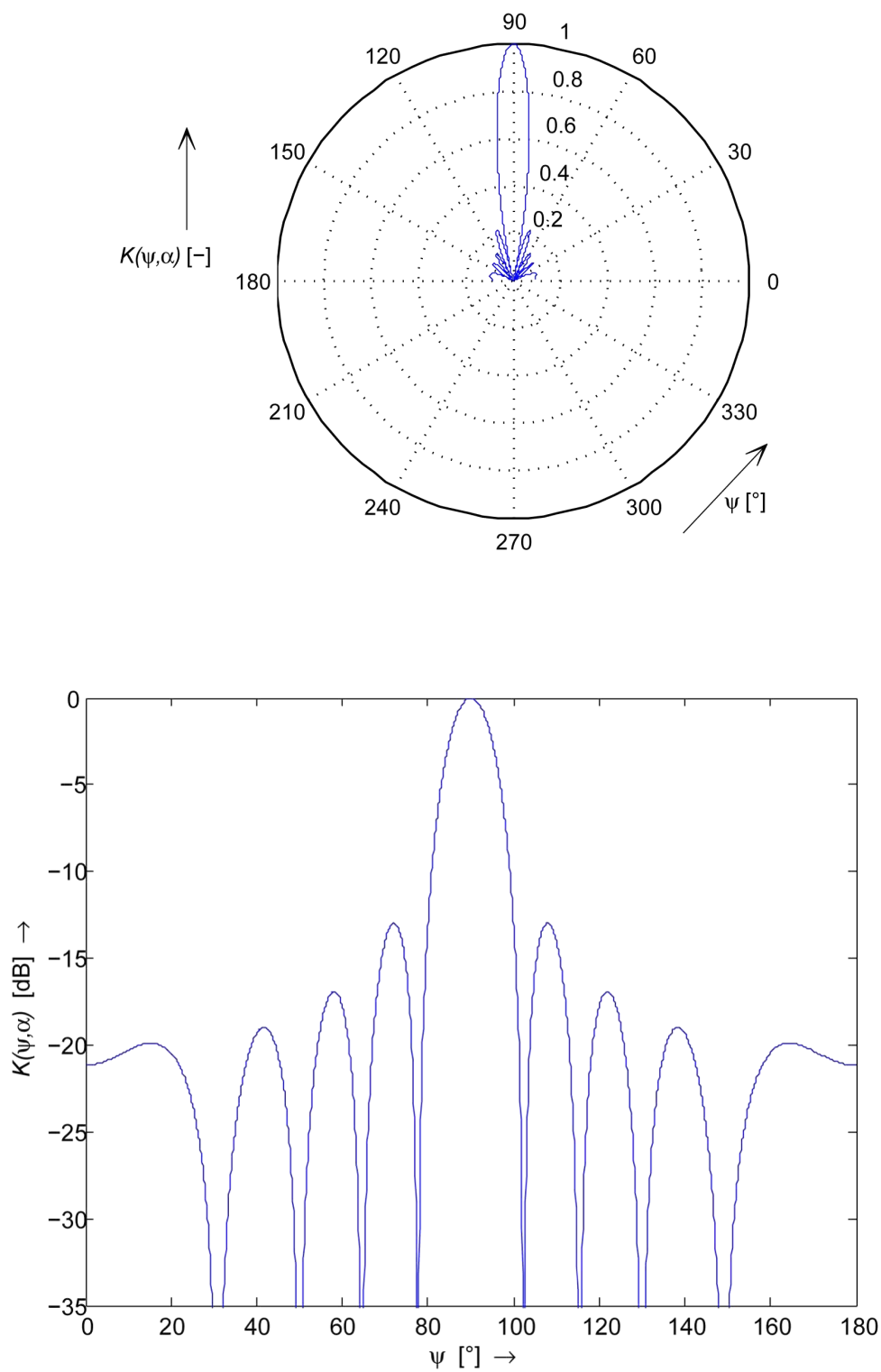


Obr. 3.2: Natočení mikrofonního pole o úhel  $\alpha$  do směru příchodu vln od zdroje.

Každá přijímací charakteristika sestává z určitého počtu laloků, které mají různou úroveň. Obecně platí, že počet laloků v pásmu od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  roste s rostoucím kmitočtem a počtem mikrofonů. Lalok s nejvyšší úrovní se nazývá hlavní lalok (neboli paprsek), ostatní laloky jsou laloky postranní. Jak již bylo zmíněno, důležitým parametrem souvisejícím s hlavním lalokem je jeho šířka (šířka paprsku), která je definována jako oblast mezi krajními body, kde křivka hlavního laloku dosáhne minima [1]. Pro ULA lze šířku hlavního laloku  $R$  vypočítat dle vzorce

$$R = 2\cos^{-1}\left(\frac{c}{Mdf}\right). \quad (3.24)$$

Šířka hlavního laloku klesá s rostoucím počtem mikrofonů v poli, s rostoucí roztečí mezi mikrofony a s rostoucím kmitočtem přijímaného signálu. Počet laloků a šířka hlavního laloku spolu tedy úzce souvisí. Velikost (úroveň) postranních laloků reprezentuje velikost zisku šumu a nežádoucích zdrojů rušivého signálu přítomných ve směrech jiných, než je požadovaný úhel natočení pole. Při návrhu mikrofonních polí a následném zpracování signálu beamformingem se snažíme držet úroveň po-



Obr. 3.3: Přijímací charakteristika mikrofonního pole typu ULA s deseti mikrofony a parametry  $d = 8$  cm,  $\alpha = 90^\circ$  a  $f = 2$  kHz: (nahore) v polárních souřadnicích, (dole) v Kartézských souřadnicích a v dB.

stranních laloků na co nejnižší úrovni aby signály přicházející z ostatních směrů byly maximálně utlumeny. Přijímací charakteristika prostorového filtru ovšem vždy bude mít počet nulových hodnot odpovídající počtu laloků  $-1$ . Pomocí výše zmíněných váhovacích koeficientů je potom možné navrhnout beamformer tak, že nulové hodnoty budou v místech (úhlech), kde se nacházejí například zdroje nejintenzivnějšího rušení, které chceme potlačit. Tyto metody jsou spojeny s technikami adaptivního beamformingu [3].

### 3.1.4 Prostorový aliasing

Z předchozího rozboru problematiky plyne, že pokud chceme vytvořit přijímací charakteristiku s užším paprskem, stačí zvětšit rozteč mezi mikrofony  $d$ , což způsobí zvětšení celkových rozměrů pole. To obecně vede i ke zvýšení poměru SNR. Při návrhu pole bychom tedy očekávali snahu rozmístit mikrofony co nejdále od sebe je možné. Ovšem v případě, že je velikost rozteče  $d$  větší než polovina vlnové délky

$$d > \frac{\lambda}{2}, \quad (3.25)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka signálu, dojde k prostorovému aliasingu. V tomto případě vznikne v přijímací charakteristice více laloků, které dosahují maximální relativní úrovně 0 dB. Tyto laloky, které se objeví v jiném směru, než požadujeme, se označují jako pronikající laloky (grating lobes) [1]; můžeme je vidět na obrázku 3.4. Signály dopadající na pole ze směru odpovídajícího těmto pronikajícím lalokům budou nerozpoznatelné od signálů přicházejících ze směru hlavního laloku. Tato nejednoznačnost se označuje jako prostorový aliasing. Pro vyhnutí se problému prostorového aliasingu je nutné při konstrukci pole dodržet podmínku

$$d \leq \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}. \quad (3.26)$$

Jako analogie s Nyquistovým vzorkovacím teorémem je tato poučka označována jako teorém prostorového vzorkování. Čím více tento teorém porušíme, tím více se objeví v charakteristice pronikajících laloků a tím více nežádoucích fiktivních zdrojů se objeví ve výsledné hlukové mapě. Na obrázku 3.4 můžeme pozorovat dva symetrické pronikající laloky o  $60^\circ$  vzdálené od hlavního laloku (na  $30^\circ$  a  $150^\circ$ ). Čím více budeme kmitočet zvyšovat, tím více se budou pronikající laloky přibližovat k hlavnímu laloku a případně i vznikat další.

Vliv prostorového aliasingu i výše zmiňovanou kmitočtovou závislost šířky hlavního laloku lze do určité míry kompenzovat rozložením zpracování signálu na více samostatných kmitočtových pásem. Pro každé z pásem je navrženo vlastní mikrofonní subpole a po naslímání signálu dochází ke kombinaci výstupů jednotlivých

subpolí [3]. Vhodnou volbou kmitočtových pásem je možné pole navrhnout tak, aby některé mikrofony mohly být využity pro více kmitočtových pásem – výsledkem je geometrie vnořeného pole, diskutovaného v kapitole 1.3.

### 3.1.5 Rozlišení

Rozlišení beamformeru popisuje jeho schopnost rozeznat vlny přicházející ze sobě blízkých směrů [7]. Pokud se zaměříme na vzdálené pole, rozlišení je nejmenší úhlová vzdálenost mezi dvěma rovinnými vlnami, která zajistí, že vlny budou vnímány separátně. A pro zdroje těchto vln v konečné vzdálenosti je rozlišení prakticky jejich minimální vzájemná vzdálenost zaručující že nebudou polem identifikovány jako jeden zdroj.

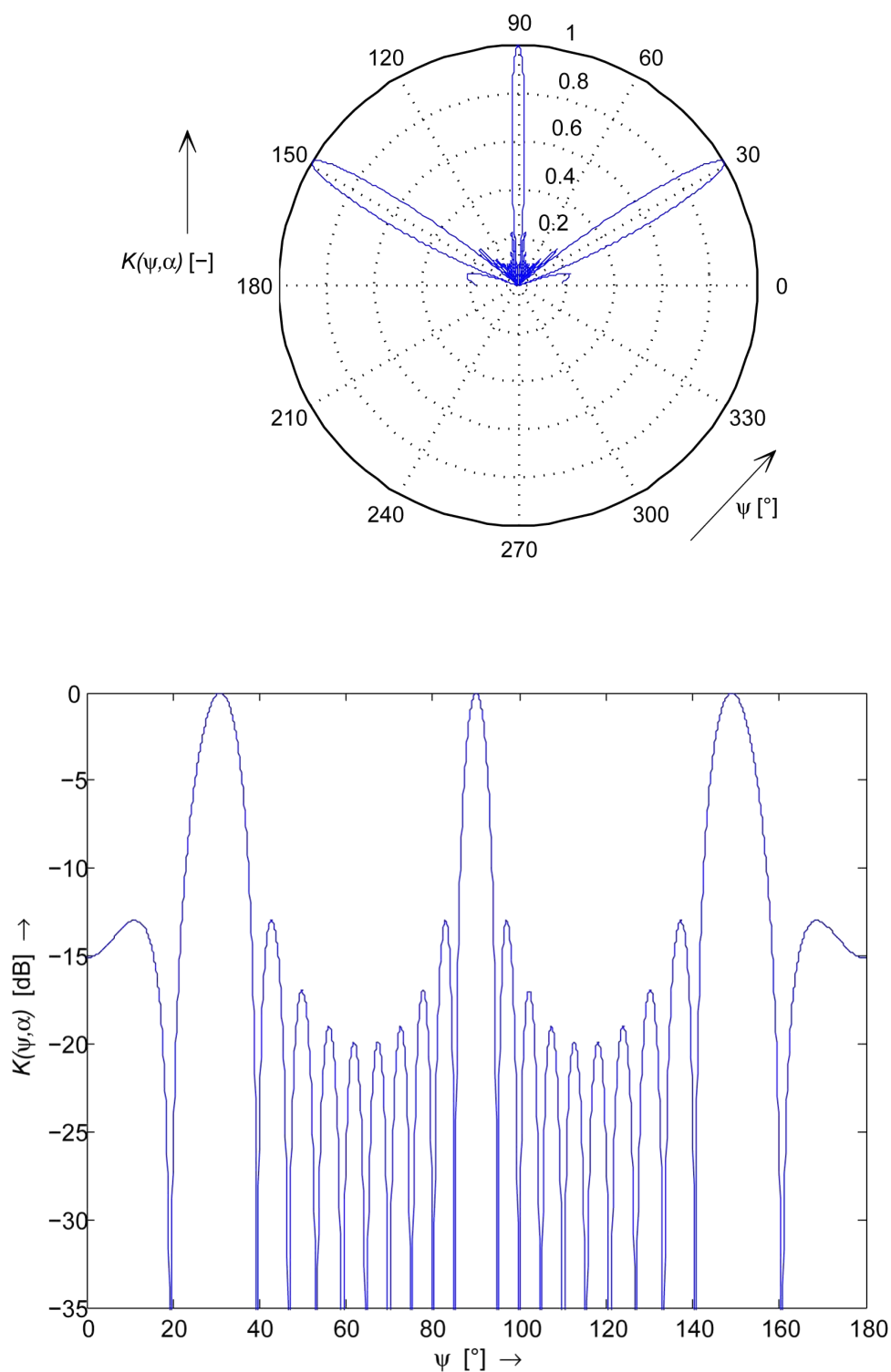
Uvažujme dvě rovinné vlny se směry příchodu  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$ , které dopadají na beamformer s přijímací charakteristikou  $K(\psi, \alpha)$ . Za předpokladu, že obě vlny mají stejnou amplitudu, výstup beamformeru bude dán superpozicí

$$p(t) = K(\psi, \alpha_1) + K(\psi, \alpha_2) . \quad (3.27)$$

Existuje *Rayleighovo kritérium* [7], které říká, že dva směry mohou být odlišeny právě tehdy, když špičková hodnota přijímací charakteristiky  $K(\psi, \alpha_1)$  padne do bodu, kde má charakteristika  $K(\psi, \alpha_2)$  první hodnotu minima.

Rozlišení je přímo úměrné vlnové délce signálu a zlepšuje se s rostoucí velikostí apertury pole (jeho celkové velikosti). Zhoršuje se však s rostoucí vzdáleností mezi polem a zdrojem. Můžeme si povšimnout, že tyto vlastnosti jsou analogické se zákony optiky – schopnost fotoaparátu rozlišovat detaily také záleží na průměru čočky objektivu a na vzdálenosti od fotografovaného objektu.

Pro úhly dopadu větší než  $30^\circ$  (měřeno od kolmé osy pole) se minimální rozlišitelná vzdálenost zdrojů zvýší o více než 50% oproti přímému směru [7]. Z tohoto důvodu se v praxi používá natočení beamformeru maximálně  $\pm 30^\circ$ .



Obr. 3.4: Přijímací charakteristika mikrofonního pole typu ULA s deseti mikrofony při nedodržení teorému prostorového vzorkování (parametry:  $d = 8$  cm,  $\alpha = 90^\circ$  a  $f = 2500$  kHz): (nahore) v polárních souřadnicích, (dole) v Kartézských souřadnicích a v dB.

## 4 MIKROFONNÍ POLE

Při návrhu mikrofonního pole je třeba vzít v úvahu řadu praktických aspektů jako spodní a horní kmitočet zpracovávaného kmitočtového pásma, maximální úroveň postranních laloků přijímací charakteristiky (ta definuje dynamické vlastnosti pole), průměr pole (jeho velikost), vzdálenost pole od měřeného zdroje, prostorové rozlišení a velikost mapovaného prostoru. Všechny tyto veličiny jsou spolu úzce spjaty.

Maximální úroveň postranních laloků (Maximum Sidelobe Level – MSL) definuje dynamický rozsah pole. Čím nižší je MSL, tím více jsou potlačovány signály přicházející z jiných směrů, než je natočení pole. Tím méně také vznikají ve výsledných mapách obrazy fiktivních zdrojů (anglicky „Ghost images“). Hodnotu MSL je tedy třeba brát v úvahu i při interpretaci výsledků.

Dále je dobré navrhovat pole s ohledem na akustické vlastnosti prostředí jako odrazy a rušivé zdroje. Například odrazivá podlaha se dá využít pomocí polokotoučového pole s aplikací zrcadlového („mirror-ground“) algoritmu (viz dále). Odrazy mohou významně narušit měření pokud jejich úroveň je uvnitř dynamického rozsahu pole, tedy pokud jsou utlumeny relativně k přímému signálu méně než na úroveň MSL.

Pro některé typy polí neexistuje striktní horní hranice použitelných kmitočtů, protože úroveň MSL roste postupně s rostoucím kmitočtem (nepravidelná pole). Práhová úroveň MSL v praktických aplikacích bývá  $-10$  dB nebo nižší [7]. Z této hodnoty se následně určí hodnota maximálního kmitočtu. U pravidelných polí díky prostorovému aliasingu striktní hranice existuje. Spodní kmitočet použitelného pásma lze zjistit z požadovaného rozlišení beamformeru. Metody beamformingu spoléhají na fázové rozdíly mezi signály snímanými mikrofonním polem, které používají ke stanovení úhlu dopadu přicházející zvukové vlny. Pro vlnové délky větší než je velikost (apertura) pole jsou fázové rozdíly natolik malé, že beamformer nedokáže efektivně určit úhel dopadu vlny. Jako následek je potom špatná i schopnost rozlišit různé zdroje. Minimální hodnotu kmitočtu lze zjistit z podmínky, že při použití beamformeru s úhlem natočení maximálně  $\pm 30^\circ$  mimo osu (tedy  $60^\circ$  až  $120^\circ$ ) musíme být schopni rozeznat dva vzájemně maximálně vzdálené zdroje, vyzařující harmonický signál o kmitočtu  $f_{\min}$  (hodnota spodního kmitočtu použitelného pásma). Maximální vzdálenost zdrojů je určena přibližně  $1,15z$ , což je průměr roviny prostoru (která je rovnoběžná s polem) ve vzdálenosti  $z$ , do kterého se pole může natáčet s úhly maximálně  $\pm 30^\circ$  mimo osu [7]. Minimální kmitočet pro tyto úhly natočení lze tedy přibližně určit poměrem

$$f_{\min} \approx c/D , \quad (4.1)$$

kde  $c$  je rychlost zvuku a  $D$  je průměr pole [7].

Obecně je doporučeno při návrhu mikrofonního pole pro účely beamformingu dodržovat dvě podmínky:

- rozteč mezi mikrofony nesmí být příliš velká (ve srovnání s vlnovou délkou),
- zároveň nesmí být vzdálenost mezi mikrofony příliš malá.

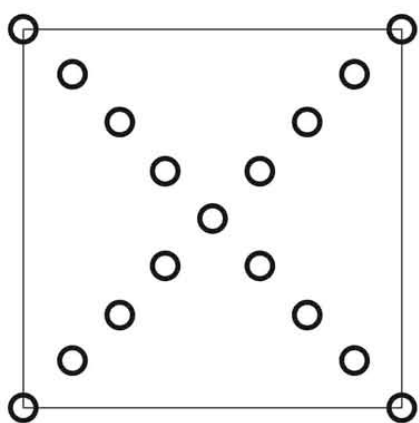
Při porušení první podmínky hrozí vznik prostorového aliasingu, který způsobuje nejednoznačnost v identifikaci požadovaného zdroje signálu. Tento jev byl blíže popsán v kapitole 3.1.4. Ale na druhou stranu, pokud je porušena podmínka číslo dvě, nemůže pole poskytovat dostatečné úhlové rozlišení, které se navíc ještě snižuje s klesajícím kmitočtem přijímaného signálu. Obě podmínky jdou samozřejmě proti sobě, je tedy nutné nalézt vždy kompromis vhodný pro realizaci systému s konkrétními požadavky.

Výkonnost mikrofonního pole je do značné míry určena geometrií pole [7]. Každá geometrie zavádí do přijímací charakteristiky určitý profil bočních laloků a jejich maximální velikost. To definuje jejich schopnost potlačovat vznik obrazů fiktivních zdrojů ve výsledné mapě, která lze následně použít jako měřítko hodnocení konkrétních typů polí. Tato schopnost (přijímací charakteristika) je ale opět závislá na kmitočtu. Je možné na tuto problematiku nahlížet také opačným způsobem – jak navrhnout pole, které bude schopné zpracovat konkrétní rozsah kmitočtů s požadovaným rozlišením, což je ale mnohem komplikovanější. V této kapitole bude uvedeno několik příkladů typů polí, které jsou uvedeny na obrázku 4.1.

