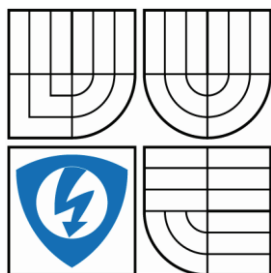




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# LOKALIZACE VZDÁLENÉHO ZDROJE ZVUKU POLEM MIKROFONŮ

LOCALIZATION OF FAR SOURCE OF SOUND BY MICROPHONE ARRAY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

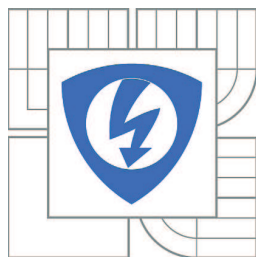
AUTHOR

JOSEF TKADLEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, PhD



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Automatizační a měřicí technika**

**Student:** Josef Tkadlec

**ID:** 115295

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Lokalizace vzdáleného zdroje zvuku polem mikrofونů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se s možnostmi použití MEMS mikrofونů pro měřicí aplikace a způsoby zpracování akustických signálů z mikrofونů. Dále se seznamte s metodami pro lokalizaci zdrojů zvuku ve vzdáleném poli (beamforming, akustická kamera) a používanými měřicími systémy (mikrofonními poli).
- 2) Zpracujte přehled metod pro lokalizaci zdroje zvuku ve vzdáleném poli a simulačně ověřte vlastnosti vybraných metod (možnosti tvarování přijímací charakteristiky).
- 3) Navrhněte měřicí systém (mikrofonní pole) s minimálně 4 mikrofony pro lokalizaci vzdáleného zdroje zvuku zvolenou metodou. Předpokládá se využití MEMS mikrofونů jako snímacích elementů.
- 4) Prakticky realizujte měřicí systém včetně softwarového zpracování (implementace zvolené výpočetní metody), který bude lokalizovat zdroj zvuku ve vzdáleném poli a funkčnost prakticky ověřte. Předpokládá se využití měřicí karty National Instruments NI 9234 a programování v LabVIEW.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Brandstein, M., Ward, D. Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications. 416 stran. Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3642075476.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 30.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

Cílem bakalářské práce je popis metod lokalizace zdroje zvuku ve vzdáleném poli maticí mikrofónů a to hlavně pomocí metody tvarování přijímací charakteristiky. Dále jsou zde uvedeny simulace a naprogramování měřicího systému pro lokalizaci zdroje zvuku metodou tvarování přijímací charakteristiky. Z těchto simulací a měření jsou zde také vyvozeny závěry.

## **Klíčová slova**

Lokalizace zvuku, tvarování přijímací charakteristiky, DAS tvarovač, mikrofonní pole

## **Abstract**

The aim of bachelor thesis is to describe techniques that are used for localization source of sound in far field by microphone array, mainly by method called beamforming. This thesis contains also simulation and practical test of beamforming method. There are also results of this simulations and measurement.

## **Keywords**

Sound localization, beamforming, DAS beamformer, microphone array.

### **Bibliografická citace:**

TKADLEC, J. Lokalizace vzdáleného zdroje zvuku polem mikrofonů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 39s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Zdeněk Havránek, PhD.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou (*bakalářskou*) práci na téma Lokalizace vzdáleného zdroje zvuku polem mikrofonů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (*bakalářské*) 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 (*bakalářské*) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (*bakalářské*) 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **25. května 2011**

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové (*bakalářské*) práce Ing. Zdeňku Havránkovi, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **25. května 2011**

.....

podpis autora

# Obsah

1	Teoretický úvod.....	11
1.1	Podmínky a zjednodušení .....	11
1.2	Mikrofonní pole .....	11
1.3	Metody pro určení směru příchodu signálu.....	12
1.3.1	Spektrální odhad vysokého rozlišení.....	13
1.3.2	Odhad časových zpoždění.....	13
1.3.3	Metoda tvarování přijímací charakteristiky .....	14
1.3.4	Tvarování přijímací charakteristiky .....	15
1.3.5	Tvarovač typu Delay and Sum .....	15
1.4	MEMS mikrofony .....	16
2	simulace.....	17
2.1	Simulace ULA.....	17
2.2	Simulace rovinného mikrofonního pole.....	21
2.2.1	Uspořádání mikrofonního pole.....	22
2.2.2	Kruhové pole.....	23
2.2.3	Čtvercové pole .....	24
2.2.4	MSE kruhového pole.....	25
3	Měření .....	27
3.1	Měřicí karta NI 9234.....	27
3.2	Systém pro měření s MEMS mikrofony .....	29
3.3	Výsledky měření .....	30
4	Závěr.....	34
	Literatura.....	35
	Seznam zkratk a veličin.....	36
	Seznam příloh .....	37