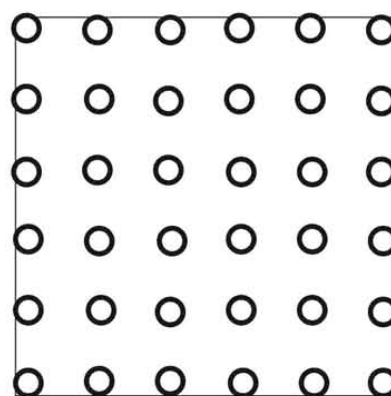
## 4.1 Pravidelná pole

### 4.1.1 Uniformní lineární pole

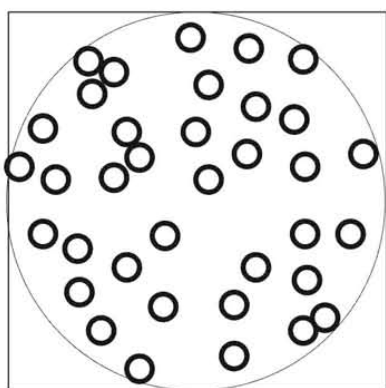
Nejjednodušším příkladem pravidelného pole je uniformní lineární pole, tedy jednodimenzionální pole s ekvidistantním rozmístěním mikrofonů (typ ULA) uvedené v kapitole 3.1. Na příkladu tohoto pole lze demonstrovat důležité vlastnosti všech pravidelných polí (i rovinných – dvoudimenzionálních). Přijímací charakteristika pole typu ULA je popsána v kapitole 3.1.3 a její průběh pro konkrétní parametry pole je vidět na obrázku 3.3. MSL této konfigurace dosahuje cca  $-13$  dB. Další vlastností přijímací charakteristiky (obecně u všech druhů polí) je, že je osově souměrná podle podélné osy mikrofonního pole. Například pro natočení o úhel  $90^\circ$  bude mít tedy přijímací charakteristika druhý hlavní (prosakuující) lalok ve směru  $270^\circ$ . Proto by měly být rušivé zdroje nebo odrazy za rovinou pole eliminovány, protože pole není schopno zdroje v zadním poloprostoru rozeznat od těch v poloprostoru, který je objektem měření.



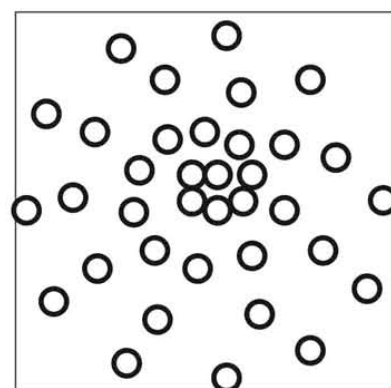
a



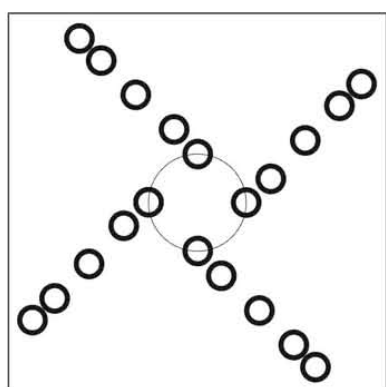
b



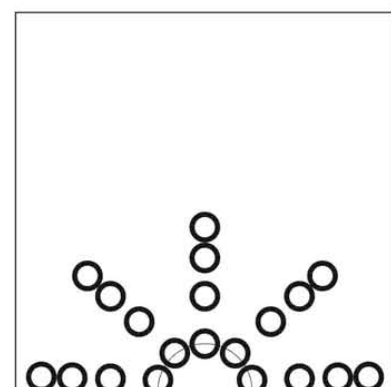
c



d



e



f

Obr. 4.1: Typy mikrofonních polí: a) křížové, b) mřížové, c) náhodné, d) spirálové, e) kotoučové, f) polokotoučové.

### 4.1.2 Mřížové pole

Pro účely identifikace zdroje zvuku v horizontální i vertikální rovině poloprostoru je nutné, aby pole mělo dvoudimenzionální charakter. Přímočarým rozšířením pole ULA můžeme získat dvoudimenzionální rovinné mřížové pole, podobně jako na obrázku 4.1b. Mikrofony jsou uspořádány v matici o rozměrech  $M \times N$ , kde  $M$  je počet řádků a  $N$  počet sloupců. Dále je určena jednotná vzdálenost  $d$  mezi mikrofony v mřížce. Tato vzdálenost je potom rozhodující při určování nejvyššího kmitočtu zdroje, který ještě nezpůsobí vznik prostorového aliasingu podle vztahu 3.26. Maximální úroveň bočních laloků je u mřížového pole obecně na nižší úrovni než pro ULA. Pokud však kmitočet zdroje přesáhne maximální hranici pro aliasing, nastane prudký vzrůst úrovně MSL, což způsobí zejména přítomnost prosakujících laloků a následně vznik fiktivních obrazů zdroje. I přes existenci těchto nežádoucích laloků lze pole pro tyto kmitočty stále využít, pouze je nutné omezit prostor, tedy velikosti úhlů do kterých budeme pole pomocí beamformingu natáčet (např. pouze na  $60^\circ$  až  $120^\circ$  při přijímací charakteristice z obrázku 3.4). Tím zamezíme tomu, že by se zdroj dostal při určitém úhlu natočení pole přímo do směru některého z prosakujících laloků a došlo by ke vzniku obrazů fiktivních zdrojů. Toto je vlastnost, která je typická pro všechny pravidelné konfigurace [7].

### 4.1.3 Křížové pole

Pokud chceme mřížové pole použít pro vyšší kmitočty, než pro které bylo navrženo, jednoduše stačí snížit vzdálenost  $d$ . Pokud však chceme zároveň zachovat velikost pole (apertury), musíme zvýšit počet mikrofonů, což je nákladné. Pole také může ztratit svoji původní akustickou transparentnost. Účinný způsob, jak zvýšit hodnotu mezního kmitočtu pravidelného pole s daným počtem mikrofonů a požadovanou velikostí pole, je sestavení křížového pole (tzv. „X-pole“ na obrázku 4.1a). Jde prakticky o kombinaci dvou uniformních lineárních polí. Pokud označíme  $D$  jako velikost apertury pole a  $M$  jako počet mikrofonů, pak rozteč mikrofonů  $d$  v mřížovém poli je rovna přibližně  $D/(\sqrt{M}-1)$  a přibližně  $2D/(M-1)$  v křížovém poli. Maximální kmitočet je tedy pro křížové pole cca  $(\sqrt{M}+1)/2$  krát vyšší než pro mřížové pole za stejných podmínek. Přijímací charakteristika křížového pole obsahuje vysoké postranní laloky ve směrech podél obou lineárních polí, která ho vytvářejí [7]. V ostatních směrech jsou postranní laloky relativně potlačeny. Pokud mikrofonní pole typu X snímá více zdrojů zároveň, které se nacházejí v pozicích podél některého z ULA, pak může dojít ke konstruktivní interferenci energií postranních laloků ze snímání jednotlivých zdrojů a konečně ke vzniku fiktivních obrazů zdrojů ve výsledné mapě [7].

## 4.2 Nepravidelná pole

Hlavním limitujícím faktorem pravidelných polí je prostorový aliasing. Tento efekt ve výsledných mapách rozložení akustického tlaku produkuje nežádoucí obrazy fiktivních zdrojů o stejné úrovni jako obrazy opravdových zdrojů. Tomu se lze vyhnout pokud geometrie pole bude taková, že rozdílový vektor mezi polohou jakýchkoli dvou mikrofonů bude v rámci pole jedinečný, tedy pro žádnou jinou dvojici mikrofonů v poli se nebude opakovat. Pro tento druh polí, které mají typicky nepravidelnou nebo náhodnou (viz pole na obrázku 4.1c) geometrickou strukturu, maximální úroveň postranních laloků nevykazuje prudký nárůst při překročení určitého maximálního kmitočtu tak, jak tomu bylo u polí pravidelných. Na rozdíl od nich mají obecně přijímací charakteristiky nepravidelných polí MSL postupně se zvyšující s kmitočtem [7].

Lze konstatovat, že nepravidelné konfigurace svými výhodami překonaly pravidelné geometrie. Je ovšem obtížné najít správný postup návrhu takového pole, které za daných podmínek poskytne nejlepší výsledky. Proto se často k návrhu nepravidelného pole pro určité kmitočtové pásmo přistupuje metodou pokusu a omylu, což je velice zdoluhavé a náročné. Jednodušší situace je u parametrických nepravidelných konfigurací jako například spirálové pole (na obrázku 4.1d). Parametry takového pole mohou být totiž testovány systematicky – například hledáním minima MSL v závislosti na parametrech pole (viz kapitola 4.2.1). Funkce tohoto typu však často vykazují vysoce nestálé chování, ani takovýto způsob návrhu tedy není nejjednodušší.

Další komplikací nepravidelných konfigurací je fakt, že jejich geometrie je velice složitá. Vytvořit konstrukci takového pole a následné propojení mikrofonů s předzesilovači pomocí kabelů může být velice obtížné. Následkem toho je také špatná a zdoluhavá operativnost takového typu pole při praktickém měření v terénu, kde se vyžaduje snadná montáž a demontáž celé konstrukce v místě použití. Pokud navíc vyžadujeme dobré úhlové rozlišení při velkých vzdálenostech pole od zdroje hluku, musíme použít pole relativně velkých rozměrů (často o průměru několika metrů), tzn. i relativně velký počet použitých mikrofonů.

### 4.2.1 Optimalizovaná pole

Alternativní přístup k návrhu nepravidelných polí je využití numericky optimalizovaných geometrií. Pole může být optimalizováno pro konkrétní kmitočtové pásmo přizpůsobením souřadnic mikrofonů tak, aby se minimalizovala úroveň MSL v tomto konkrétním pásmu kmitočtů. Souřadnice mikrofonů jsou při procesu optimalizace omezeny podmínkou, že se nesmí mikrofony překrývat a musí ležet uvnitř prostoru

předem definované velikosti. Tímto postupem lze vytvořit například optimalizované náhodné pole, které bude mít určité optimalizované (zdánlivě náhodné) rozmístění mikrofonů v rámci kruhového (případně jiného) prostoru o daném poloměru. Oproti náhodnému poli stejných parametrů dojde ke snížení maximální úrovně postranních laloků o několik dB [7]. Tímto postupem lze sice vytvořit velice kvalitní pole, ale z praktických důvodů (již zmíněné konstrukční složitosti) a díky výpočetně náročné optimalizaci (velký počet stupňů volnosti) se tato pole prakticky nepoužívají. Optimalizaci však lze použít i na jiné druhy nepravidelných polí. Kromě výše zmíněného spirálového pole je to například pole kotoučové (anglicky „wheel array“) na obrázku 4.1e, které je patentováno společností Brüel&Kjær [7]. Výsledkem optimalizace je, že mikrofony jsou uspořádány do  $N$  lineárních nepravidelných skupin – paprsků (podobně jako výplet jízdniho kola). Každý paprsek je natočen o stejný úhel oproti radiálnímu směru pole. Další variantou je polokotoučové pole (anglicky „half-wheel array“) na obrázku 4.1f, které je navrženo pro měření v místech s vysoce odrazivou podlahou. V tomto případě jsou kvůli požadované symetrii (počítá se s odrazy od země) úhly natočení paprsků nulové. Ve srovnání s běžnými pravidelnými poli o stejném rozměru a počtu mikrofonů dosahuje kotoučové pole z hlediska úrovní MSL lepších výsledků [7].

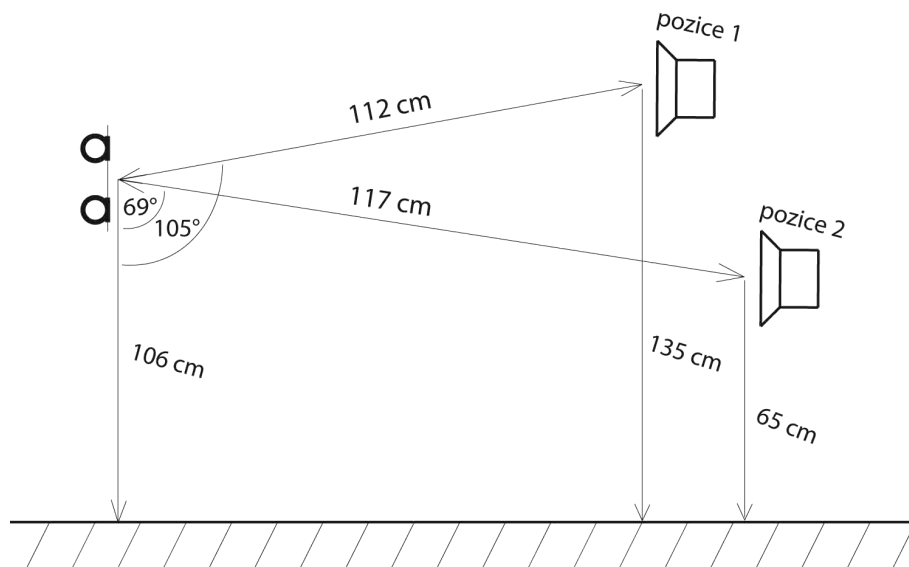
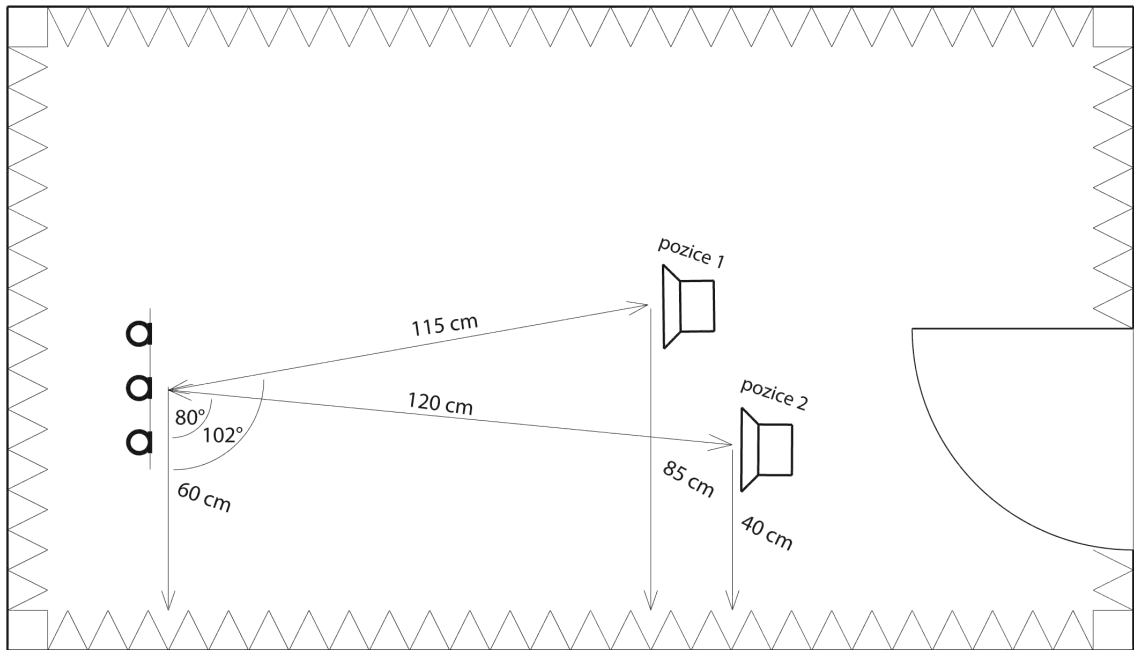
## 5 PRAKTICKÁ REALIZACE

Součástí této kapitoly je popis praktické realizace systému pro identifikaci zdrojů hluku. Tedy popis jednotlivých typů polí, které byly postupně použity a otestovány a také popis nejdůležitějších algoritmů a funkcí, které byly implementovány v programovacím prostředí MATLAB a v jazyce C za účelem zpracování nasnímaných akustických signálů metodou beamformingu. V poslední části budou prezentovány a konzultovány dosažené výsledky identifikace.

### 5.1 Popis prvků systému

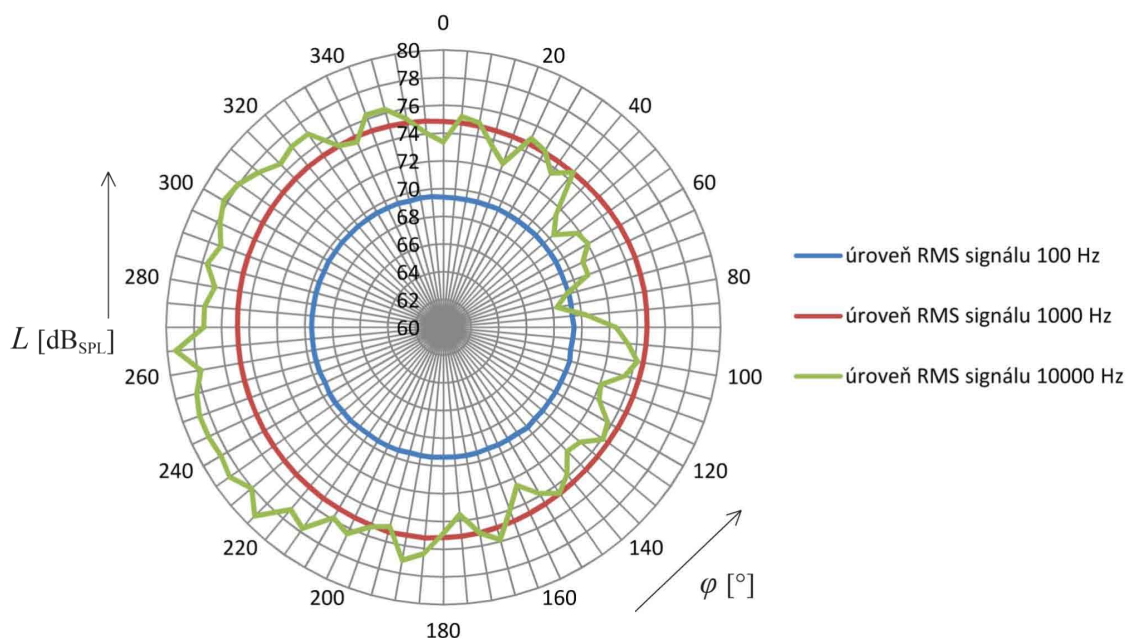
Pro realizaci mikrofonního pole jsme měli k dispozici 8 všesměrových kondenzátorových měřících mikrofonů Behringer typu ECM-8000. Mikrofony byly připojeny na předzesilovače Behringer Ultragain Pro MIC2200. Z předzesilovačů byl signál veden přes A/D převodníky Echo Layla do PC, kde došlo k jejich záznamu pomocí vícecestného zvukového editačního softwaru Steinberg Cubase v4. Jako zdroj hluku byl použit elektrický holicí strojek, vrtačka a aktivní stolní reproduktorová soustava o rozměrech přibližně  $20 \times 30$  cm, která přehrávala testovací zvukové signály vygenerované opět v prostředí Cubase a vedené přes výše zmíněný D/A převodník. Všechna související měření byla z důvodu eliminace nežádoucích rušivých elementů (jako např. odrazy od stěn) provedena v bezdozvukové komoře. U jedné stěny komory bylo vždy umístěno mikrofonní pole a v prostoru před ním byly stanoveny dvě polohy, do kterých se umisťovali při testování jednotlivé zdroje hluku. Nutno podotknout, že prostor komory se nedá považovat za zcela bezodrazový. Stěny a strop jsou sice pokryty akusticky silně pohltivou úpravou, na zemi však tato úprava chybí (zde je pouze koberec). V průběhu měření se také v komoře nacházelo několik dalších odrazivých objektů, například předzesilovače nebo objekty na kterých byly při měření umístěny zdroje hluku. Mezi jednotlivými měřeními se však podmínky v komoře téměř neměnily. Horizontální prostorové rozložení mikrofonního systému a měřených zdrojů je zobrazeno na obrázku 5.1 nahoře v podobě půdorysu, vertikální prostorové rozložení je pak na obrázku 5.1 dole v podobě bokorysu. Všechny měřené vzdálenosti byly měřeny svinovacím metrem, lze tedy očekávat jistou nepřesnost měření. Z těchto vzdáleností byly následně pomocí goniometrických funkcí vypočítány horizontální a vertikální úhly, které slouží ke kontrole správné funkce systému pro identifikaci. Vzhledem k uvedeným nepřesnostem je ale kontrola prakticky pouze orientační.

Prvním krokem před samotným měřením byla kalibrace použitých mikrofonů, abychom byli schopni dosáhnout co nejpřesnějších výsledků. Nejprve jsme provedli měření směrových charakteristik na kmitočtech 100, 1000 a 10000 Hz jako závislost



Obr. 5.1: Vzájemné umístění mikrofonního pole a zdroje hluku v bezdozvukové komoře: (nahore) půdorys, (dole) bokorys. Pozn. 1: Vertikální úhly zdrojů vůči poli mají na výstupu beamformeru jiný počátek osy – vertikálnímu úhlu  $\beta$  v obrázku tedy odpovídá ve výsledné mapě úhel  $180^\circ - \beta$ . Pozn. 2: Měřítko neodpovídá skutečným poměrům velikostí.

mikrofonem naměřené úrovně efektivní hodnoty akustického tlaku na směr příchodu signálu od zdroje o konstantní úrovni akustického tlaku ve vzdálenosti 1 m. Z časových důvodů byly směrové charakteristiky změřeny pouze u poloviny z celkového počtu mikrofonů používaných pro následné experimenty. Ale vzhledem k tomu, že u zmíněných čtyř mikrofonů měli tyto charakteristiky velice podobný charakter, předpokládali jsme, že i ostatní se zásadně lišit nebudou – což se vzhledem k uspokojujícím celkovým výsledkům měření potvrdilo. Příklad směrové charakteristiky jednoho z mikrofonů je na obrázku 5.2. Po kontrole všesměrovosti mikrofonů jsme přikročili k nastavení jednotlivých předzesilovačů. Jejich vstupní a výstupní úrovně jsme nastavili takovým způsobem, abychom na vstupech jednotlivých kanálů v Cubase získali shodnou referenční úroveň 0 dB.



Obr. 5.2: Směrová charakteristika prvního mikrofonu pole pro kmitočty 100, 1000 a 10000 Hz – závislost RMS úrovně harmonického signálu v  $\text{dB}_{\text{SPL}}$  na směru příchodu signálu.

Jako zdroj signálu pro reproduktorovou soustavu, představující jeden z měřených zdrojů hluku, byly použity harmonické signály o různých kmitočtech. Hodnoty kmitočtů byly voleny vzhledem ke geometrickým vlastnostem použitých polí, většinou ale šlo o jeden kmitočet ze spodního okraje použitelného pásma kmitočtů pro konkrétní pole, jeden kmitočet ze středu a jeden z horního okraje tohoto pásma, případně i vyšší. Harmonické signály byly zvoleny z důvodu co nejlepší demonstrace schopností metody beamformingu DAS, která u úzkopásmových signálů vykazuje nejlepší výsledky [1]. Dalším testovacím signálem byl úsek řečového signálu. Kmitočet signálu

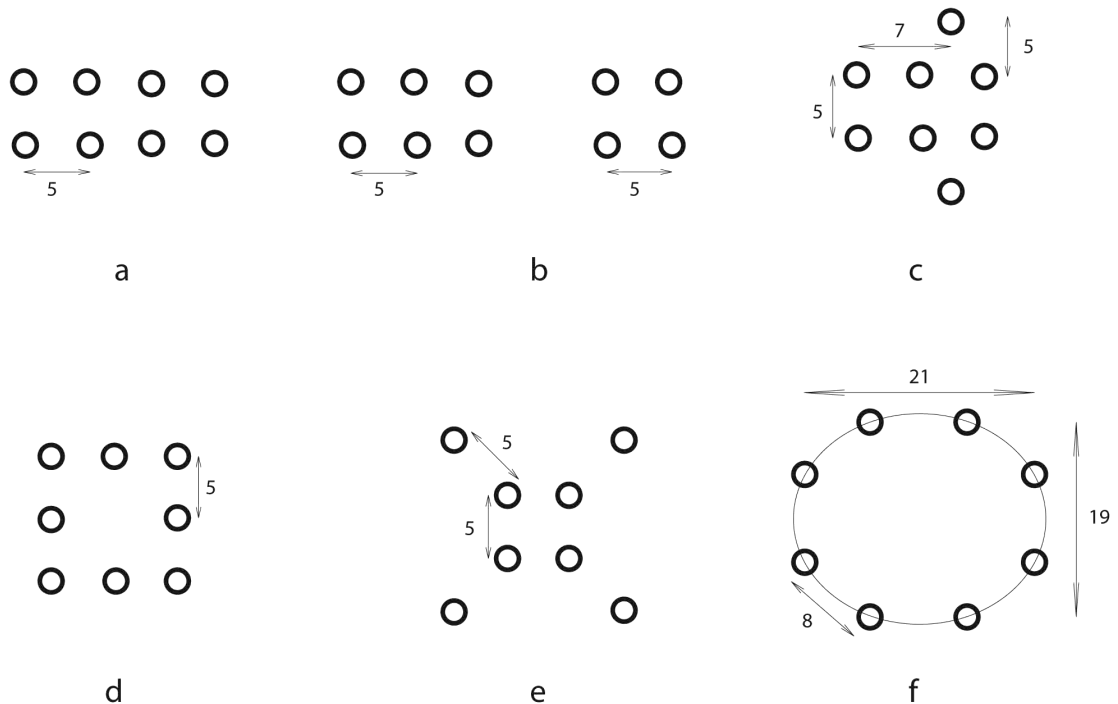
zdroje musí vyhovovat určitým omezením:

- musí být dostatečně vysoký, aby se dalo uvažovat o zdroji ve vzdáleném poli,
- musí být dostatečně nízký, aby nedocházelo k prostorovému aliasingu.

Vzhledem k velikosti zdroje a jeho vzdálenosti od pole cca 120 cm lze první podmínku považovat za splněnou a dopadající zvukové vlny lze považovat za rovinné (alespoň pro převážnou část použitelných kmitočtů pole). Druhá podmínka pak závisí přímo na konstrukci pole a bude diskutována u jednotlivých typů použitých polí v další kapitole.

## 5.2 Konstrukce mikrofonních polí

Při realizaci systému bylo postupně zkonstruováno několik druhů mikrofonních polí. K dispozici jsme měli ovšem pouze 8 mikrofonů, nebylo tedy možné otestovat složitější konstrukce, uvedené v kapitole 4. I přesto jsme se pokusili sestrojít některé typy polí, na kterých by bylo možné simulovat obecné vlastnosti konkrétních konfigurací. Všechna mikrofonní pole, která jsme postupně použili jako součást systému pro identifikaci zdrojů hluku, jsou zobrazena v obrázku 5.3.



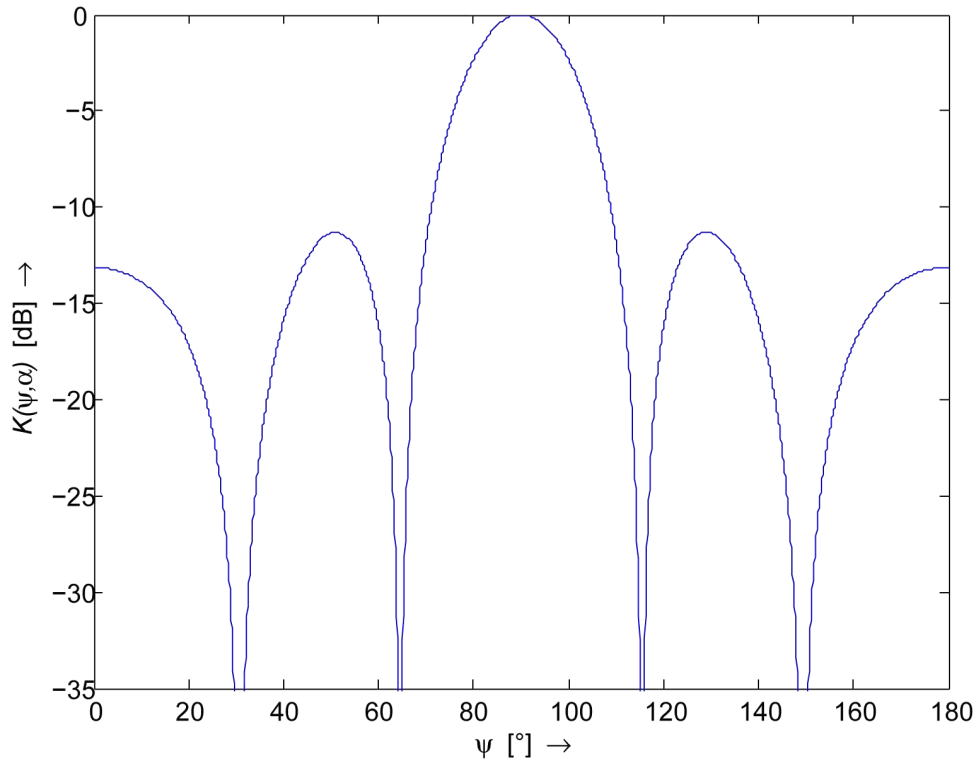
Obr. 5.3: Sestrojená mikrofonní pole: a) mřížové pole s maximální horizontální konfigurací, b) mřížová pole s nižší horizontální konfigurací, c) částečné mřížové pole se zvýšenou vertikální konfigurací, d) čtvercové pole, e) částečné křížové pole, f) elipsovité pole. Pozn.: Všechny uvedené rozměry jsou v centimetrech.

Pole byla sestrojena pouze za pomoci mikrofonních stojanů, manipulace s nimi byla tedy velice náročná a zdlouhavá. Důsledkem toho je, že se jen těžko podařilo přesně dodržet všechny geometrické poměry polí. I zde tedy musíme počítat se zanesením určitých nepřesností do výsledné mapy rozložení akustického tlaku. Pro praktické použití je třeba vyrobit univerzální konstrukci, ke které se mikrofony upevňují a která je dostatečně flexibilně upravitelná tak, že s její pomocí lze zkonstruovat nejrůznější typy polí [10].

Prostorové konfigurace a a b z obrázku 5.3 jsou mřížová pole, která se liší pouze počtem mikrofonů v horizontálním směru. Jejich základem jsou vždy dvě uniformní lineární pole se vzdáleností mikrofonů  $d = 5$  cm. Pro takové pole typu ULA se čtyřmi mikrofony, které tvoří základ pole z obrázku 5.3a, je přijímací charakteristika při kmitočtu zdroje 2 kHz zobrazena na obrázku 5.4. Z přijímací charakteristiky můžeme vyčíst úroveň MSL, která je jen o málo nižší než v praxi používaná hraniční hodnota  $-10$  dB. Dále si můžeme všimnout poměrně značné šířky hlavního laloku. Ta značí, že ani rozlišení výsledného beamformeru nebude příliš jemné. Tato charakteristika však ukazuje pouze vlastnosti pole v horizontálním směru. Protože ve vertikálním směru byly použity pouze dva mikrofony, bude zde situace (přijímací charakteristika) ještě o něco horší. Ve výsledcích tedy očekáváme přesnější identifikaci v horizontálním než ve vertikálním směru. Díky rozteči mikrofonů  $d = 5$  cm nastává prostorový aliasing podle vztahu 3.26 od kmitočtu 3440 Hz. Pole na obrázku 5.3b byla vytvořena z prvního pole pouhým ubráním nejprve jedné vertikální dvojice mikrofonů (obrázek 5.3b vlevo) a poté dvou vertikálních dvojic mikrofonů (obrázek 5.3b vpravo). U těchto polí tedy očekáváme postupný pokles rozlišení v horizontálním směru. V druhém případě (pole  $2 \times 2$  mikrofony) se pak jedná vlastně o minimální použitelnou konfiguraci pro dvoudimenzionální identifikaci zdroje.

Další konfigurací (obrázek 5.3c) je částečné mřížové pole. U tohoto pole jsme měli snahu docílit zvýšení rozlišení ve vertikálním směru na úkor horizontálního, proto byly dva mikrofony z prvního pole přesunuty do nových pozic. Původní záměr byl umístit tyto dva mikrofony do vertikální osy pole, aby pole bylo symetrické. Z konstrukčních důvodů však toto nešlo provést, proto jsme mikrofony museli umístit horizontálně asymetricky, mimo osu. Tím se do pole zavedla určitá nepravidelnost. Rozteč 5 cm (tím pádem i horní použitelný kmitočet zdroje) však zůstala přibližně zachována.

Pole z obrázku 5.3d je prakticky také mřížové, pouze s chybějícím centrálním mikrofonem. Bylo sestrojeno za účelem zvětšení apertury (rozměrů) pole, abychom dosáhli lepšího prostorového rozlišení v obou směrech. Konfigurace podobného typu (i když větších rozměrů a s větším počtem mikrofonů) byla použita v tzv. „Akustické kameře“, uvedené na veletrhu v Hannoveru v roce 1999 (viz kapitola 1.5). Rozteč mikrofonů zůstala v jednotlivých řadách 5 cm, otázkou však je, co způsobí nepravidelné



Obr. 5.4: Přijímací charakteristika mikrofonního pole typu ULA se čtyřmi mikrofony a parametry  $d = 5$  cm,  $\alpha = 90^\circ$  a  $f = 2$  kHz v Kartézských souřadnicích a v dB.

vzájemné vzdálenosti mikrofonů mezi řadami – tedy absence centrálního mikrofonu, který by v poli zařídil standardní mřížovou geometrii.

Předposledním sestrojeným polem je křížové pole (obrázek 5.3e), které však také není kompletní, postrádá opět mikrofon na centrální pozici. Také se nedá tvrdit, že je sestrojeno ze dvou polí typu ULA, protože vzdálenost mezi dvěma vnitřními mikrofony v obou lineárních polích není daných 5 cm, ale rovná se délce úhlopříčky ve čtverci o straně 5 cm, což je přibližně 7 cm. Jedná se tedy o pole, které znovu není čistě pravidelné.

Poslední testované pole pro účely identifikace zdroje hluku bylo pole elipsovité, což je vlastně určitým způsobem zdeformované pole kruhové. Jeho rozměry a způsob rozestavení mikrofonů jsou uvedeny na obrázku 5.3f. Celková velikost apertury je zde větší než u předchozích variant, zároveň rozestupy mikrofonů na elipse jsou větší (8 cm) než rozteč mikrofonů většiny předchozích polí. Tuto konfiguraci lze považovat za nepravidelnou, nemusel by tedy hrozit skokový nárůst MSL při překročení aliasin-gového kmitočtu. Vzhledem k nízkému počtu mikrofonů však stejně hodnota MSL pravděpodobně nebude příliš nízká. Střed tohoto pole byl z konstrukčních důvodů umístěn v jiném bodě prostoru komory (konkrétně o cca 10 cm dál od boční stěny a o 20 cm výše nad zemí). Proto ve výsledných mapách můžeme očekávat mírnou

změnu úhlů pozic identifikovaných zdrojů.

V průběhu měření a testování různých druhů polí byla postupně získána databáze nahrávek akustických signálů nasnímaných uvedenými mikrofonními poli. Pro každé pole byla jako zdroj použita uvedená reproduktorová soustava, přehrávající harmonické signály o několika různých kmitočtech a úsek řečového signálu, dále dva reálné zdroje hluku v podobě elektrického holícího strojku a ruční elektrické vrtačky. Každý zdroj byl navíc testován v minimálně dvou pozicích uvedených na obrázku 5.1. Nahrávky ve formátu `*.wav`, pořízené jednotlivými mikrofony (při vzorkovacím kmitočtu 48 kHz a s 16-ti bity na vzorek), byly náležitě pojmenovány a uloženy do příslušných adresářů. Celá tato databáze spolu s fotografiemi sestavených polí je k dispozici na přiloženém CD.

V poslední fázi pak došlo k samotnému softwarovému zpracování nasnímaných signálů metodou beamformingu Delay-And-Sum. K tomuto účelu bylo v prostředí MATLAB vytvořeno několik skriptů a funkcí. Kromě toho byla metoda DAS implementována i v jazyce C do poskytnuté jednoduché aplikace `simpleAsioHost.exe`, která je určená k načítání dat z multikanálové zvukové karty pomocí. Postup zpracování společně s popisem nejdůležitějších úseků zdrojových kódů je obsahem následující kapitoly.

### 5.3 Softwarové zpracování signálů

Dvě různé implementace DAS beamformeru v prostředí MATLAB a v jazyce C se liší hlavně tím, že zpracování funkcemi MATLABu probíhá formou postprocesingu. Nasnímané signály se tedy musí uložit na pevný disk pomocí nějaké hostitelské aplikace, nejčastěji vícestopého zvukového editoru. V našem případě pro tento účel sloužil zmíněný editor Cubase. Z pevného disku jsou potom signály ve formátu `*.wav` znovu načteny pomocí vytvořených funkcí a jsou nad nimi prováděny operace potřebné k vykreslení výsledné mapy rozložení akustického tlaku. V případě aplikace v jazyce C nedochází k záznamu signálů (není tedy třeba hostitelská aplikace). Zvuková data jsou pouze průběžně ukládána do vyrovnávací paměti, ze které se v případě zájmu (po stisku příslušné položky v menu) vypočítá a zobrazí výsledná mapa. Kromě tohoto rozdílu a okolností s tím spojených se už tyto dvě různé implementace v zásadě neliší (samozřejmě kromě různé syntaxe příslušných jazyků).

Než začneme zpracovávat samotná zvuková data, musíme nejprve zadat parametry mikrofonního pole, které bylo použito k nasnímaní zpracovávaných signálů. Tím se pro mřížová pole rozumí rozteč mikrofونů  $d$  a horizontální a vertikální vzdálenosti pozic mikrofونů v mřížce vzhledem k referenčnímu bodu. Pro jiná pole je nutno zadat přímo horizontální a vertikální vzdálenosti od referenčního bodu pro jednotlivé

mikrofony. Jako referenční pozice byl vždy zvolen levý horní roh pomyslné obdélníkové (nebo čtvercové) apertury pole z čelního pohledu (čtvercové apertury polí jsou např. ve formě ohraničení vidět na obrázku 4.1). Tedy například pro mřížové pole je to pozice levého horního mikrofonu. Tyto parametry mají formu vektorů a v případě MATLABu se zadávají do skriptu `beamformer_2D.m`, který obsahuje (nebo volá) všechny funkce potřebné k vykreslení výsledku. V rámci aplikace `simpleAsioHost` jsou parametry pole definovány v hlavičkovém souboru `funkce.h` ve formě symbolických konstant. Jako výchozí nastavení jsou zde předdefinovány parametry pole z obrázku 5.3a, drobnou změnou parametrů lze tedy získat beamformer schopný zpracovat signály z jakéhokoliv mřížového pole. Pro zpracování v MATLABu byly vytvořeny samostatné skripty, určené pro jednotlivá pole z obrázku 5.3, pojmenované `beamformer_poleA-F.m`. Ty jsou také obsaženy v odpovídajících adresářích databáze na přiloženém CD.

### 5.3.1 Popis algoritmu DAS beamformeru

Vývojový diagram DAS beamformeru je zobrazen na obrázku 5.5. Na začátku programu (po inicializaci parametrů pole) je prvním krokem načtení navzorkovaných signálů z jednotlivých mikrofonů (ať už z disku nebo z vyrovnávací paměti) do matice o rozměrech počet\_vzorků  $\times N$ , kde  $N$  je počet kanálů. V jazyce C je místo matice vytvořeno dvourozměrné pole ukazatelů o stejných rozměrech a hodnotách. Do dalšího vektoru jsou načteny hodnoty úhlů, o které budeme pole pomocí beamformingu natačat. V našem případě se jedná o 179 hodnot mezi úhly  $0^\circ$  a  $180^\circ$  ve kterých budeme následně zkoumat relativní úroveň akustické energie.