## Seznam obrázků

Obr. 1-1 Uniformní lineární pole [5].....	11
Obr. 1-2 Závislost koeficientu křížové korelace na zpoždění signálů [4].....	14
Obr. 1-3 Směrová charakteristika mikrofonního pole.....	15
Obr. 1-4 Delay and Sum tvarovač [6] .....	16
Obr. 1-5 MEMS mikrofon .....	17
Obr. 2-1 Model DAS.....	18
Obr. 2-2 Směrová charakteristika, $d=3\text{cm}$ .....	19
Obr. 2-3 Směrová charakteristika, $d=5\text{cm}$ .....	19
Obr. 2-4 Směrová charakteristika, $d=10\text{cm}$ .....	19
Obr. 2-5 Směrová charakteristika $d=15\text{cm}$ .....	19
Obr. 2-6 Směrová charakteristika, 2 mikrofony.....	20
Obr. 2-7 Směrová charakteristika, 3 mikrofony.....	20
Obr. 2-8 Směrová charakteristika, 4 mikrofony.....	20
Obr. 2-9 Směrová frekvenční charakteristika do 5 kHz.....	21
Obr. 2-10 Směrová frekvenční charakteristika do 10kHz.....	21
Obr. 2-11 Rovinné mikrofonní pole se 4 mikrofony.....	22
Obr. 2-12 Čtvercové mikrofonní pole.....	23
Obr. 2-13 Kruhové mikrofonní pole .....	23
Obr. 2-14 Náhodné čtvercové pole .....	23
Obr. 2-15 Náhodné kruhové pole.....	23
Obr. 2-16 Směrová charakteristika kruhového pole.....	24
Obr. 2-17 Směrová charakteristika náhodného kruhového pole .....	24
Obr. 2-18 Směrová charakteristika čtvercového pole .....	24
Obr. 2-19 Směrová charakteristika náhodného čtvercového pole.....	24
Obr. 2-20 MSE pro různý počet mikrofonů .....	25
Obr. 2-21 MSE pro různé průměry kružnic mikrofonního pole.....	26
Obr. 2-22 MSE 0,5m.....	26
Obr. 2-23 MSE 1m.....	26
Obr. 2-24 MSE 2m.....	27
Obr. 2-25 MSE 5m.....	27
Obr. 3-1 Vnitřní zapojení SP0103N [3] .....	28
Obr. 3-2 Mikrofon Knowles SP0103N .....	28
Obr. 3-3 Měřicí karta NI 9234 .....	28



Obr. 3-4 Odvod s SP0103N .....	29
Obr. 3-5 Obvod pro připojení k měřicí kartě .....	29
Obr. 3-6 Reálné mikrofonní pole .....	30
Obr. 3-7 Kalibrace mikrofonního pole.....	31
Obr. 3-8 Mic. pole 0,5x0,5m-2m 1kHz.....	31
Obr. 3-9 Mic. pole 0,5x0,5m-2m 2kHz.....	31
Obr. 3-10 Mic. pole 0,5x0,5m-2m 5kHz.....	32
Obr. 3-11 Mic. pole 0,1x0,1-2m 1kHz.....	32
Obr. 3-12 Mic. pole 0,3x0,3-2m 1kHz.....	32
Obr. 3-13 Mic. pole 0,5x0,5-2m 1kHz.....	32
Obr. 3-14 Mic. pole 0,3x0,3 - 1m 1kHz.....	33
Obr. 3-15 Mic. pole 0,3x0,3 - 1,5m 1kHz.....	33
Obr. 3-16 Mic. pole 0,3x0,3 - 2m 1kHz.....	33

# Úvod

Lokalizace zdroje zvuku nachází široké uplatnění všude, kde je potřeba určit pozici zdroje hluku a jeho charakter, například v automobilovém průmyslu, určení pozice řečníka, radarové technice atd. K lokalizaci je zapotřebí mikrofonní pole a metoda naprogramovaná v nějaké výpočetní jednotce, která zpracovává signály z jednotlivých mikrofonů. V práci jsou popsány některé z těchto metod se zaměřením na metodu tvarování přijímací charakteristiky. Tato metoda je zde podrobně rozebrána a jsou zde uvedeny výsledky simulace pro různé nastavení mikrofonního pole a lokalizovaného signálu v prostředí Matlab.

V praktické části je ověřena funkčnost metody v reálném prostředí s použitím karty NI 9234 a prostředí LabVIEW. Pro tento účel měření bylo sestrojeno mikrofonní pole z hliníkových profilů a mikrofonů Knowles SP0103N

# 1 TEORETICKÝ ÚVOD

## 1.1 Podmínky a zjednodušení

Nejdříve je na místě stanovit několik zjednodušení, které ulehčí danou problematiku.

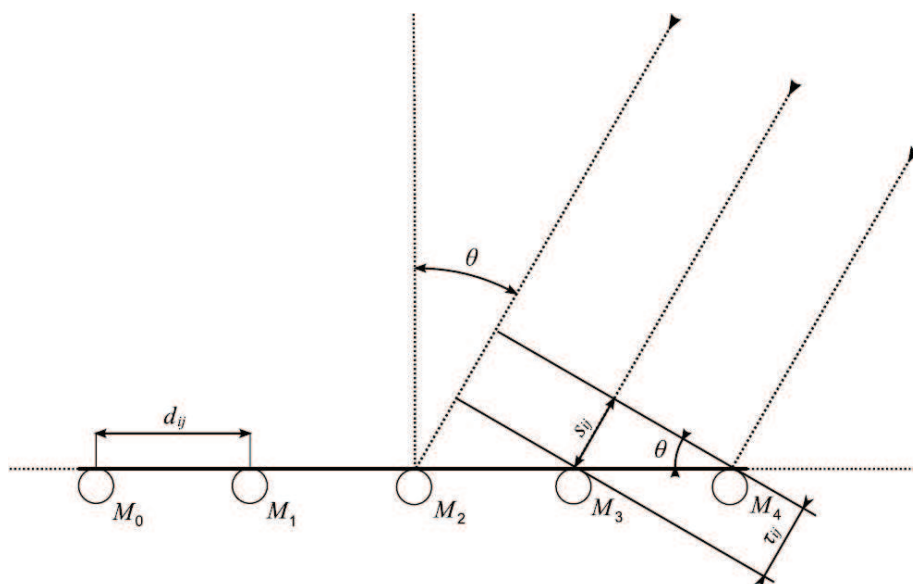
Při lokalizaci zvuku předpokládám, že zdroj zvuku je od mikrofonního pole dostatečně vzdálen (mnohokrát více než je vlnová délka zpracovávaného signálu), potom na mikrofonní pole dopadá rovinná vlna. Zvuk se šíří homogenním prostředím, proto je jeho rychlost ke všem mikrofonům stejná. Zanedbávám útlum zvuku vlivem šíření prostředím. Zdroj zvuku je statický, tzn. během měření se vůči mikrofonnímu poli nepohybuje a je umístěn před mikrofonním polem.

## 1.2 Mikrofonní pole

Z konstrukčního hlediska rozeznáváme 3 typy mikrofonních polí:

- Lineární pole
- Rovinné pole
- Prostorové pole

Pro jednoduchost bude celá problematika vysvětlena na lineárním poli, které je navíc uniformní (vzdálenost mezi sousedními mikrofony je stejná). V literatuře se toto pole označuje zkratkou ULA - uniform linear array (viz. **Obr. 1-1 Uniformní lineární pole**).



Obr. 1-1 Uniformní lineární pole [5]

Všechny mikrofony jsou od sebe posunuty o vzdálenost  $d_{ij}$ . Definujeme úhel, pod kterým přichází signál k mikrofonnímu poli jako direction of arrival (v literatuře

označováno: DOA). Jako referenční DOA bereme úhel  $0^\circ$  (kolmý na mikrofonní pole). Úhly pootočené ve směru hodinových ručiček oproti referenčnímu úhlu jsou kladné a úhly pootočené proti směru hodinových ručiček jsou záporné.

Signál přichází k mikrofonnímu poli pod úhlem  $\theta$ . K mikrofonu  $M_4$  dorazí jako první. K dalšímu mikrofonu ( $M_3$ ) musí vlna signálu urazit ještě navíc vzdálenost

$$s = d * \sin \theta,$$

což jí trvá

$$\tau = \frac{s}{v},$$

kde  $v$  je rychlost zvuku  $v = 343$  m/s. Z toho vyplývá, že signál z mikrofonu  $M_3$  je stejný jako signál z mikrofonu  $M_4$ , ale časově zpožděný o

$$\tau = \frac{d * \sin \theta}{v}.$$

Pokud jako referenční bereme mikrofon  $M_0$  a úhel je  $\theta$  kladný, potom je zpoždění  $\tau$  záporné a naopak. Pro všechny mikrofony pak můžeme psát, že časové zpoždění signálu z  $i$ -tého mikrofonu je

$$\tau_i = \frac{i * d * \sin \theta}{v}.$$

Na mikrofonní pole může vlna přicházet zepředu nebo zezadu pod stejným úhlem  $\theta$ . V tomto případě nemůžeme rozeznat, jestli se zdroj zvuku nachází před nebo za mikrofonním polem. Hovoříme o tzv. předozadní nejednoznačnosti. V mém případě budu uvažovat příchod signálu k mikrofonnímu poli pouze zepředu ( $-90^\circ < \theta < +90^\circ$ ).

Pokud signál přichází k mikrofonnímu poli pod úhlem  $+90^\circ$  nebo  $-90^\circ$  (v ose mikrofonů) je časové zpoždění signálu maximální. Pokud by fázové zpoždění signálu dosáhlo hodnoty  $\pi$ , signály by byli v protifázi a pokud bychom je sečetli (princip tvarovače DAS, bude vysvětleno později) výsledek by byl nulový a došlo by k nejednoznačnosti určení zdroje zvuku (stejný výsledek pro  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ). Z předchozí úvahy vyplývá, že vzdálenost mezi sousedními mikrofony musí být menší než polovina nejmenší vlnové délky složky zpracovávaného signálu. [1][2]

$$d < \frac{\lambda_{min}}{2}$$

Ze vzorce  $\lambda * f = v$  vyplývá pro maximální frekvenci zpracovávaného signálu:

$$f_{max} < \frac{v}{2 * d}$$

Tento jev se v literatuře označuje jako prostorový aliasing.

### 1.3 Metody pro určení směru příchodu signálu

V této části jsou popsány metody pro zpracování signálů z mikrofonního pole, které se používají k lokalizaci zdroje zvuku. Mezi ně patří:

- Spektrální odhad vysokého rozlišení
- Odhad časových zpoždění
- Tvarování přijímací charakteristiky

### 1.3.1 Spektrální odhad vysokého rozlišení

Tyto metody využívají spektrální analýzu vysokého rozlišení (High Resolution Spectral Estimation Based). Mezi tyto metody patří např. spektrální odhad minimálního rozptylu (MV – Minimum Variance), autoregresivní modelování (AR – autoregressive modeling) a nejpoužívanější metoda vícenásobné klasifikace signálu (MUSIC – Multiple Signal Classification). MV a MUSIC se dají použít pro vzdálené i blízké zdroje, ale metoda AR se dá použít jen pro vzdálené zdroje. Těmito metodami můžeme lokalizovat i více zdrojů současně. Výhodou oproti metodě tvarování přijímací charakteristiky je lepší přesnost lokalizace dvou zdrojů umístěných blízko sebe, kdy odezva vykazuje ostřejší špičky a navíc u metody tvarování přijímací charakteristiky se tyto zdroje mohou jevit jako jeden.[7]

Většina vyvinutých technik je určena pro aplikace pracující s úzkopásmovými signály. Pro širokopásmové signály není tato metoda příliš vhodná z důvodu vyšších výpočetních nároků. Často se však uplatňuje při odhadu spektra a ostatních parametrů náhodných signálů. Tato metoda se nehodí pro zpracování řeči (je širokopásmová) je však vhodná a využívá se u radarové lokalizace.[5]

### 1.3.2 Odhad časových zpoždění

Jedná se o metodu, která je v praxi hodně využívána, protože je jednoduchá a nenáročná na výpočetní výkon. V literatuře se označuje jako dvoukroková metoda, protože určení polohy zdroje zvuku se děje ve dvou krocích.