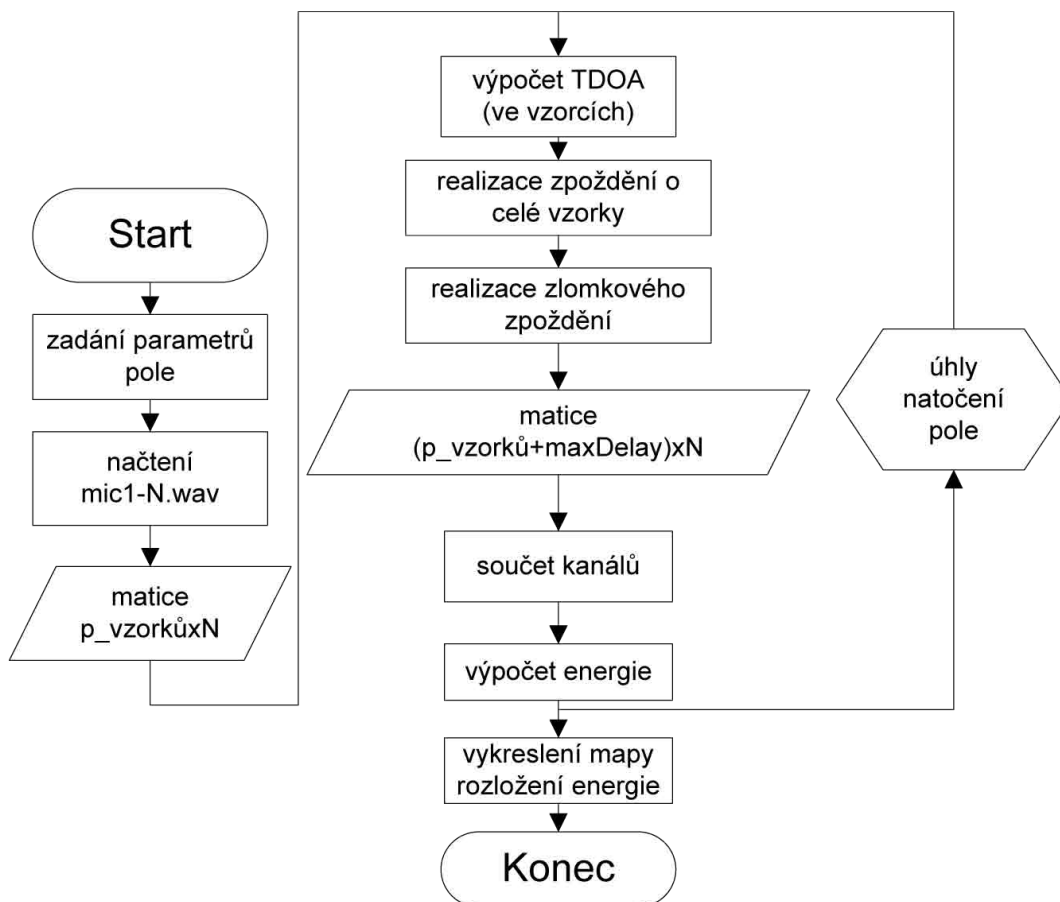
Následuje hlavní cyklus výpočtu, který probíhá přes všechny výše zmíněné body (úhly) natočení pole a to v horizontálním i vertikálním směru. Jeho zdrojový kód v jazyce C je uveden v následujícím výpisu.

Funkce pro natačení paprsku přijímací charakteristiky

```

1 //funkce pro nataceni paprsku beamformeru
2 void turningBeam(double **P, double **P_aligned, double **E,
3                 float **Q, double w[], double uhel[]){
4
5     double delay_h[SLOUPCU], delay_v[RADKU];
6     int round_delay_h[SLOUPCU], round_delay_v[RADKU];
7
8     for(int i = 0; i < BODU; i++){
9
10        for(int a = 0; a < RADKU; a++){
11            delay_v[a] = findDelay(p_rm_vert[a], 180.0 - uhel[i]);
12            round_delay_v[a] = round(delay_v[a]); //zaokrouhlene zpozdeni (vzorku)
13        }
14
15        for(int j = 0; j < BODU; j++){
16
17            for(int a = 0; a < SLOUPCU; a++){
18                delay_h[a] = findDelay(p_rm_hor[a], uhel[j]);
19                round_delay_h[a] = round(delay_h[a]); //zaokrouhlene zpozdeni (vzorku)

```



Obr. 5.5: Vývojový diagram DAS beamformeru.

```

20     }
21
22     nullMat(P_aligned, vzorku_aligned, KANALU); //nulovani matice P_aligned
23
24     delaySignal(P, P_aligned, Q, delay_h, round_delay_h, delay_v,
25                round_delay_v, uhel[j], (180.0 - uhel[i]));
26
27     E[i][j] = getEnergy(P_aligned, w); //výpočet energie v každém bodě mapy
28   }
29 }
30 }
  
```

Jako vstupní parametry (řádky kódu 1, 2) jsou funkci předávány, kromě matice vstupních signálů (P), ještě matice, do které budou zapsány jednotlivé zpožděné signály (P\_aligned), matice E pro uložení hodnot energií vypočtených ve všech bodech zkoumaného prostoru, matice Q potřebná pro realizaci zlomkového zpoždění (viz dále) a vektor vah a úhlů natočení. V těle cyklu dochází nejprve k výpočtu vzdáleností  $k_m$  podle vztahu 3.3. Dále je tato vzdálenost pomocí vztahu 3.4 pře-

vedena na časové zpoždění TDOA, tedy hodnoty  $\mathcal{F}_m(\tau)$  a následně pomocí použitého vzorkovacího kmitočtu na zpoždění vyjádřené v počtu vzorků (reálné číslo). Všechny tyto úkony zajišťuje funkce `findDelay` na řádcích 11 a 18 (pro horizontální i vertikální směr). Na konci cyklu (na řádce 27) je plněna matice energií  $\mathbf{E}$  pomocí funkce `getEnergy`. Tato funkce provádí vážený součet podle vztahu 3.16. Váhovací koeficienty byly pro naše účely nastaveny na hodnotu 1. Tím získáme výstupní signál beamformeru s mikrofonním polem natočeným do určeného směru. Následně dojde k výpočtu střední hodnoty výkonu  $P$  (energie) tohoto signálu na výstupu, který realizujeme vztahem

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2[n], \quad (5.1)$$

kde  $N$  je počet vzorků a  $x[n]$  jsou jednotlivé vzorky výstupního signálu beamformeru. Hodnoty jsou následně normovány do intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . K samotné identifikaci zdroje hluku (respektive směru, ve kterém se zdroj vzhledem k mikrofonnímu poli nachází) dojde pomocí sledování akustické 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. Přitom signály přicházející z ostatních směrů se ve fázi sčítat nebudou. Pokud bude jejich vzájemný rozdíl fází natolik velký, že se projeví destruktivní interference, dojde dokonce k jejich potlačení vůči signálům ve směru natočení.

Následující cyklus je stěžejní část celého kódu. Jde o vnucování příslušného zpoždění a předstihu do jednotlivých sloupců matice, představujících signály v kanálech 1 až  $N$ . Tímto způsobem vlastně dochází k pomyslnému natáčení mikrofonního pole od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ . Zpoždňování je zajištěno funkcí volanou na 24. řádce předešlého výpisu. V následujícím výpisu zdrojového kódu je tato funkce uvedena.

#### Funkce pro vnucování zpoždění do signálů

```

1 //funkce pro realizaci zpozdzeni jednotlivych signalu
2 void delaySignal(double **P,double **P_aligned,float **Q,double delay_h[],
3                 int round_delay_h[],double delay_v[],int round_delay_v[],
4                 double uhel_h,double uhel_v){
5
6     int index, conv_index, kanal;
7     const int M = N + 1;
8     double delta, h[M], *y;
9
10    y = (double *) malloc((VZORKU + M - 1) * sizeof(double));
11    conv_index = (M - 1) / 2;
12    kanal = 0;
13
14    for(int m = 0; m < RADKU; m++){
15        for(int n = 0; n < SLOUPCU; n++){
16
17            /*****Realizace celociselneho zpozdzeni*****/
18            if(uhel_h <= 90 && uhel_v <= 90){
19                index = round_delay_h[n] + round_delay_v[m];

```

```

20         for(int i = 0; i < VZORKU; i++)
21             P_aligned[i + index][kanal] = P[i][kanal];
22     }
23     else if(uhel_h <= 90 && uhel_v > 90){
24         index = round_delay_h[n] + round_delay_v[m] + max_round_delay_v;
25         for(int i = 0; i < VZORKU; i++)
26             P_aligned[i + index][kanal] = P[i][kanal];
27     }
28     else if(uhel_h > 90 && uhel_v <= 90){
29         index = round_delay_h[n] + max_round_delay_h + round_delay_v[m];
30         for(int i = 0; i < VZORKU; i++)
31             P_aligned[i + index][kanal] = P[i][kanal];
32     }
33     else if(uhel_h > 90 && uhel_v > 90){
34         index = round_delay_h[n] + max_round_delay_h
35             + round_delay_v[m] + max_round_delay_v;
36         for(int i = 0; i < VZORKU; i++)
37             P_aligned[i + index][kanal] = P[i][kanal];
38     }
39
40     /*****Realizace zlomkového zpoždění*****/
41     delta = delay_h[n] + delay_v[m] - (round_delay_h[n] + round_delay_v[m]);
42
43     for(int a = 0; a < M; a++){
44         h[a] = 0;
45     }
46     for(int k = 0; k < M; k++){
47         for(int l = 0; l < M; l++){
48             h[l] += (double)Q[k][l] * pow(delta, k);
49         }
50     }
51
52     //konvoluce jednotlivých signálů s příslušnými filtry
53     for(int a = 0; a < (VZORKU + M - 1); a++){
54         y[a] = 0;
55     }
56     for(int k = 0; k < VZORKU; k++){
57         for(int l = 0; l < M; l++){
58             if((k - l) < 0){
59                 y[k] += h[l] * 0;
60             }
61             else{
62                 y[k] += h[l] * P_aligned[k - l][kanal];
63             }
64         }
65     }
66     for(int a = 0; a < VZORKU; a++){
67         P_aligned[a][kanal] = y[conv_index + a];
68     }
69
70     kanal++;
71 }
72 }
73 free(y);
74 }

```

V cyklu přes všechny kanály (tedy řádky a sloupce v mřížovém poli) probíhá postupně zpoždění o odpovídající celočíselnou hodnotu vzorků a poté i o zlomkovou část vypočteného zpoždění. Při zpoždění o celé vzorky je třeba pomocí podmínky (podle velikosti úhlu) rozhodnout, zda se má signál zpoždit nebo naopak urychlit vůči referenčnímu bodu pole. V obou případech se cíle dosáhne přidáním patřičného počtu nulových vzorků na začátek příslušného sloupce matice. Tím dojde k vzájemnému časovému posunutí signálů. Cílová matice `P_aligned` je zpočátku naplněna nulami, stačí tedy jen určit index pozice, od které se mají do jednotlivých

sloupců kopírovat data z původní matice. Tyto úkony jsou provedeny na řádcích 17 až 39.

Aby nedocházelo k chybám v důsledku zaokrouhlení na celé vzorky, 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 celočíselnými násobky vzorkovací periody. Řešením může být buď rekonstrukce a převzorkování signálu, nebo častěji využití metod interpolace. Ideální impulzní odezva takového zpožďovacího prvku je posunutá a navzorkovaná funkce sinc, která má nekonečnou délku. Další její vlastností je, že je nekauzální – z těchto důvodů jsou ideální systémy pro vytvoření zlomkového zpoždění signálu nerealizovatelné. K získání kauzálního systému pro zlomkové zpoždění tedy musejí být využity aproximační techniky, např. v podobě určitého číslicového filtru. Pro naše účely byla zvolena Lagrangeova interpolace realizovaná Farrowovou strukturou [11]. Jedná se prakticky o číslicový filtr typu FIR. Jde o aproximaci časově spojitě funkce  $x_c(t)$  polynomem závislým na parametru zpoždění  $D$ . V kódu je tato zlomková hodnota zpoždění  $D$  vypočtena na řádku 41. Výpočet vektoru koeficientů  $\mathbf{c}$  probíhá násobením inverzní transponované Vandermondovy matice  $\mathbf{U}^{-1}$  s vektorem zpoždění  $\mathbf{z}$ :

$$\mathbf{c} = \mathbf{U}^{-1}\mathbf{z}, \quad (5.2)$$

kde vektor koeficientů  $\mathbf{c}$  je

$$\mathbf{c} = \left[ C_0(z) \ C_1(z) \ C_2(z) \ \cdots \ C_N(z) \right]^T, \quad (5.3)$$

matice  $\mathbf{U}$  je

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 0^0 & 0^1 & 0^2 & \cdots & 0^N \\ 1^0 & 1^1 & 1^2 & \cdots & 1^N \\ 2^0 & 2^1 & 2^2 & \cdots & 2^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N^0 & N^1 & N^2 & \cdots & N^N \end{bmatrix}^T \quad (5.4)$$

a vektor zpoždění je

$$\mathbf{z} = \left[ 1 \ z^{-1} \ z^{-2} \ \cdots \ z^{-N} \right]^T. \quad (5.5)$$

Z těchto koeficientů se následně vypočítají koeficienty impulzní odezvy FIR filtru představujícího Lagrangeův interpolátor:

$$h[n] = \sum_{k=0}^N c[k]D^k, \quad n = 0, 1, \dots, N. \quad (5.6)$$

Ve všech předešlých rovnicích představuje  $N$  řád filtru. Jakmile máme k dispozici vzorky impulzní odezvy, můžeme signál zpozdít o požadovanou zlomkovou hodnotu pomocí konvoluce příslušného signálu s impulzní odezvou odpovídajícího FIR filtru. V našem případě, kdy jsou hodnoty zlomkového zpoždění v rozsahu  $0 \leq D < 1$ , byl použit filtr 2. řádu, který má kvadratickou chybu největší při hodnotě zpoždění  $D = 0,5$  a to přibližně  $0,25$ . Ve výpisu kódu představuje matice  $Q$  matici  $U^{-1}$ . Na řádcích 46–50 je proveden výpočet koeficientů FIR filtru podle výše uvedených vzorců. Na následujících řádcích (52–68) je potom konvoluce navrženého filtru s příslušným sloupcem matice signálů, což zajišťuje zpoždění signálu o požadovanou zlomkovou hodnotu (s určitou chybou závislou na hodnotě  $D$ ). Délka výsledného signálu je stejná jako délka signálu před konvolucí. Nutno podotknout, že pro každý sloupec matice (signál mikrofону) je třeba navrhnout jeden filtr – podle konkrétní hodnoty zpoždění. Výsledkem celého cyklu funkce `delaySignal` je tedy matice výsledných signálů které zajišťují prakticky natočení paprsku přijímací charakteristiky.

V poslední části programu zobrazíme závislost střední hodnoty výkonu (nebo její úrovně) signálu na výstupu beamformeru na úhlu natočení beamformeru. Hodnoty pro vykreslení jsou v kódu reprezentovány maticí  $E$ . V případě MATLABu je výsledná mapa rozložení akustického tlaku zobrazena pomocí funkce `imagesc`. V jazyce C byla pro tyto účely napsána funkce `drawMap`, která je předmětem následujícího výpisu kódu.

#### Funkce pro vykreslení mapy rozložení akustického tlaku

```

1 //funkce pro vzkreslení mapy rozložení akustického tlaku
2 void drawMap(double **E, IplImage *noiseImage, IplImage *noiseImage_BW,
3             IplImage *noiseImage_BW_norm, int bodu){
4
5     double r, g, b, koef;
6
7     double mez1 = 0.86;
8     double mez2 = 0.61;
9     double mez3 = 0.36;
10    double mez4 = 0.11;
11
12    for(int i = 0; i < bodu; i++){
13        for(int j = 0; j < bodu; j++){
14
15            if(E[i][j] <= 1 && E[i][j] >= mez1){
16                koef = (0.5 * (1 - E[i][j])) / (1 - mez1);
17                r = 0.5 + koef;
18                g = 0;
19                b = 0;
20            }
21            else if(E[i][j] < mez1 && E[i][j] >= mez2){
22                koef = (mez1 - E[i][j]) / (mez1 - mez2);
23                r = 1;
24                g = 0 + koef;
25                b = 0;
26            }
27            else if(E[i][j] < mez2 && E[i][j] >= mez3){
28                koef = (mez2 - E[i][j]) / (mez2 - mez3);
29                r = 1 - koef;
30                g = 1;
31                b = 0 + koef;
32            }

```

```

33     else if(E[i][j] < mez3 && E[i][j] >= mez4){
34         koef = (mez3 - E[i][j]) / (mez3 - mez4);
35         r = 0;
36         g = 1 - koef;
37         b = 1;
38     }
39     else if(E[i][j] < mez4 && E[i][j] >= 0){
40         koef = (0.5 * (mez4 - E[i][j])) / (mez4 - 0);
41         r = 0;
42         g = 0;
43         b = 1 - koef;
44     }
45
46     CV_IMAGE_ELEM( noiseImage, float, i, j*3) = b;
47     CV_IMAGE_ELEM( noiseImage, float, i, j*3 + 1) = g;
48     CV_IMAGE_ELEM( noiseImage, float, i, j*3 + 2) = r;
49 }
50 }
51
52 for(int i = 0; i < bodu; i++){
53     for(int j = 0; j < bodu; j++){
54         CV_IMAGE_ELEM( noiseImage_BW, float, i, j) = E[i][j];
55     }
56 }
57
58 cvNormalize(noiseImage_BW, noiseImage_BW_norm, 0, 255, CV_MINMAX, NULL);
59
60 cvNamedWindow("Mapa rozložení akustického tlaku B&W", 0);
61 cvShowImage("Mapa rozložení akustického tlaku B&W", noiseImage_BW_norm);
62
63 cvNamedWindow("Mapa rozložení akustického tlaku",0);
64 cvShowImage("Mapa rozložení akustického tlaku",noiseImage);
65 }

```

Funkce `drawMap` využívá funkce a struktury knihovny OpenCV. Na řádcích 2 a 3 jsou uvedeny vstupní hodnoty, mezi kterými jsou hlavně ukazatele na struktury tří obrázků – `noiseImage`, `noiseImage_BW` a `noiseImage_BW_norm`. První z nich je určena pro zobrazení barevné mapy, další dvě pro černobílou mapu. Proměnná `bodu` udává rozměry výsledné mapy, tedy počet vertikálních a horizontálních úhlů natočení pole, ve kterých byla energie změřena. Meze 1–4 definované na řádcích kódu 7 až 10 udávají rozmezí hodnot energií, které se budou vykreslovat daným intervalem barev. Pro každý bod mapy se v příslušné množině barev vypočítá konkrétní odstín. Takto získanými hodnotami souřadnic RGB modelu se naplní struktura `noiseImage`. U mapy ve stupních šedi je situace jednodušší, strukturu stačí pouze naplnit hodnotami z matice `E` a následně znormalizovat její hodnoty do rozmezí jednoho bajtu, tedy 0–255, pomocí funkce `cvNormalize`. Na řádcích 60 až 64 jsou výsledné mapy zobrazeny.

## 5.4 Výsledky identifikace zdrojů hluku

Tato kapitola je zaměřena na uvedení a zhodnocení výsledků dosažených při realizaci systémů identifikace zdrojů hluku složených z mikrofonních polí uvedených v kapitole 5.2 a softwarových prostředků z kapitoly 5.3. Z prostorových důvodů budou uvedeny pouze výsledky některých variant konfigurací ze všech testovaných pozic a zdrojů

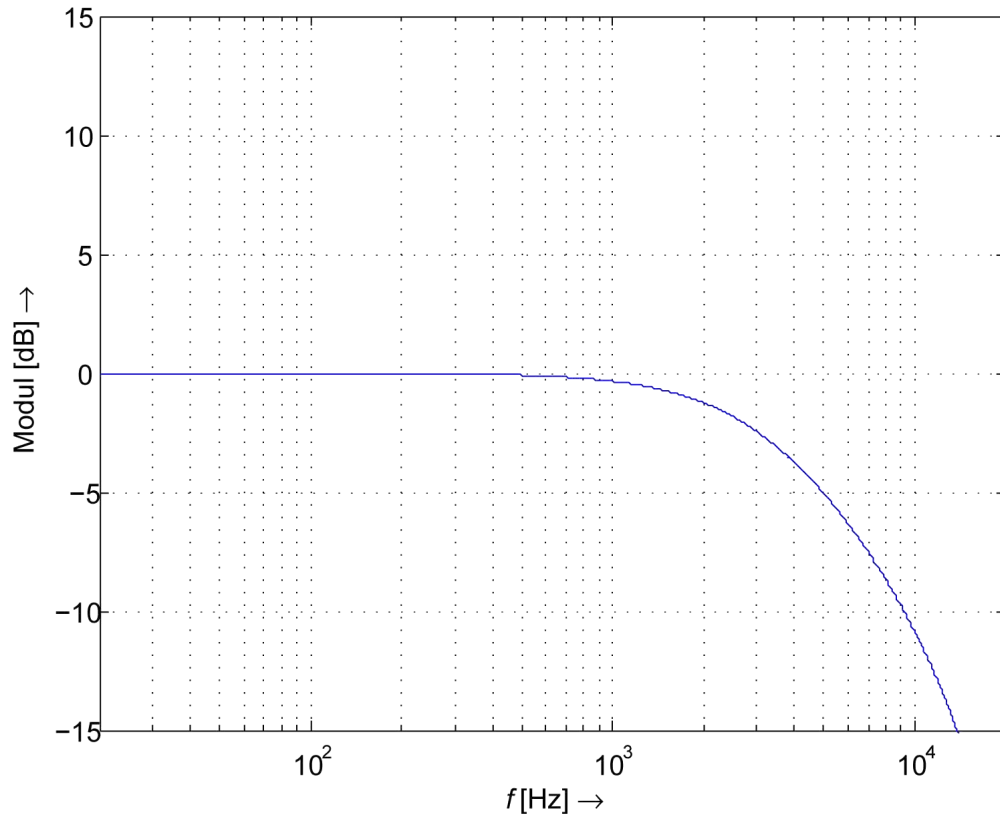
hluku, na kterých budou prezentovány schopnosti identifikace použitých systémů. Výsledky všech testovaných konfigurací jsou v případě zájmu uvedeny na přiloženém CD v jednotlivých adresářích databáze.