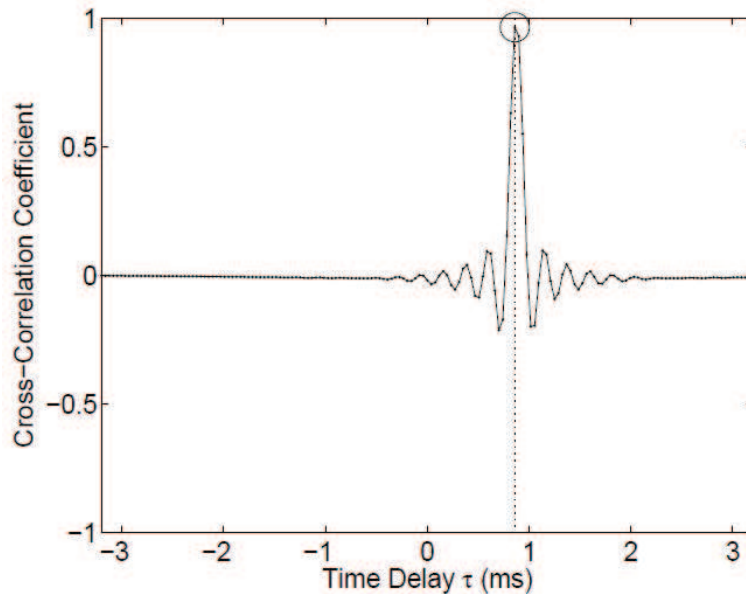
V prvním kroku se odhadují časová zpoždění signálů ze dvou sousedních mikrofonů např. pomocí křížové korelace, která dává informaci o tom, jak moc jsou si dva signály podobné. Křížová korelace dvou signálů ( $r_a$  a  $r_b$ ) se počítá následovně:

$$R_{ab}(t, \tau) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} r_a(u) * r_b(u + \tau) du,$$

kde  $T$  je časové okno, ve kterém analyzujeme signál,  $t$  je střed časového okna a  $\tau$  je časové zpoždění mezi signály. Pro posouzení podobnosti signálů se používá normovaný koeficient křížové korelace, který je definován následovně:

$$\rho_{ab}(\tau) = \frac{R_{ab}(\tau)}{\sqrt{R_{aa}(0)R_{bb}(0)}}$$

kde  $R_{aa}$  a  $R_{bb}$  jsou autokorelace signálů s časovým zpožděním 0. Koeficient křížové korelace je potom v intervalu  $\langle -1; 1 \rangle$  a jeho závislost na vzájemném časovém posunutí  $\tau$  je na **Obr. 1-2 Závislost koeficientu křížové korelace na zpoždění signálů**. Z grafu je vidět, že čím jsou signály vůči sobě méně posunuté (více podobné), tím je koeficient křížové korelace větší. Koeficient křížové korelace stejných signálů je 1.



Obr. 1-2 Závislost koeficientu křížové korelace na zpoždění signálů [4]

V druhém kroku je z odhadnutého časového zpoždění signálu a známé geometrie pole vypočtena poloha zdroje zvuku. Tato metoda je velmi efektivní a nenáročná na výpočetní výkon, protože se nezkoumá odezva mikrofonního pole pro různé úhly a možné polohy zdroje (viz. **Metoda tvarování přijímací charakteristiky**). Nevýhodou této metody je nemožnost lokalizovat více než jeden zdroj zvuku a také velká náchylnost na dozvuk.[4]

### 1.3.3 Metoda tvarování přijímací charakteristiky

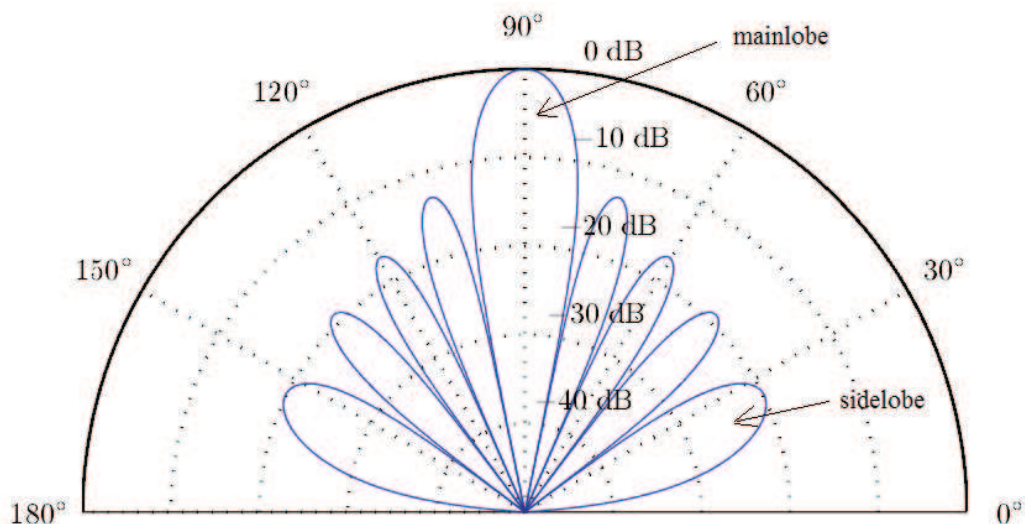
Další metodou pro určení DOA je metoda tvarování přijímací charakteristiky. Pomocí této metody jsme schopni rozpoznat i více zdrojů zvuku v zorném poli mikrofonního pole. Nevýhodou této metody je však náročnost a s ní spojená doba výpočtu, proto tato metoda není vhodná k analýze pohybujících se zdrojů zvuku. Zařízení, které určuje polohu zdroje zvuku, se nazývá tvarovač (anglicky beamformer).

Proces tvarování přijímací charakteristiky můžeme rozdělit na dva podprocesy: synchronizaci a váhování + sumaci.

Synchronizace má za úkol zpozdřit signály z jednotlivých mikrofonů o určitý čas, tak aby byl systém zaostřen právě do jednoho zkoumaného bodu LD (look direction). Mluvíme o vnučování směru pohledu tvarovači. Pokud zvuk přichází z LD, jsou signály z jednotlivých mikrofonů zarovnané tak, že vůči sobě nejsou posunuty, proto pro signál přicházející z LD by měl tvarovač vykazovat co největší zisk a signály z ostatních směrů potlačovat.

Proces váhování a sumace má za úkol, přidělit váhy signálům z jednotlivých mikrofonů a sečíst tyto váhované signály. Váhy jednotlivých signálů se obvykle nastavují na 1 nebo  $1/N$ , kde  $N$  je počet mikrofonů, aby byla odezva tvarovače v intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . Tento proces má vliv na šířku hlavní smyčky (mainlobe) a

postranních smyček (sidelobes) na směrové charakteristice mikrofonního pole (viz. **Obr. 1-3 Směrová charakteristika mikrofonního pole**), kde je LD  $90^\circ$ . K tvorbě postranních smyček dochází z důvodu překročení mezní frekvence  $f_{\max}$ . [1]



Obr. 1-3 Směrová charakteristika mikrofonního pole [1]

### 1.3.4 Tvarování přijímací charakteristiky

Předpokládáme pole s  $N$  mikrofony. Každý mikrofon představuje určité zpoždění a zeslabení signálu vůči referenčnímu mikrofonu. Výstupy mikrofonů 1 až  $N$  v diskretním čase  $k$  jsou:

$$y_n(k) = a_n s[k - t - F_n(\tau)] + v_n(k)$$

kde  $n$  je číslo mikrofonu ( $n=1,2,3,\dots,N$ ),  $a$  je činitel zeslabení (0 až 1),  $s(k)$  je signál přicházející ze zdroje zvuku, který může být úzkopásmový nebo širokopásmový,  $t$  je čas, za který dorazí signál od svého zdroje k prvnímu mikrofonu,  $v_n(k)$  je rušení, které se na signál naváže, než dorazí k poslednímu mikrofonu,  $\tau$  je časové zpoždění signálu mezi sousedními mikrofony [v literatuře označováno jako time difference of arrival (TDOA)] a  $F_n(\tau)$  je zpoždění signálu na  $n$ -tém mikrofonu vůči prvnímu mikrofonu. Pokud se jedná o ULA potom: [1]

$$F_n(\tau) = (n - 1)\tau$$

### 1.3.5 Tvarovač typu Delay and Sum

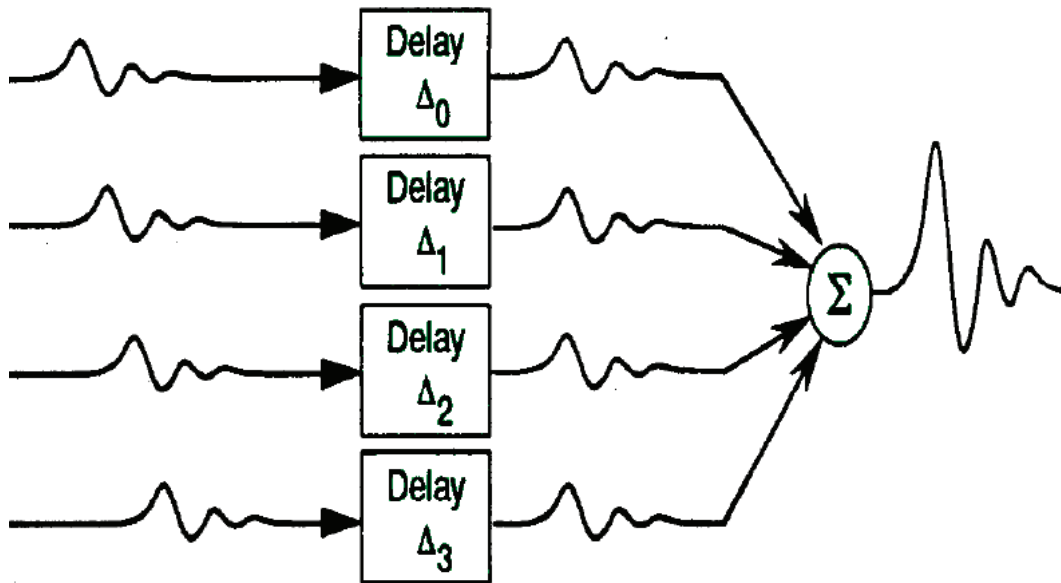
Jedná se o nejjednodušší tvarovač, jehož blokové zapojení je na **Obr. 1-4 Delay and Sum tvarovač**. V prvním kroku časově posuneme signály z mikrofonů o námi vypočítanou hodnotu. Tím určíme LD tvarovače signálu.