Vzhledem k tomu, že u měřených zdrojů hluku nemůžeme zaručit, že kmitočty, které zdroje emitují, budou nižší než hranice prostorového aliasingu, musíme použít filtr, který kmitočty zdroje odpovídajícím způsobem omezí. Pro tyto účely byl pro každý systém navržen parametrický filtr typu dolní propust. Parametrická realizace byla zvolena z důvodu snadného návrhu koeficientů filtru při změně dělicího kmitočtu. Návrh filtru je implementován ve funkci `pardp1.m`, samotná filtrace vstupních signálů beamformeru je realizována v rámci funkce `preprocessing.m`, která (mimo filtrace) zajišťuje i vykreslení časového průběhu a spektrogramu vstupních signálů a jejich zkrácení na požadovanou délku, což snižuje výpočetní náročnost zpracování beamformerem. Jako nejkratší délka signálů, která ještě neovlivňuje kvalitu výsledné mapy, byla empiricky zvolena hodnota 256 vzorků. Všechny dále uvedené obrázky byly vygenerovány v prostředí MATLAB funkcemi `beamformer_poleA-F.m`.

### 5.4.1 Systém s mřížovým polem

Prvním testovaným systémem byl systém s mikrofonním polem mřížového typu. Nejprve byla sestavena geometrická konfigurace z obrázku 5.3a a poté i nižší konfigurace (b a c). Díky rozteči  $d = 5$  cm je při normálních podmínkách, tedy rychlosti zvuku cca 344 m/s, hranice prostorového aliasingu na kmitočtu 3440 Hz. Jako mezní kmitočet antialiasingové dolní propusti byla tedy zvolena tato hodnota. Modulovou kmitočtovou charakteristiku tohoto parametrického filtru můžeme vidět na obrázku 5.6.

První zobrazení výsledku identifikace můžeme vidět na obrázku 5.7 v podobě velikosti normované energie akustického signálu (normovaná střední hodnota výkonu vypočteného podle rovnice 5.1) ve všech směrech natočení pole. Jako zdroj byl použit harmonický signál o kmitočtu 2 kHz, přehrávaný reproduktorovou soustavou umístěnou v poloze 1. Systém vykreslil polohu zdroje (střed elipsovité části s nejvyšší hodnotou energie) v úhlu přibližně  $100^\circ$  H (horizontálně) a  $67^\circ$  V (vertikálně). V obrázku 5.1 je vyznačeno umístění pozice 1 jako  $102^\circ$  H a  $105^\circ$  V (tedy  $180^\circ - 105^\circ = 75^\circ$  podle počátku osy beamformeru). Jak vidíme, lokalizace v horizontální rovině proběhla (i vzhledem k nepřesnostem měření) vcelku přesně. Ve vertikální rovině je situace horší kvůli nižšímu počtu v ní použitých mikrofonů. I tak je však rozdíl pouze  $8^\circ$ . Můžeme tedy konstatovat, že identifikace proběhla úspěšně. Dále můžeme pozorovat, že ve vertikálním směru při úhlech natočení menších než přibližně  $30^\circ$  je energie stále poměrně vysoká (barevný relief zde není symetrickým pokračováním elipsy). Je to pravděpodobně způsobeno dosti špatným rozlišením

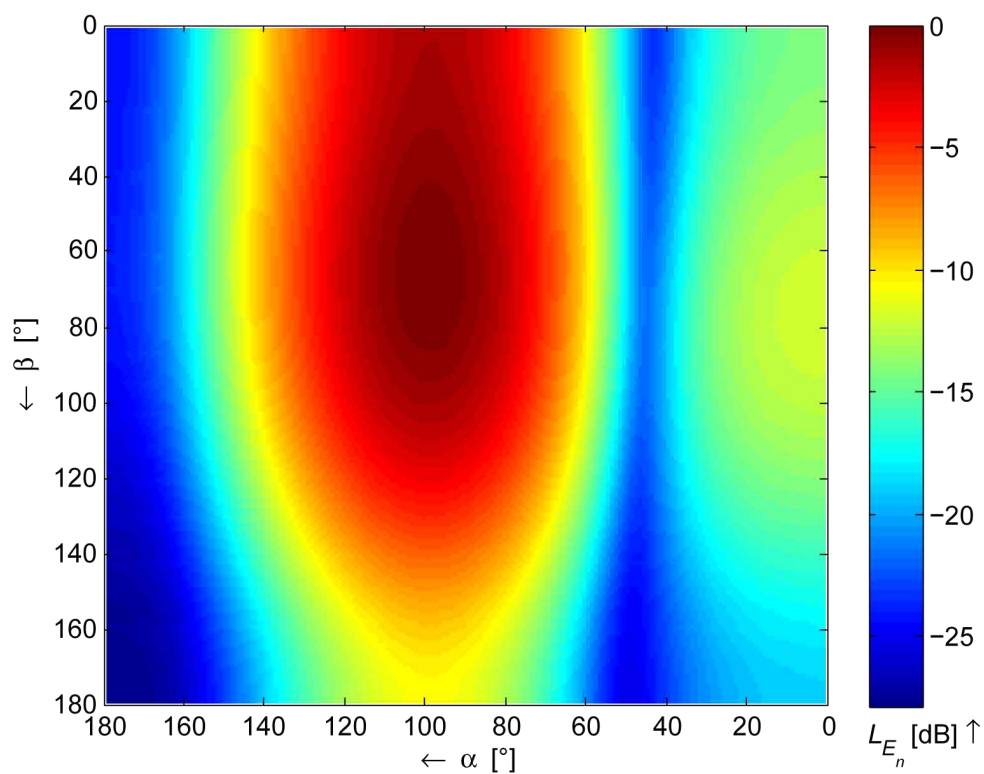
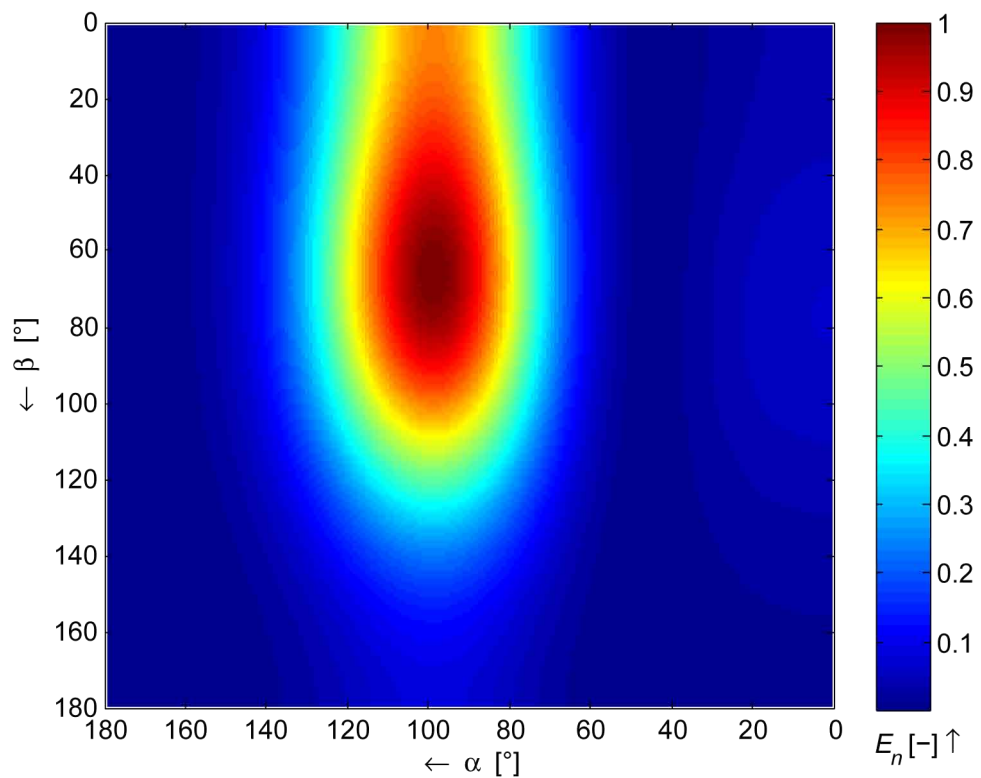


Obr. 5.6: Modulová kmitočtová charakteristika antialiasingové dolní propusti s mezním kmitočtem 3440 Hz.

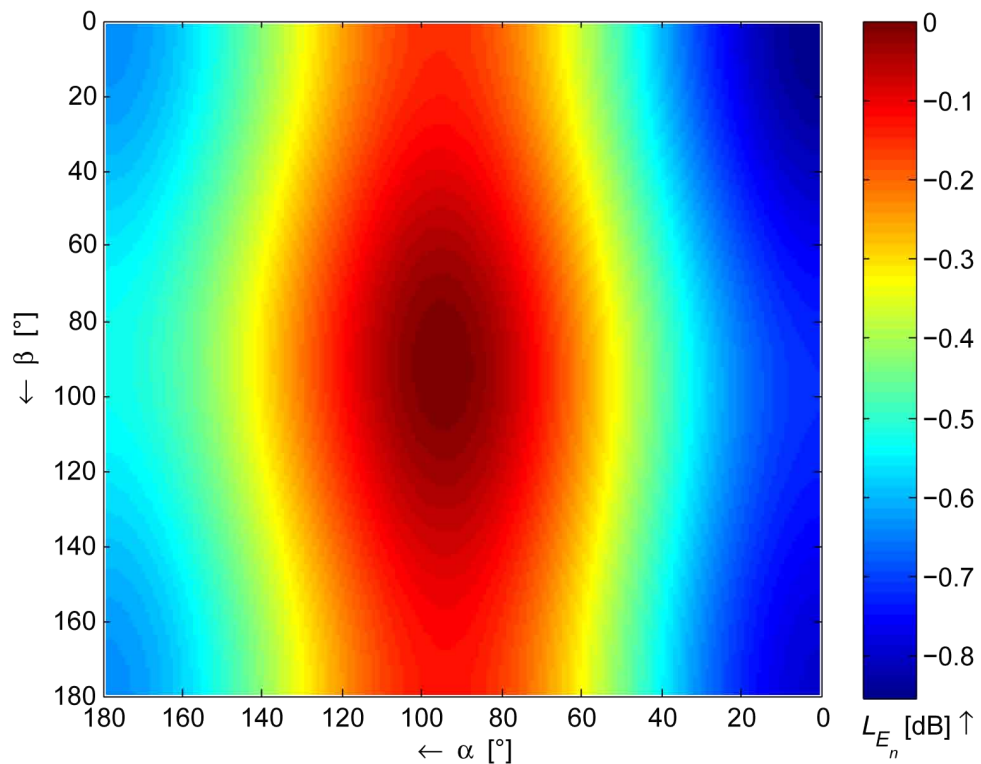
beamformeru v okrajových pozicích natočení (v praxi se používá natočení jen o  $\pm 30^\circ$ ), případně tvarem reproduktorové soustavy (méně pravděpodobné). Rozlišení dále klesá se snižujícím se kmitočtem signálu (viz obrázky v databázi na CD). Ze zobrazení úrovně energie lze vyčíst, že úroveň energie zdroje je o více než 25 dB vyšší než úroveň akustického pozadí mimo směr zdroje. To může být výsledkem periodicity harmonického signálu – jeho úzkopásmovostí. Také vidíme, že na pravém okraji mapy dosahuje energie lokálně vyšších úrovní (cca  $-12$  dB), to má pravděpodobně původ v tom, že v místě poměrně vysokého postranního laloku se při těchto úhlech natočení nachází měřený zdroj. Z mapy úrovní energie je přítomnost postranních laloků lépe patrná.

Na dalším obrázku 5.8 je uveden výsledek pro úryvek řečového signálu ve stejné pozici. Sledujeme, že přesnost lokalizace se relativně zhoršila. Důvodem zřejmě bude, že řečový signál má naprostou většinu energie soustředěnou v hodně nízkých kmitočtech (viz spektrogram na obrázku 5.9). Při použité velikosti pole je ale rozlišení na takto nízkých kmitočtech hodně špatné. Také rozsah hodnot úrovní energie v rámci mapy je značně menší, pouze necelý dB.

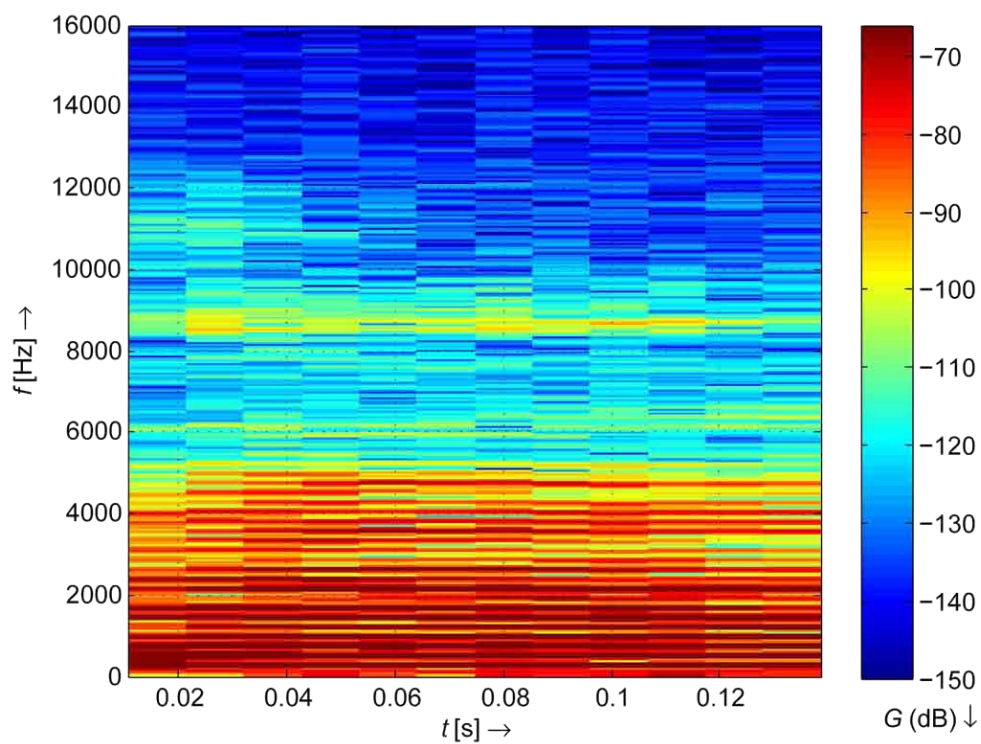
Jako další zdroj signálu byl použit elektrický holicí strojek. Hluk produkovaný



Obr. 5.7: Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz v poloze 1: (nahore) závislost velikosti normované energie signálu na úhlu natočení beamformery, (dole) závislost úrovně normované energie signálu na úhlu natočení beamformery.

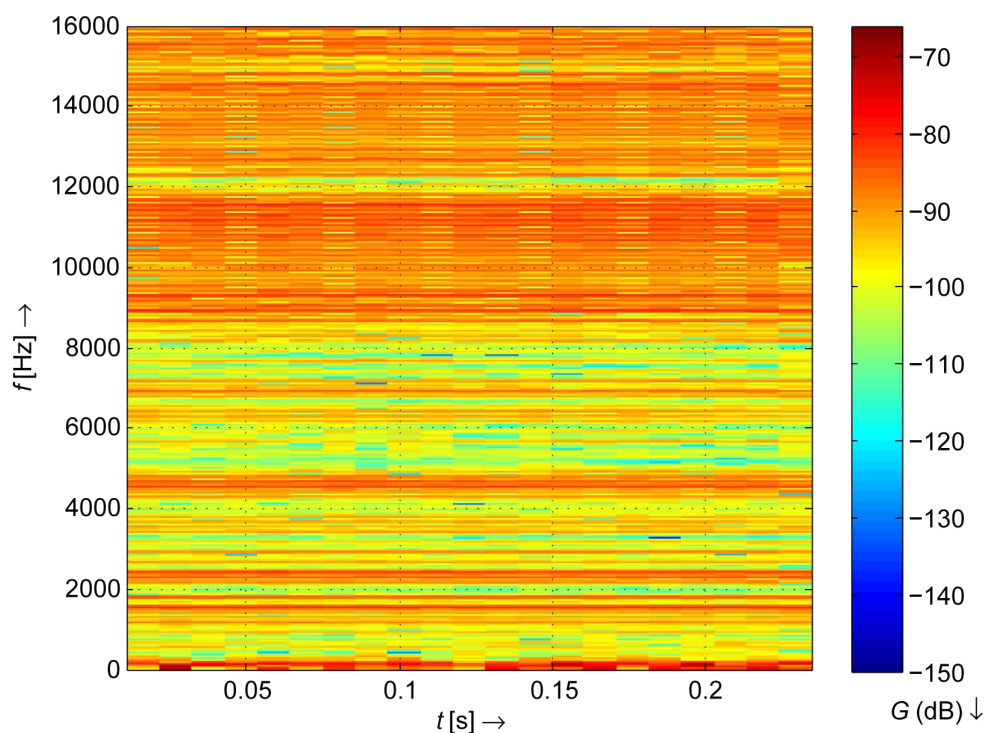


Obr. 5.8: Identifikace zdroje řeči v poloze 1: závislost velikosti normované energie signálu na úhlu natočení beamformery.