$$y_{a,n}(k) = y_n[k + F_n(\tau)]$$

Ve druhém kroku sečteme časově posunuté signály, což nám dá výstup tvarovače:

$$z_{DS}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_{a,n}(k)$$

Tyto dva kroky opakujeme pro každý, námi zvolený LD. Tímto postupem můžeme projít celé zorné pole tvarovače.[1]



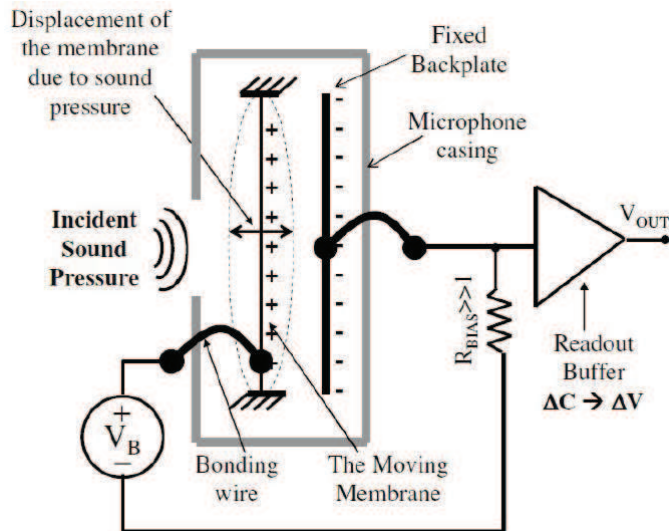
Obr. 1-4 Delay and Sum tvarovač [6]

## 1.4 MEMS mikrofony

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) je technologie pro výrobu mikroskopických elektronických součástek, které jsou zhotoveny na bázi křemíku a ke své výrobě využívají stejných technologií jako při výrobě integrovaných obvodů (např.: CMOS). Touto technologií je možné vytvořit senzory (rychlosti, zrychlení, síly, atd) i akční členy (miniaturní motory). Tato technologie je výhodná nejen díky miniaturizaci zařízení, ale také ceně, protože při výrobě dalších, již navržených a otestovaných součástek jsou náklady zanedbatelné.

Princip MEMS mikrofonu je na **Obr. 1-5 MEMS mikrofon**. Při šíření zvuku se mění akustický tlak, který rozkmitá pohyblivou membránu. Tato membrána spolu s pevnou zadní deskou tvoří kondenzátor. Při pohybu membrány se mění vzdálenost mezi elektrodami kondenzátoru a tím jeho kapacita. Změna kapacity způsobuje změnu napětí  $U=Q/C$ , které se pak dále zpracovává. [10]





Obr. 1-5 MEMS mikrofon [9]

## 2 SIMULACE

S tvarovačem DAS jsem udělal několik simulací. Váhy signálů z jednotlivých mikrofonů jsem nastavil stejně (na hodnotu 1) a nepředpokládal jsem žádný útlum při šíření signálu. Zdrojem signálu byl sinusový průběh s amplitudou 1, nulovou stejnosměrnou složkou a nulovým fázovým posuvem.

### 2.1 Simulace ULA

Nejdříve jsem simuloval pole s dvěma mikrofony, jejichž vzdálenost jsem nastavoval na 3, 5, 10 a 15 cm. Před vlastní simulací je nutné provést několik úvah a výpočtů. Zaprvé jakou může mít signál největší frekvenci, aby nedošlo k nejednoznačnosti určení polohy zdroje zvuku. Vzdálenost mezi mikrofony nesmí být větší než polovina vlnové délky signálu. Z toho vyplývá:

a) 3cm

$$\lambda_{min} = 0,06\text{m} \Rightarrow f_{max} = \frac{v}{\lambda_{min}} = \frac{343}{0,06} = 5716\text{Hz}$$

b) 5cm

$$\lambda_{min} = 0,1\text{m} \Rightarrow f_{max} = \frac{v}{\lambda_{min}} = \frac{343}{0,1} = 3430\text{Hz}$$

c) 10cm

$$\lambda_{min} = 0,2\text{m} \Rightarrow f_{max} = \frac{v}{\lambda_{min}} = \frac{343}{0,2} = 1715\text{Hz}$$

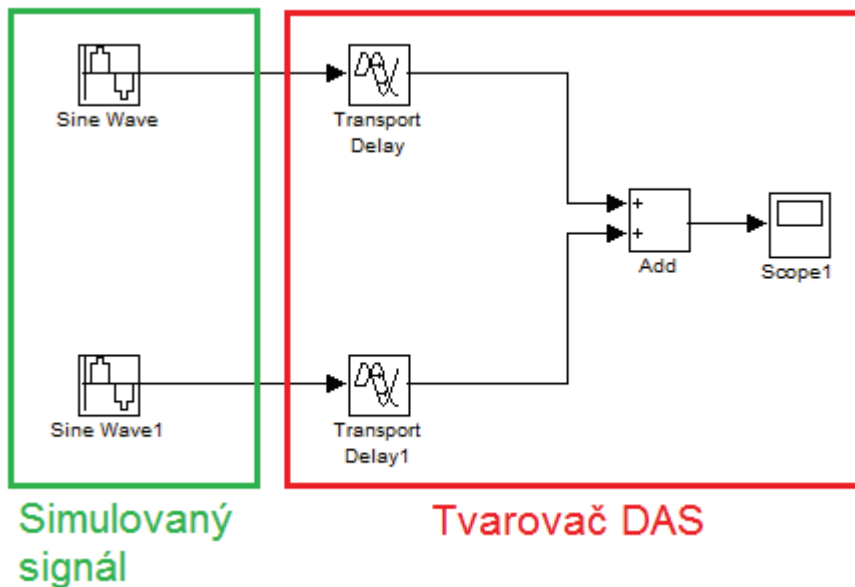
d) 15cm

$$\lambda_{min} = 0,3\text{m} \Rightarrow f_{max} = \frac{v}{\lambda_{min}} = \frac{343}{0,3} = 1143\text{Hz}$$

Pro simulaci jsem použil sinusový signál o frekvenci 1,7kHz.