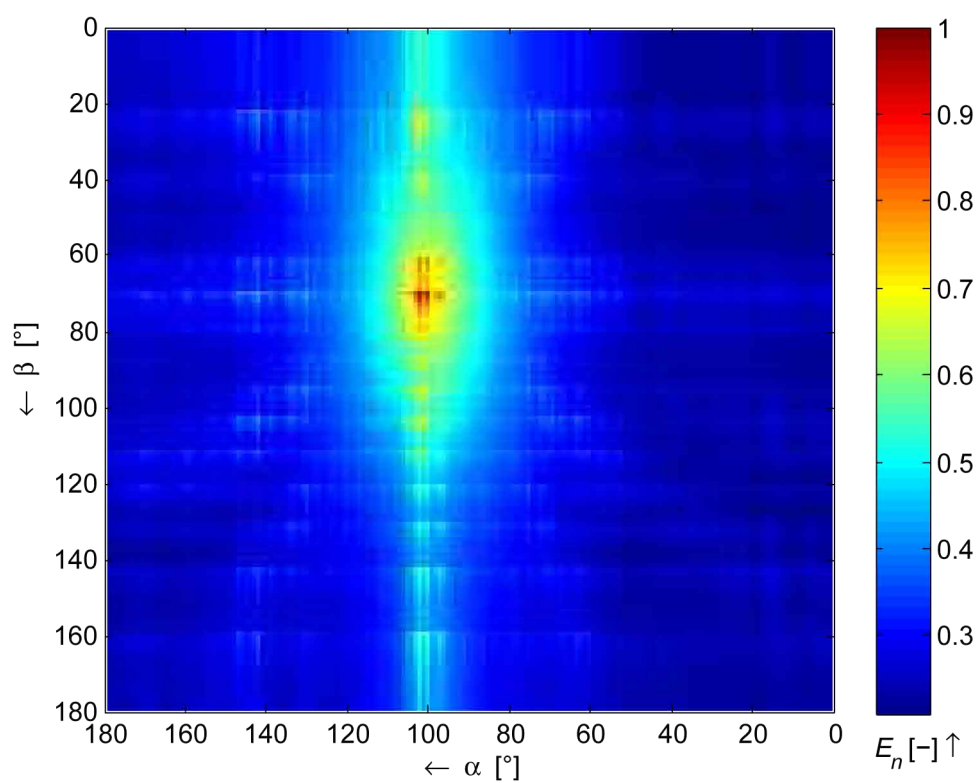
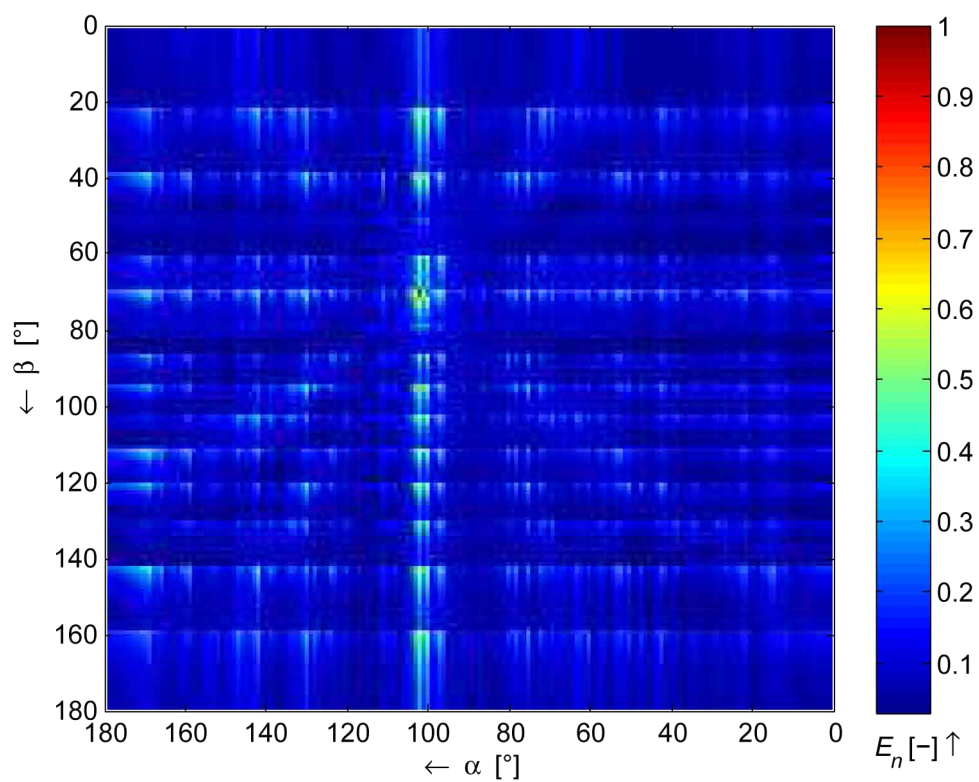
Obr. 5.9: Spektrogram použitého úseku řečového signálu filtrovaného dolní propustí z obrázku 5.6.

strojkem měl vysoce širokopásmový charakter, jak můžeme vidět na spektrogramu v obrázku 5.10. Signál obsahuje bohaté zastoupení kmitočtů i několikanásobně vyšších než hraniční kmitočet prostorového aliasingu (3440 Hz). Výsledek identifikace takového zdroje vidíme na obrázku 5.11 nahoře. I když jsme relativně schopni rozlišit pozici zdroje (jako největší oblast nejvyšší energie), nalézá se v mapě mnoho fiktivních zdrojů s podobně vysokou energií hlavně ve vertikálním směru. Navíc můžeme pozorovat přítomnost určitých nespojitostí (vzájemně kolmých čar), které jsou patrně také výsledkem aliasingu v kombinaci s chybou Lagrangeova interpolátoru a celkově algoritmu celého výpočtu. Podle těchto čar lze také přibližně rozeznat schopnosti beamformeru co se týče rozlišení. S rostoucím rozlišením se totiž vzdálenosti mezi čarami snižují, až dojde k jejich zaniknutí – to dosáhneme zvýšením počtu mikrofonů a zvětšením apertury pole.

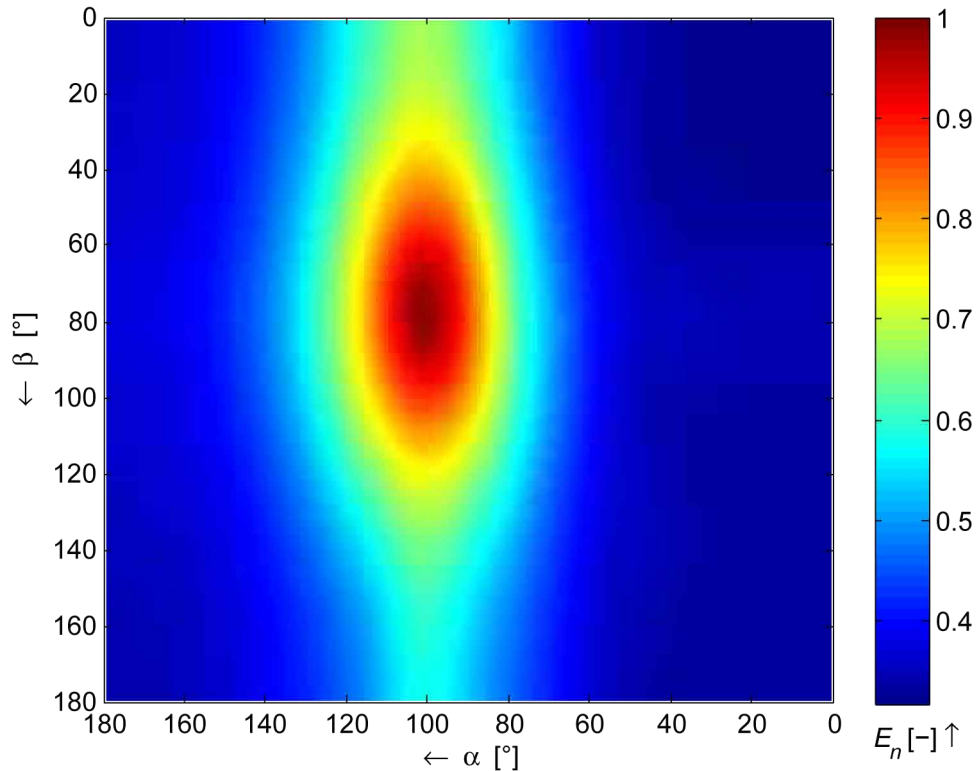


Obr. 5.10: Spektrogram akustického signálu holicího strojku bez filtrace dolní propustí z obrázku 5.6.

V případě, že signál v rámci preprocessingu odfiltrujeme uvedenou antialiasingovou dolní propustí, situace se značně zlepší a systém je schopen poměrně slušné identifikace (viz obrázek 5.11 dole). Čím méně kmitočtů nad hranicí 3440 Hz pak bude signál obsahovat, tím lepší identifikace dosáhneme. Zajímavé bylo pozorovat, že při použití jiného módu holicího strojku (na zastřižování krátkých vousů) měl emitovaný hluk jiné spektrální složení a identifikace byla kvalitnější (viz obrázek 5.12). Dynamický rozsah v případě identifikace holicího strojku je cca 6 dB.



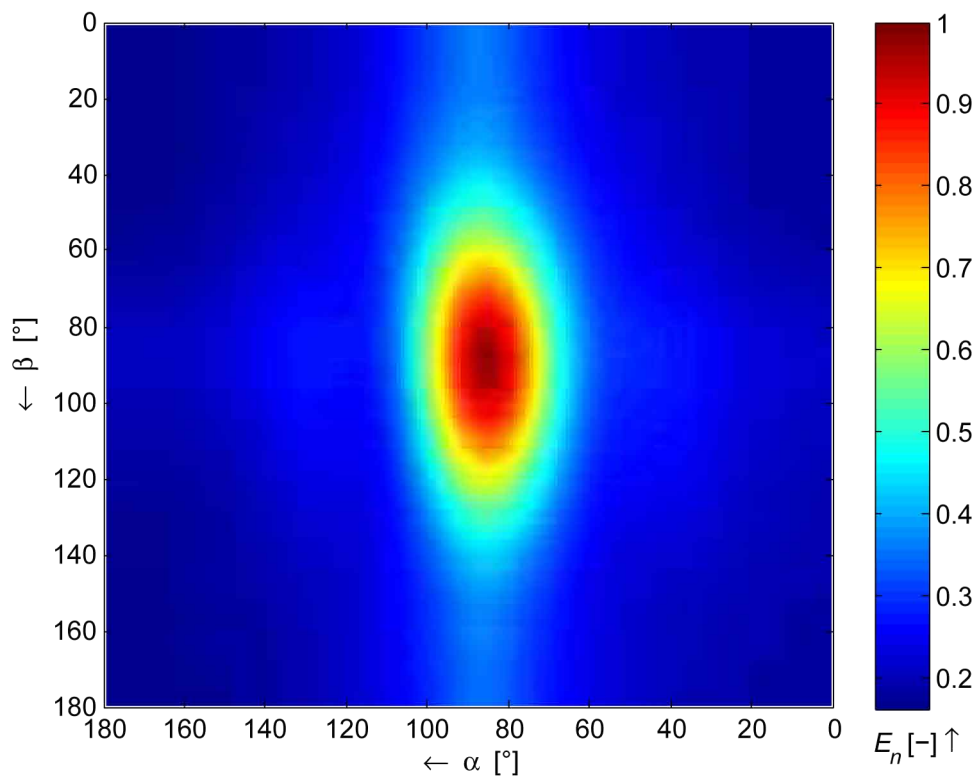
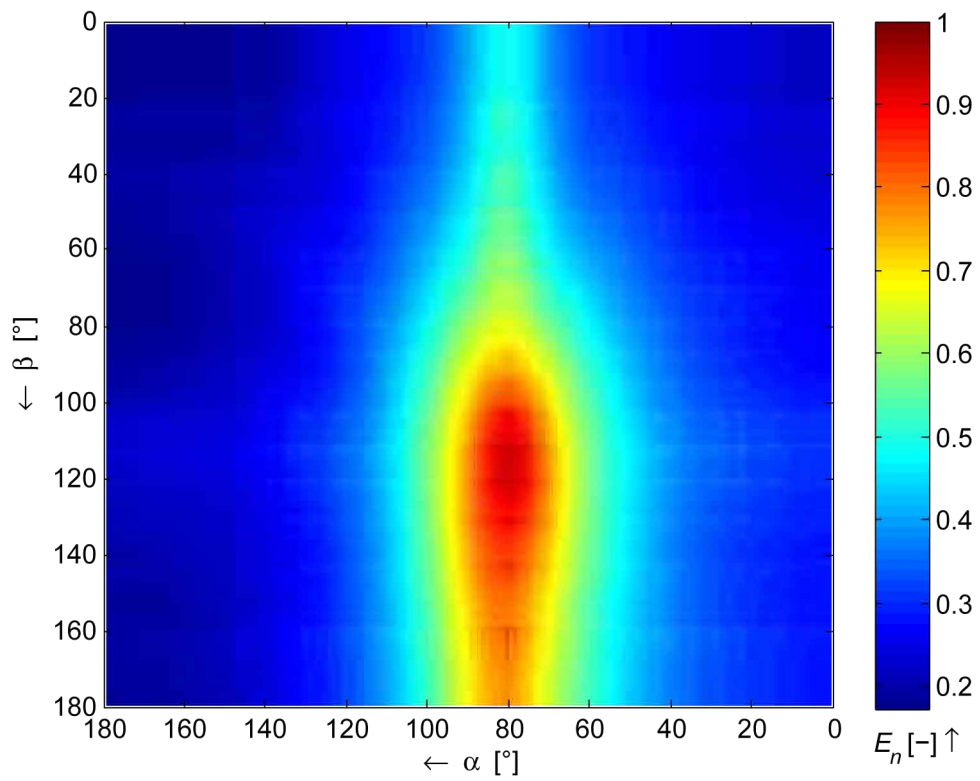
Obr. 5.11: Identifikace elektrického holicího strojku v poloze 1: (nahore) bez filtrace antialiasingovou DP, (dole) s použitím filtrace antialiasingové DP.



Obr. 5.12: Identifikace elektrického holicího strojku v poloze 1 – použití jiného pracovního módu holicího strojku.

Podobná situace jako s holicím strojkem nastává i v případě hluku vrtačky. Její spektrum má také velké množství energie na vysokých kmitočtech, proto je znovu nutná filtrace dolní propustí. Výsledek je zobrazen na obrázku 5.13 nahoře. Dynamický rozsah mapy je podobný jako v případě holicího strojku (cca 7 dB). V případě vrtačky jsme ještě vyzkoušeli použít úsek signálu z její počáteční fáze činnosti (cca 0,5s po zapnutí). Tento úsek měl opět jiné spektrální složení (méně energie na vyšších kmitočtech), takže identifikace byla kvalitnější (obrázek 5.13 dole). Musíme také poznamenat, že vrtačku bylo při měření nutno držet v ruce, došlo tedy k dalšímu narušení bezodrazovosti komory. Podle obrázku 5.13 nahoře můžeme podotknout, že k identifikaci došlo s vysokou přesností (vzhledem k pozici 2 na obrázku 5.1).

Na následujícím obrázku 5.14 nahoře je identifikace harmonického signálu v pozici 1 pomocí systému s konfigurací mikrofonního pole z obrázku 5.3b-vlevo, tedy se sníženou horizontální konfigurací. Pozorujeme, že podle očekávání se horizontální schopnost identifikace oproti obrázku 5.7 opravdu zhoršila. V podobném trendu dále pokračuje i identifikace s polem 5.3b-vpravo na obrázku 5.14 dole. Tato konfigurace je minimální pro identifikaci zdroje v poloprostoru, je však i jediným (námi testovaným) opravdovým mřížovým polem – má čtvercovou geometrii a stejné rozlišení



Obr. 5.13: Identifikace vrtačky: (nahore) úsek signálu vrtačky při plném výkonu v poloze 2, (dole) úsek signálu vrtačky bezprostředně po spuštění cca v ose pole.

v obou směrech. Na obrázku 5.15 nahoře je obraz holicího strojku v poloze 2 identifikovaného systémem s nejnižší možnou konfigurací pole. Je uveden z důvodu toho, že je na něm dobře patrné řidší rozmístění výše zmíněných čar, tedy horší schopnost rozlišení. Obrázek 5.15 dole reprezentuje výhodnou vlastnost tohoto pole - tedy čtvercová geometrie, která způsobuje symetričnost zobrazení zdroje, tzn. neovlivňuje případný tvar zdrojem vyzařované akustické energie.

### 5.4.2 Systém s částečným mřížovým polem

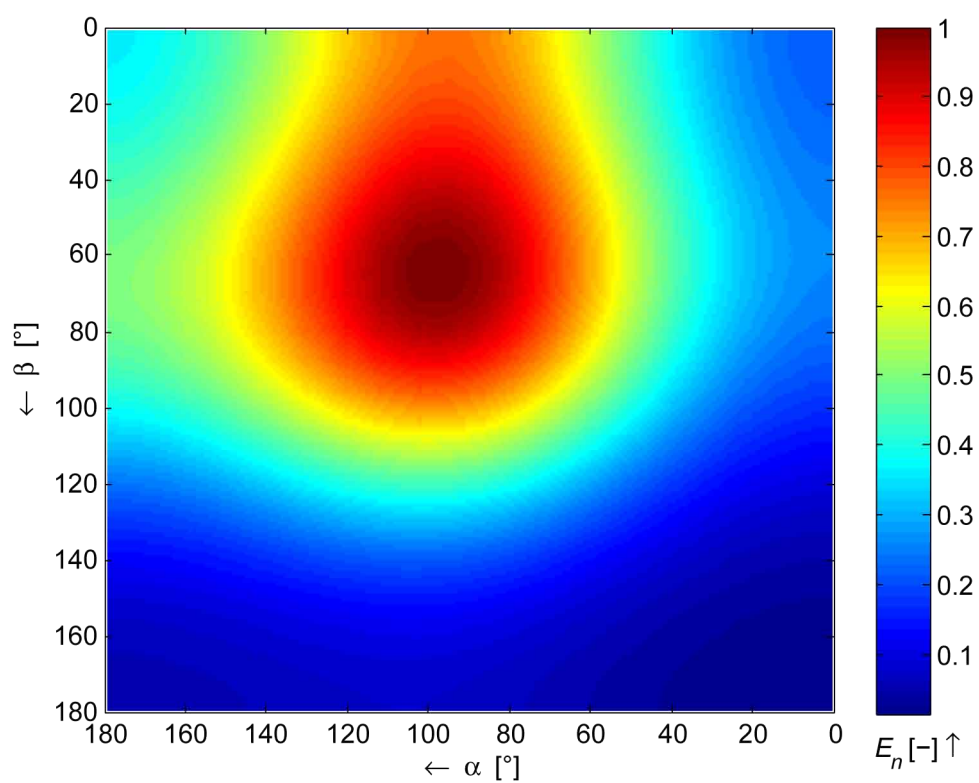
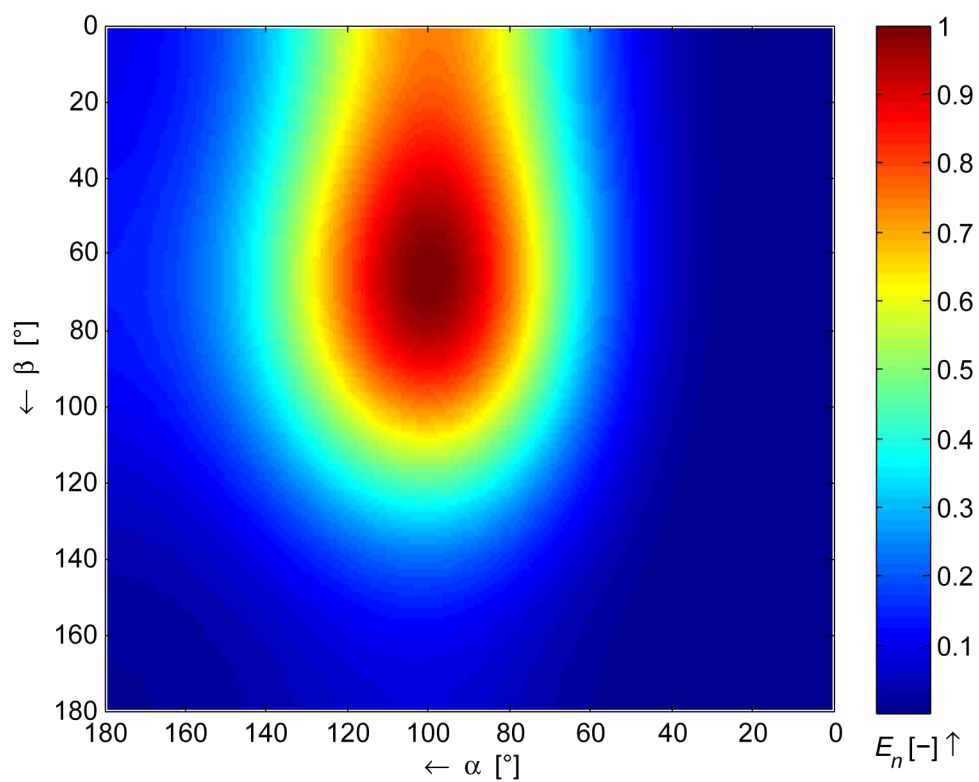
Mezi tyto systémy zařadíme systémy s mikrofonními poli z obrázku 5.3c a 5.3d. Tato pole byla vytvořena hlavně z důvodu zvětšení apertury mřížového pole za účelem zlepšení schopnosti prostorového rozlišení systému, což demonstruje obrázek 5.16. Mapa ukazuje obraz vrtačky při plném výkonu, vytvořený systémem se čtvercovým polem z obrázku 5.3d. V předchozích systémech byly v těchto situacích na obrázcích vidět nespojitosti v podobě čar, které jsou sice přítomné i v tomto zobrazení, ale díky jejich hustotě nejsou okem skoro postřehnutelné. Na obrázku 5.17 je příklad vlivu aliasingu – kmitočet harmonického signálu vyzařovaného zdrojem byl nastaven na 5 kHz. To je o více než 1 kHz překročená hranice aliasingu. Jako důsledek vidíme vznik obrazů fiktivních zdrojů na dalších třech pozicích. Tyto zdroje mají podobnou hodnotu energie jako zdroj opravdový. V případě čtvercového pole dosáhneme opět symetričnosti zobrazení.