Dále si musím zvolit úhly ve stupních, pro které budu nastavovat LD. Já jsem si zvolil hodnoty  $-90^\circ$  až  $+90^\circ$  s krokem  $5^\circ$ . Každému úhlu DOA odpovídá příslušné časové zpoždění signálu TDOA.

Např. pro úhel  $\theta = 30^\circ$  ( $\pi/6$  rad) a vzdálenost  $d=0,1\text{m}$  je  $TDOA_{30} = \frac{d \cdot \sin \theta}{v} = \frac{0,1 \sin 30}{343} = 146\mu\text{s}$ . Schéma modelu s dvěma mikrofony je na **Obr. 2-1 Model DAS**.



**Obr. 2-1 Model DAS**

Model vrací přes data Scope zisk tvarovače pouze pro jedno konkrétní nastavení LD (a tím TDOA). Pro získání celé charakteristiky je zapotřebí simulaci opakovat s různými nastaveními LD. Vykreslení celé charakteristiky jsem provedl následujícím m-filem:

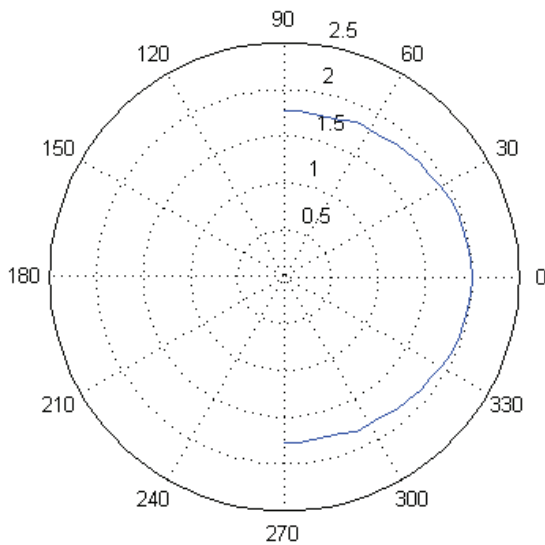
```

frek = 1700;      %vyhodnocovaná frekvence
Fi = -90:5:90;  %velikost zorného pole
hodnota = Fi;
for i=1:1:length(Fi)
    Tau=0.15*sin(Fi(i)*pi/180)/343;  %TDOA
    if(Tau<0)
        a=0;
        b=1;
    else
        a=1;
        b=0;
    end
    vystup = sim('model_DAS', 0.1);
    hodnota(i) = max(ScopeData1.signals.values);
end

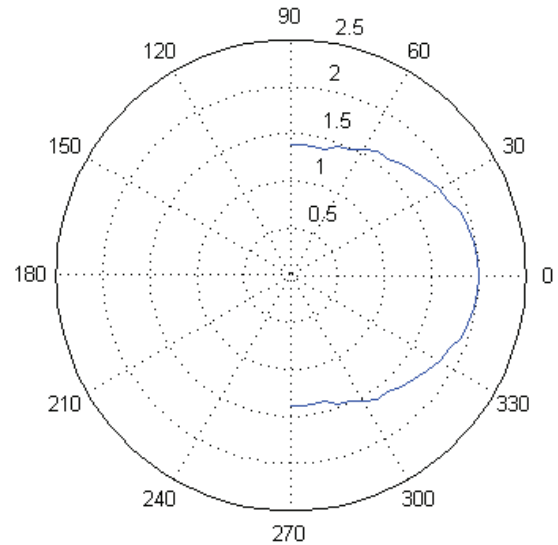
polar(Fi*pi/180,hodnota);

```

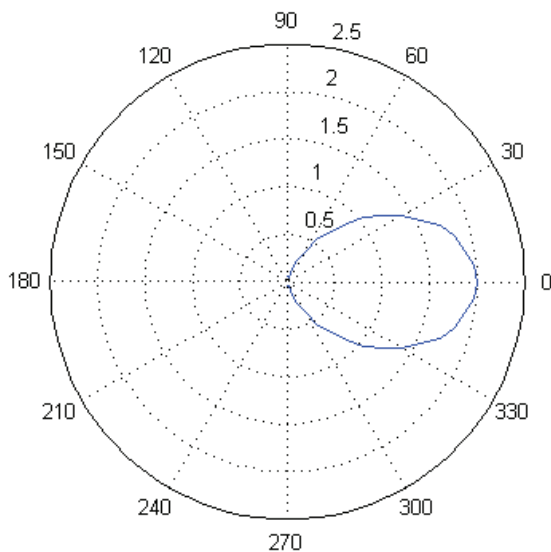
Výsledkem simulace jsou následující přijímací charakteristiky (pro 3, 5, 10 a 15cm), které vykazují velký zisk v okolí  $LD = 0^\circ$ , proto můžeme předpokládat, že se někde tímto směrem nachází zdroj zvuku.