### 5.4.3 Systém s částečným křížovým polem

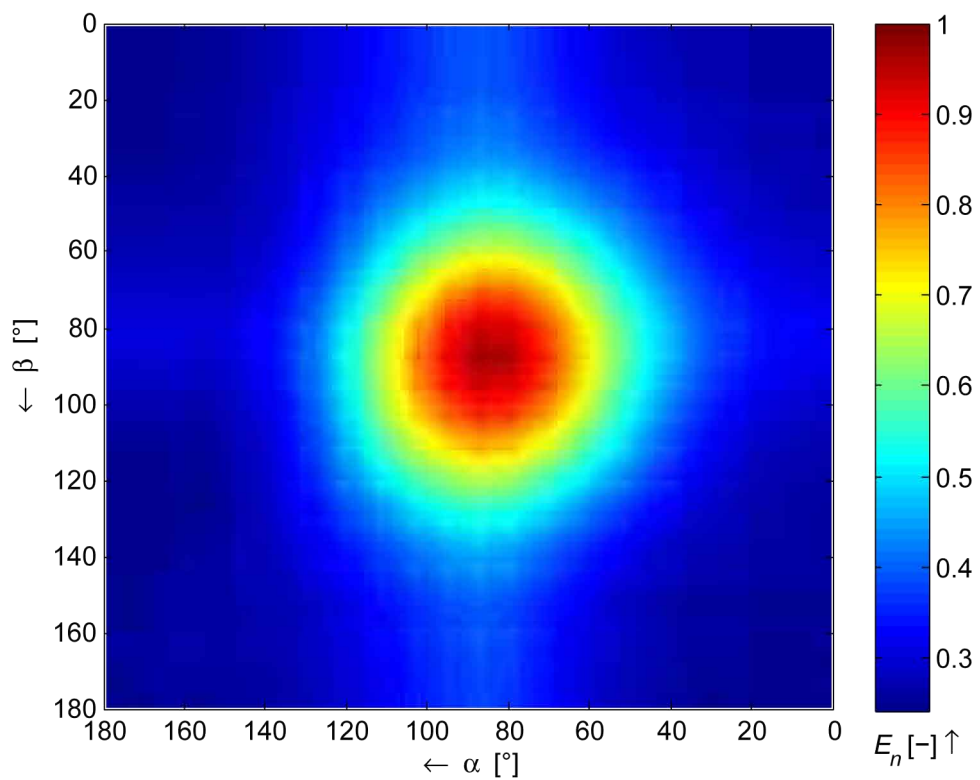
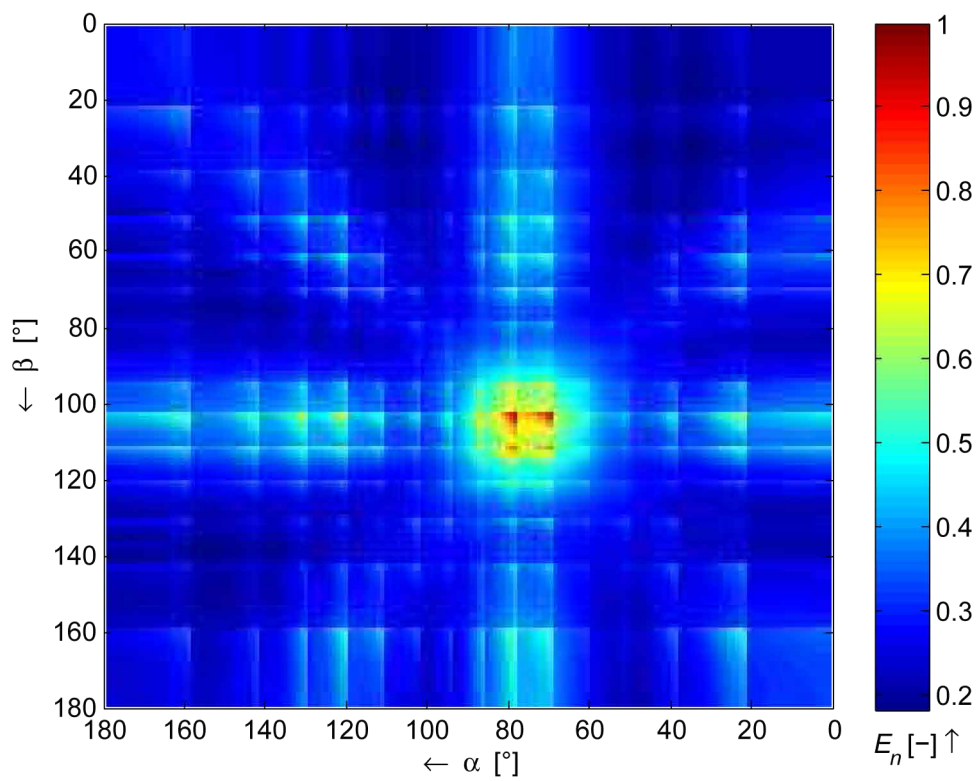
Křížová pole mají přínos hlavně při zvyšování použitelného kmitočtu zdroje (hranice prostorového aliasingu) pro pole o daném počtu mikrofonů za podmínky zachování velikosti apertury. Naše realizace z obrázku 5.3 se však za křížové pole dá, z důvodů zmíněných v kapitole 5.2, považovat pouze částečně. Při testování jsme s použitím tohoto pole nedosáhly žádných významnějších výsledků. Na obrázku 5.18 je pouze příklad identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz v poloze 2. Už při tomto kmitočtu přitom můžeme pozorovat výraznější postranní laloky. Další příklady jsou uvedeny v databázi na přiloženém CD.

### 5.4.4 Systém s elipsovým polem

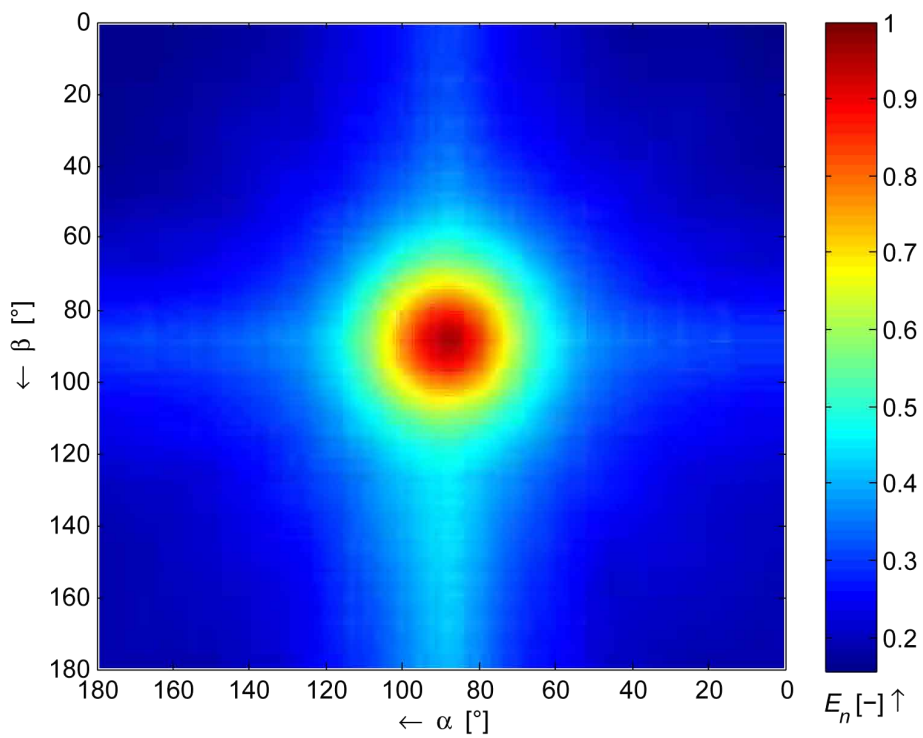
Geometrické uspořádání tohoto pole bylo nejnáročnější na konstrukci. Zároveň mělo největší rozměry, což by mělo znamenat přesnější prostorovou rozlišovací schopnost. Vzdálenosti mikrofonů jsou různé, přitom ale minimálně 8 cm. Tedy, kmitočet na hranici aliasingu je roven (za normálních podmínek) maximálně 2150 Hz, spíše nižší. Pole je však možné považovat za částečně nepravidelné, tzn. aliasing by se



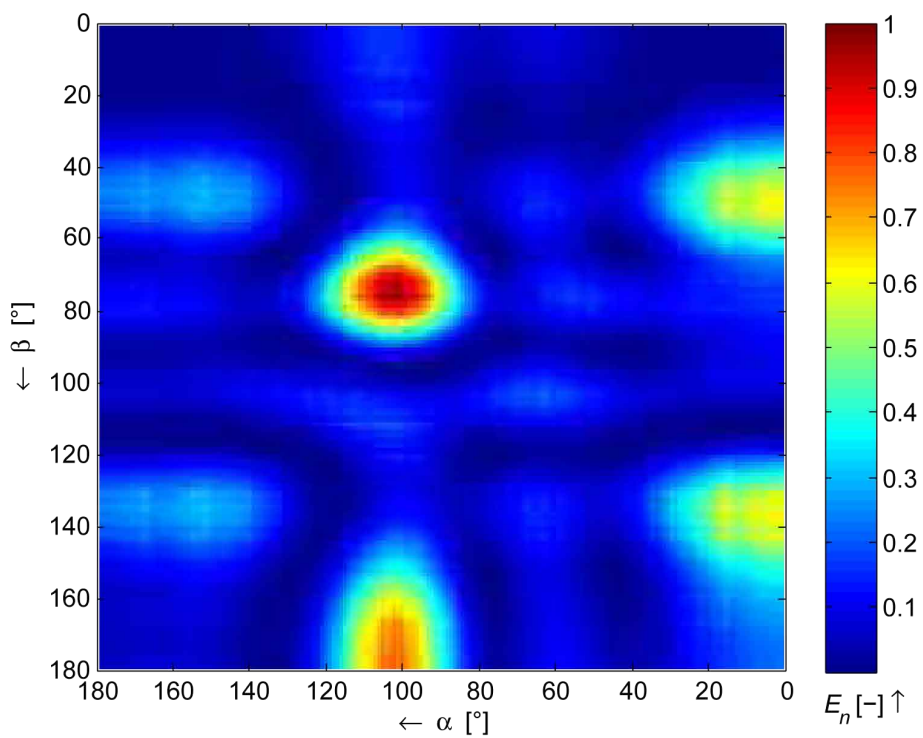
Obr. 5.14: Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz systémem s mikrofonním polem z obrázku: (nahore) 5.3b-vlevo, (dole) 5.3b-vpravo.



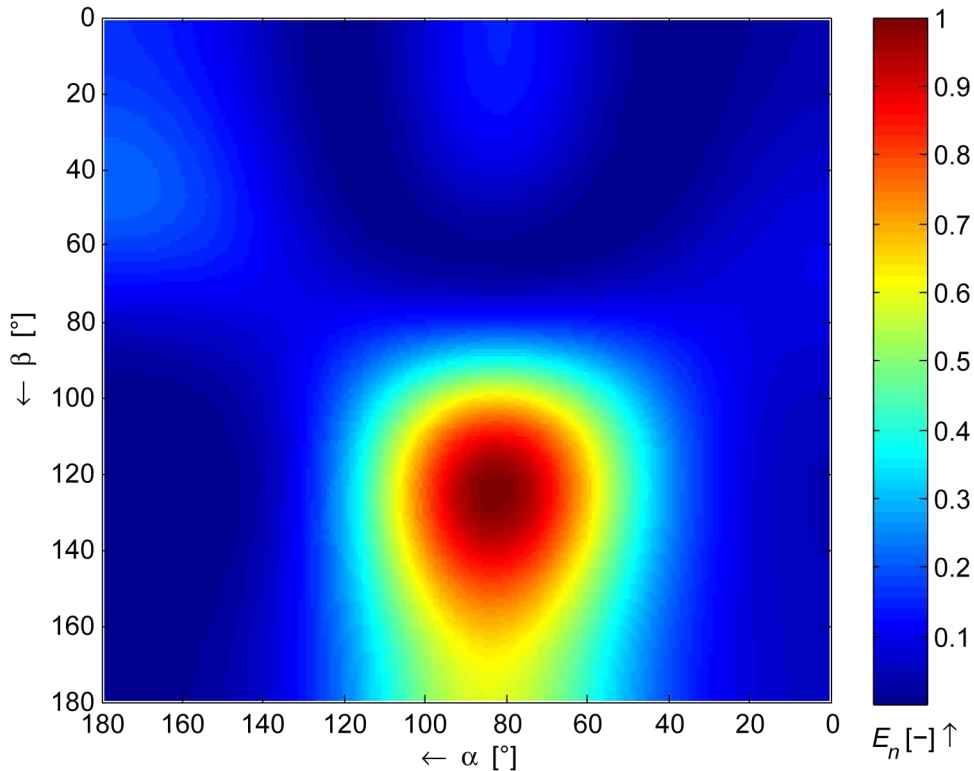
Obr. 5.15: Identifikace systémem s mikrofonním polem z obrázku 5.3b-vpravo: (nahore) holicí strojek v poloze 2, (dole) úsek signálu vrtačky bezprostředně po spuštění cca v ose pole.



Obr. 5.16: Identifikace vrtačky při plném výkonu systémem se čtvercovým mikrofonním polem z obrázku 5.3d. Vrtačka byla umístěna cca v ose pole.

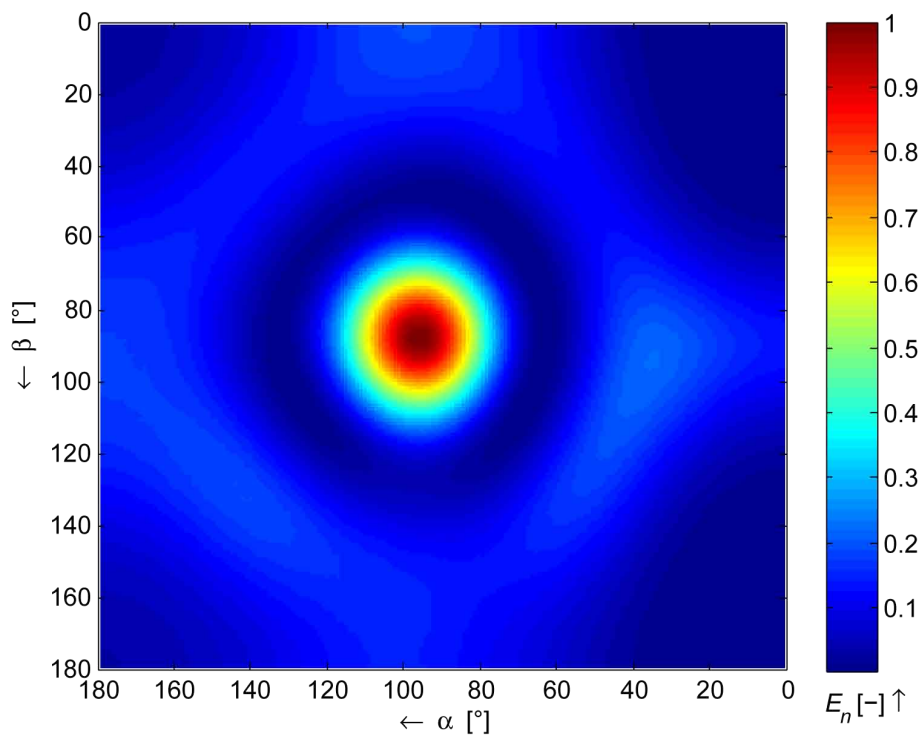


Obr. 5.17: Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 5 kHz – demonstrace vzniku aliasingu a obrazů fiktivních zdrojů.

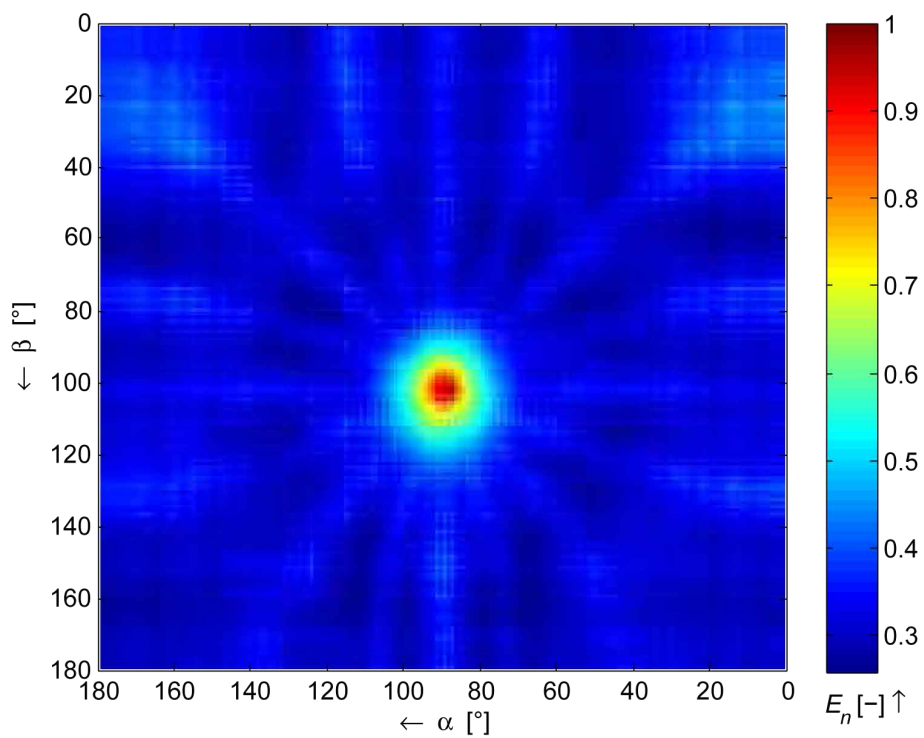


Obr. 5.18: Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz s použitím částečného křížového pole.

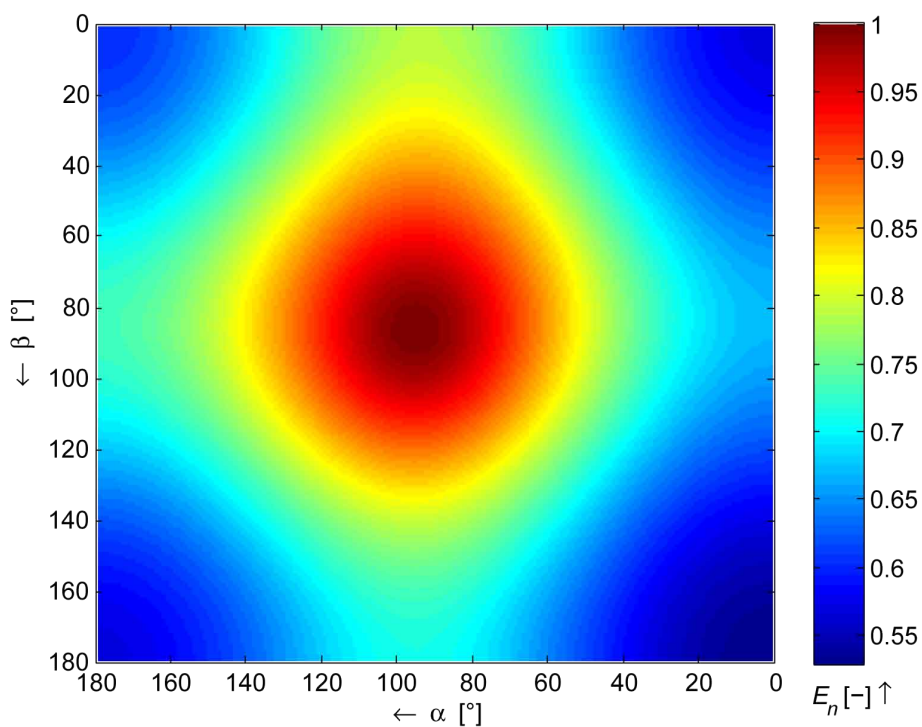
nemusel projevovat skokem (viz předchozí kapitoly). Na obrázku 5.19 je typická identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz. Vidíme, že zdroj je identifikován s malým rozptylem vysoké energie – paprsek beamformeru je nejúžší ze všech testovaných konfigurací. Aliasing přitom ještě nenastal. Je také patrná prstencovitá oblast kolem zdroje, která má nejnižší úroveň energie. Tu pozorujeme (ve slabší míře) i na dalším obrázku 5.20, kde je identifikován holicí strojek. Zde jsou kromě toho vidět také paprscité postranní laloky. Větší apertura pole umožňuje lepší rozlišení na nízkých kmitočtech. To dokazuje obrázek 5.21 pomocí identifikace zdroje řečového signálu. Tentokrát je pozice určena s větší přesností, než v případě obrázku 5.8. Nemůžeme spolu ale srovnávat přímo hodnoty úhlů identifikovaných zdrojů z předchozích dvou zmiňovaných obrázků, elipsovité pole (viz kapitola 5.2) mělo totiž v prostoru komory jinou polohu vůči měřeným pozicím. Víme ale, že zdroj řečového signálu byl umístěn ve stejné pozici jako zdroj harmonického signálu z obrázku 5.19. Srovnáním úhlů těchto dvou zdrojů vidíme, že řeč byla lokalizována téměř identicky. Samozřejmě se však liší velikost hlavního laloku přijímací charakteristiky. Při identifikaci řeči je znatelně širší. Na posledním obrázku 5.22 je příklad silného aliasingu a velkého množství obrazů fiktivních zdrojů. V tomto případě identifikace zdroje s kmitočtem 5 kHz selhala (více než u systému na obrázku 5.17).



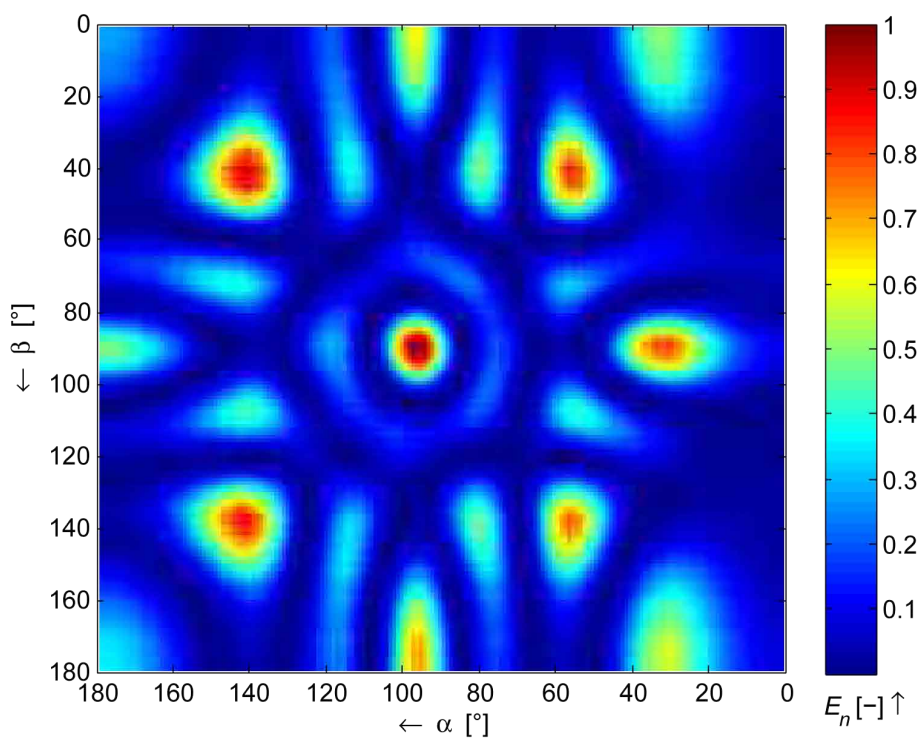
Obr. 5.19: Identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 2 kHz systémem s elipsovým mikrofonním polem z obrázku 5.3f. Zdroj v pozici 1.



Obr. 5.20: Identifikace holicího strojku systémem s elipsovým mikrofonním polem. Strojek byl v poloze středu předchozích polí.



Obr. 5.21: Identifikace zdroje řečového signálu v poloze 1 systémem s elipsovým mikrofonním polem.



Obr. 5.22: Selhání identifikace zdroje harmonického signálu o kmitočtu 5 kHz systémem s elipsovým mikrofonním polem.

## 6 ZÁVĚR

V této práci byl kompletně popsán systém určený k identifikaci zdrojů hluku pomocí mikrofonních polí. Bližší pozornost byla věnována zejména metodě beamformingu, byly diskutovány její výhody a nedostatky oproti další využívané metodě – akustické holografii. Konkrétně byl uveden detailní rozbor techniky Delay-And-Sum, která byla následně implementována v prostředí MATLAB a v jazyce C – jejich popis je obsahem příslušné kapitoly. Obě funkce podávají stejné výsledky, liší se pouze způsobem načítání vstupních dat a částečně způsobem jejich reprezentace. Jsou schopny zpracovat signály z prakticky jakékoliv konfigurace mikrofonního pole. Výstupem jsou mapy rozložení akustického tlaku (energie) v poloprostoru před měřícím mikrofonním polem. Metoda beamformingu není schopna analyzovat absolutní hodnoty velikosti nebo úrovně akustického tlaku měřených zdrojů. Výsledné mapy tedy reprezentují jen relativní poměry akustické energie.

Funkce jsou určeny ke zpracování výstupních signálů mikrofonních polí, které byly v rámci systému identifikace vytvořeny a otestovány v částečně bezdozvukové komoře simulující prostředí volného pole. Schopnost identifikace byla dosažena v horizontální i vertikální rovině. Výsledky identifikace různých zdrojů hluku jsou podrobněji zanalyzovány v příslušné kapitole spolu s některými grafickými výstupy. Z těchto výsledků lze získat představu o využití konkrétních konfigurací v reálných aplikacích. Všechny nasnímané signály, fotky jednotlivých konfigurací i výsledné mapy rozložení akustické energie lze najít v databázi experimentů na přiloženém CD. Obecně můžeme, vzhledem k dosaženým výsledkům, považovat vytvořené systémy pro identifikaci zdrojů hluku za funkční (samozřejmě s jistou přesností a omezeními, které byly uvedeny). Pole sestavená v rámci experimentů byla pouze základními konfiguracemi, měli jsme totiž k dispozici pouze 8 mikrofónů. K rapidnímu zlepšení dosažených výsledků dojde při použití většího počtu mikrofónů v poli (alespoň dvojnásobku současného počtu).

## LITERATURA

- [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] BISCHOF, G. *Acoustic Imaging of Sound Sources – A Junior Year Student Research Project*. Paper of the 38th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, Saratoga Springs, NY, October 22–25, 2008, 6 s. Dostupný z URL: <<http://fie-conference.org/fie2008/papers/1024.pdf>>.
- [3] BRANDSTEIN, M., WARD, D. (Eds.) *Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications*. Springer-Verlag Berlin, 2001. 389 s. ISBN 3-540-41953-5.
- [4] DOUGHERTY, Robert P. *What is Beamforming?*. Paper of the 2nd Berlin Beamforming Conference, February 19.–20., 2008, 6 s. Dostupný z URL: <[http://bebec.eu/Downloads/BeBeC2008/Papers/BeBeC-2008-01\\_Dougherty.pdf](http://bebec.eu/Downloads/BeBeC2008/Papers/BeBeC-2008-01_Dougherty.pdf)>.
- [5] HALD, J. *Combined NAH and Beamforming Using the Same Microphone Array*. Article of the Journal of Sound and Vibration, December 2004, s 18–25. Dostupný z URL: <<http://www.sandv.com/downloads/0412hald.pdf>>.
- [6] HEROUT, P. *Učebnice jazyka C. Třetí upravené vydání*. Nakladatelství Kopp, České Budějovice, 2001, 269 s. ISBN 80-85828-21-9
- [7] CHRISTENSEN, J.J., HALD, J. *Beamforming*. Brüel&Kjær Technical Review No. 1, 2004, 54 s. ISSN 0007–2621. Dostupný z URL: <<http://www.bksv.com/doc/bv0056.pdf>>.
- [8] MICHEL, U. *History of Acoustic Beamforming*. Paper of the 1st Berlin Beamforming Conference, November 21.–22., 2006, 17 s. Dostupný z URL: <[http://www.bebec.eu/Downloads/BeBeC2006/Papers/BeBeC-2006-01\\_Michel.pdf](http://www.bebec.eu/Downloads/BeBeC2006/Papers/BeBeC-2006-01_Michel.pdf)>.
- [9] QUARANTA, V., CONCILIO, A. *Microphone Phased Arrays (Acoustic Antennas) research at CIRA*. Presentation of the Italian Aerospace Research Centre, Workshop of Center for Acoustics and Vibrations. Pennsylvania, May 3.–4., 2010, 35 s. Dostupný z URL: <[www.cav.psu.edu/Workshops/2010/CAV2010\\_CIRA\\_Concilio.pdf](http://www.cav.psu.edu/Workshops/2010/CAV2010_CIRA_Concilio.pdf)>.
- [10] SIGL, J., SCHEUCHER, R. *Acoustic Imaging of Sound Sources with a student-designed Acoustic Camera*. Article of the American Journal of Undergraduate

Research vol.6, NO.2, August 18, 2007, 8 s. Dostupný z URL: <<http://iee-conference.org/iee2008/papers/1024.pdf>>.

- [11] VÄLIMÄKI, V. *Discrete-Time Modeling of Acoustic Tubes Using Fractional Delay Filters*. Helsinki, December 1995. 192 s. Dizertační práce. Helsinki University of Technology, Faculty of Electrical Engineering. ISBN 951-22-2880-7.
- [12] WEST, N., BELL, S. *Acoustic Beamforming: System Theory and Requirements*. Article of IEEE, 10 s. Dostupný z URL: <[http://www.botsnlinux.net/websvn/filedetails.php?repname=Random+stuff&path=/dsp\\_project/writeups/theory\\_requirements.pdf](http://www.botsnlinux.net/websvn/filedetails.php?repname=Random+stuff&path=/dsp_project/writeups/theory_requirements.pdf)>.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- $\alpha$  směr natočení mikrofonního pole ( $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ )
- $a_m$  útlum  $m$ -tého kanálu
- $a_s$  normalizovaný součet útlumů všech kanálů
- $c$  rychlost zvuku ve vzduchu (v normálních podmínkách 344 m/s)
- $c$  koeficienty pro výpočet impulzní charakteristiky Lagrangeova interpolátoru
- $c_m$   $m$ -tý koeficient prostorového filtru
- $d$  vzdálenost mezi dvěma sousedními mikrofony v mikrofonním poli typu ULA
- $D$  hodnota zlomkového zpoždění
- $d_m$  vzájemná vzdálenost referenčního a  $m$ -tého mikrofonu v uniformním poli
- DAS Delay And Sum
- DOA Direction Of Arrival
- $\mathcal{F}_m(\tau)$  relativní zpoždění mezi mikrofony 1 a  $m$
- $f_{vz}$  vzorkovací kmitočet
- $k_m$  vzdálenost mezi mikrofony, kterou musí při dopadu zvuková vlna urazit
- $K(\psi, \alpha)$  přijímací charakteristika beamformeru
- MSL Maximální úroveň bočních laloků přijímací charakteristiky
- $M$  počet mikrofonů (kanálů) v poli
- $m$  pořadí mikrofonu v poli ( $m = 1, 2, \dots, M$ )
- NAH Near-Field Acoustic Holography
- $P$  střední výkon výstupního signálu Delay-And-Sum beamformeru
- $p(t)$  výstupní signál Delay-And-Sum beamformeru v čase  $t$
- $\psi$  směrový úhel směrové charakteristiky prostorového filtru
- $R$  šířka hlavního laloku (paprsku) přijímací charakteristiky pole
- $s(t)$  výstupní signál  $m$ -tého mikrofonu v čase  $t$

- $S(\psi, \alpha)$  směrová charakteristika prostorového filtru
- SNR odstup úrovně signálu od úrovně šumu (obecně udávaný v dB)
- $t$  čas
- $\tau$  časový rozdíl dopadu vlny mezi dvěma mikrofony (TDOA)
- $\theta$  směr příchodu vlny – ostrý úhel mezi normálou vlnoplochy procházející mikrofonom a rovinou mikrofonního pole
- $t_s$  čas šíření vlny od zdroje k senzoru 1
- TDOA Time Difference Of Arrival
- U** Vandermondova matice
- ULA uniformní lineární pole s ekvidistantním rozložením mikrofonů
- $v_{a,m}(t)$  časově posunutý aditivní šumový signál  $m$ -tého mikrofону
- $v_s(t)$  součet šumových signálů mikrofonů
- $v_m(t)$  aditivní šumový signál  $m$ -tého mikrofону
- $w_m$  váhovací konstanta  $m$ -tého mikrofону
- $x_{a,m}(t)$  sfázovaný signál snímaný  $m$ -tým mikrofonom v čase  $t$
- $x_c(t)$  časově spojitá funkce realizace zlomkového zpoždění
- $x_m(t)$  signál snímaný  $m$ -tým mikrofonom v čase  $t$
- $y_{a,m}(t)$  sfázovaný výstupní signál  $m$ -tého mikrofonu v čase  $t$
- $y_m(t)$  výstupní signál  $m$ -tého mikrofonu v čase  $t$
- $z$  vzdálenost zdroje od mikrofonního pole

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>71</b>
<b>B</b>	<b>Spouštění vytvořených funkcí</b>	<b>72</b>
B.1	MATLAB . . . . .	72
B.2	C . . . . .	73

# A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

## ADRESÁŘ

- **C** – obsahuje adresář projektu `beamformer` (*Visual Studio 2010*) a projektu `simpleAsioHost` (*Visual Studio 2008*)
- **Databáze praktických experimentů** – obsahuje databázi nahrávek s příslušnými výslednými mapami a fotografiemi konstrukcí polí, rozdělenou podle typu použitého pole, zdroje hluku a pozice zdroje
- **Diplomová práce** – obsahuje soubor `DiplomovaPrace.pdf` s textem diplomové práce
- **MATLAB** – obsahuje soubory skriptů a funkcí použitých při vypracování diplomové práce

## B SPOUŠTĚNÍ VYTVOŘENÝCH FUNKCÍ

### B.1 MATLAB

- `beamformer_2D.m` – skript realizující algoritmus DAS beamformeru; Je třeba nastavit parametry mikrofonního pole na začátku skriptu a zpracovávané signály mít ve stejném adresáři jako tento soubor. Poté stačí skript spustit.
- `beamformer_poleA.m` – skript realizující algoritmus DAS beamformeru; Parametry mikrofonního pole jsou nastaveny podle konfigurace pole A (obrázek 5.3a), zpracovávané signály musí být ve stejném adresáři jako tento soubor. Poté stačí skript spustit.
- `beamformer_poleB_1.m` – skript realizující algoritmus DAS beamformeru; Parametry mikrofonního pole jsou nastaveny podle konfigurace pole B.1 (obrázek 5.3b-vlevo), zpracovávané signály musí být ve stejném adresáři jako tento soubor. Poté stačí skript spustit.
- `beamformer_poleB_2.m` – skript realizující algoritmus DAS beamformeru; Parametry mikrofonního pole jsou nastaveny podle konfigurace pole B.2 (obrázek 5.3b-vpravo), zpracovávané signály musí být ve stejném adresáři jako tento soubor. Poté stačí skript spustit.
- `beamformer_poleC.m` – skript realizující algoritmus DAS beamformeru; Parametry mikrofonního pole jsou nastaveny podle konfigurace pole C (obrázek 5.3c), zpracovávané signály musí být ve stejném adresáři jako tento soubor. Poté stačí skript spustit.
- `beamformer_poleD.m` – skript realizující algoritmus DAS beamformeru; Parametry mikrofonního pole jsou nastaveny podle konfigurace pole D (obrázek 5.3d), zpracovávané signály musí být ve stejném adresáři jako tento soubor. Poté stačí skript spustit.
- `beamformer_poleE.m` – skript realizující algoritmus DAS beamformeru; Parametry mikrofonního pole jsou nastaveny podle konfigurace pole E (obrázek 5.3e), zpracovávané signály musí být ve stejném adresáři jako tento soubor. Poté stačí skript spustit.
- `beamformer_poleF.m` – skript realizující algoritmus DAS beamformeru; Parametry mikrofonního pole jsou nastaveny podle konfigurace pole F (obrázek 5.3f), zpracovávané signály musí být ve stejném adresáři jako tento soubor. Poté stačí skript spustit.
- `beampattern.m` – skript pro vykreslování přijímací charakteristiky; Je třeba nastavit parametry pole na začátku skriptu, poté stačí skript spustit.
- `pardp1.m` – funkce vracející koeficienty přenosové funkce parametrického filtru

typu dolní propust; Funkce je volána pomocí příkazu `[b, a]=pardp1(fm, Fvz)`, kde vstupní parametry jsou mezní kmitočet filtru a hodnota vzorkovacího kmitočtu.

- `preprocessing.m` – funkce realizující zkrácení vstupních signálů beamformeru na požadovaný počet vzorků a vykreslení časového průběhu, spektrogramu a modulové kmitočtové charakteristiky použité antialiasingové DP; Funkce je volána ve skriptech realizujících beamforming. Její vstupní hodnotou je počet kanálů mikrofonního pole. Na začátku funkce se nastavuje mezní kmitočet antialiasingové DP. Funkci je možné odkomentováním příslušných řádků upravit tak, aby navíc generovala do souboru hodnoty vzorků jednotlivých vstupních signálů.
- `uhelZdroje.m` – skript pro pomocné výpočty prostorových poměrů při realizaci experimentů v bezdozvukové komoře.
- `vypocetFmax.m` – skript pro výpočet hraničního kmitočtu prostorového aliasingu při konkrétní rozteči mikrofonů.
- `vystrihnuti_signalu.m` – pomocný skript pro vystřihnutí konkrétních úseků ze signálů nasnímaných mikrofony podle parametrů zadaných na začátku skriptu.

## B.2 C

- `beamformer` – konzolová aplikace, která realizuje algoritmus DAS beamformingu; Projekt je vytvořen v prostředí *VS2010* s použitím knihoven *OpenCV*. Lze ho otevřít poklepaním na soubor `\C\beamformer\beamformer.sln`. Samotnou aplikaci je možné spustit pomocí souboru `beamformer.exe`. Vstupní signály beamformeru jsou uloženy v souboru `signals.cpp` jako jednotlivá pole obsahující vzorky příslušných kanálů. Parametry použitého mikrofonního pole se nastavují na začátku hlavičkového souboru `funkce.h`. Po spuštění dojde k vykreslení mapy rozložení akustické energie ve snímaném prostoru.
- `simpleAsioHost` – aplikace win32, která pomocí ASIO driveru načítá data z multikanálové zvukové karty, do které byl doimplementován algoritmus DAS beamformingu; Projekt je vytvořen v prostředí *VS2008* s použitím knihoven *OpenCV*. Lze ho otevřít poklepaním na soubor `\C\simpleAsioHost\host\sample\simpleAsioHost.sln`. Samotnou aplikaci je potom možné spustit pomocí souboru `simpleAsioHost.exe`. Parametry použitého mikrofonního pole se nastavují na začátku hlavičkového souboru `funkce.h`. Po spuštění aplikace se zobrazí okno s lištou v horní části, která obsahuje menu **ASIO**. V tomto menu položka **Start** spouští načítání dat ze zvukové karty. Po započetí

načítání dat je možné zvolit položku menu **Zobraz**, která vždy po stisku zajistí vykreslení mapy rozložení akustické energie pomocí beamformingu z aktuálně načtených dat. Načítání dat se zastavuje položkou **Stop**. Položka **Setup** umožňuje nastavovat parametry ASIO ovladače. Ostatní položky mají zřejmý význam.