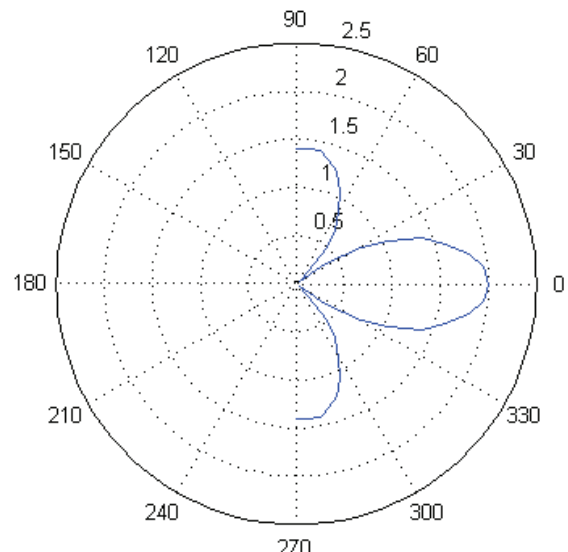
**Obr. 2-2 Směrová charakteristika,  $d=3\text{cm}$**



**Obr. 2-3 Směrová charakteristika,  $d=5\text{cm}$**



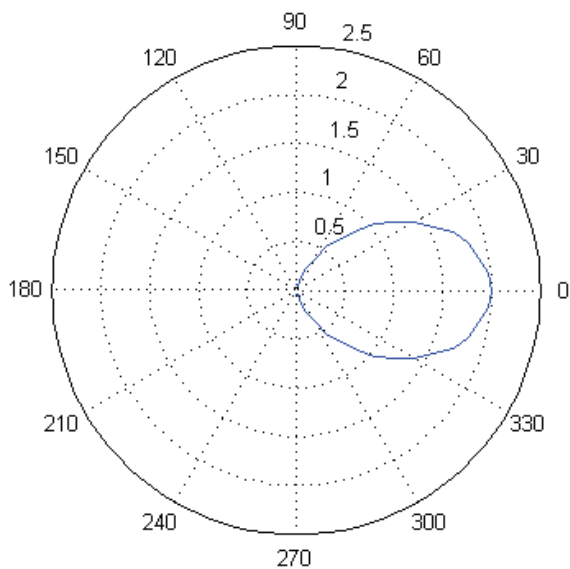
**Obr. 2-4 Směrová charakteristika,  $d=10\text{cm}$**



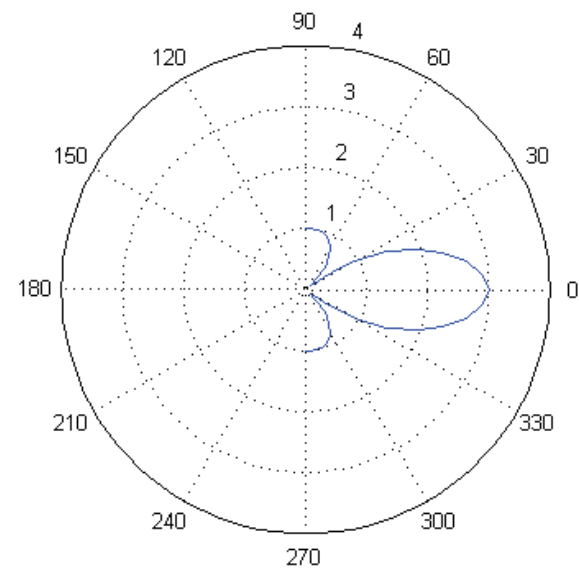
**Obr. 2-5 Směrová charakteristika  $d=15\text{cm}$**

Ze simulovaných přijímacích charakteristik můžeme usoudit, že ideální průběh má charakteristika modelu, jehož maximální frekvence, kterou zpracovává, odpovídá frekvenci zdroje signálu. Pro pole mikrofonů, jejichž vzdálenosti jsou menší, je charakteristika málo směrová (viz. **Obr. 2-2 Směrová charakteristika,  $d=3\text{cm}$** ) a pro pole mikrofonů, jejichž vzdálenosti jsou větší, dochází k vytváření postranních smyček (viz. **Obr. 2-5 Směrová charakteristika  $d=15\text{cm}$** ).

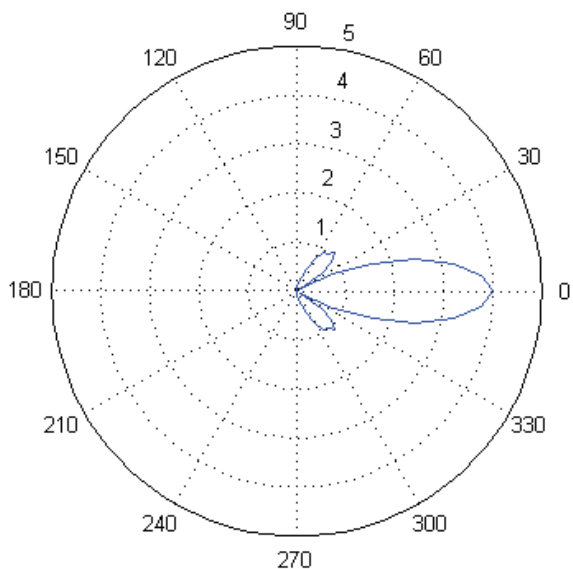
Dále jsem simuloval ULA s více mikrofony (2, 3 a 4). Váhy jsem opět nastavil u všech mikrofonů na hodnotu 1. Výsledné směrové charakteristiky:



Obr. 2-6 Směrová charakteristika, 2 mikrofony



Obr. 2-7 Směrová charakteristika, 3 mikrofony

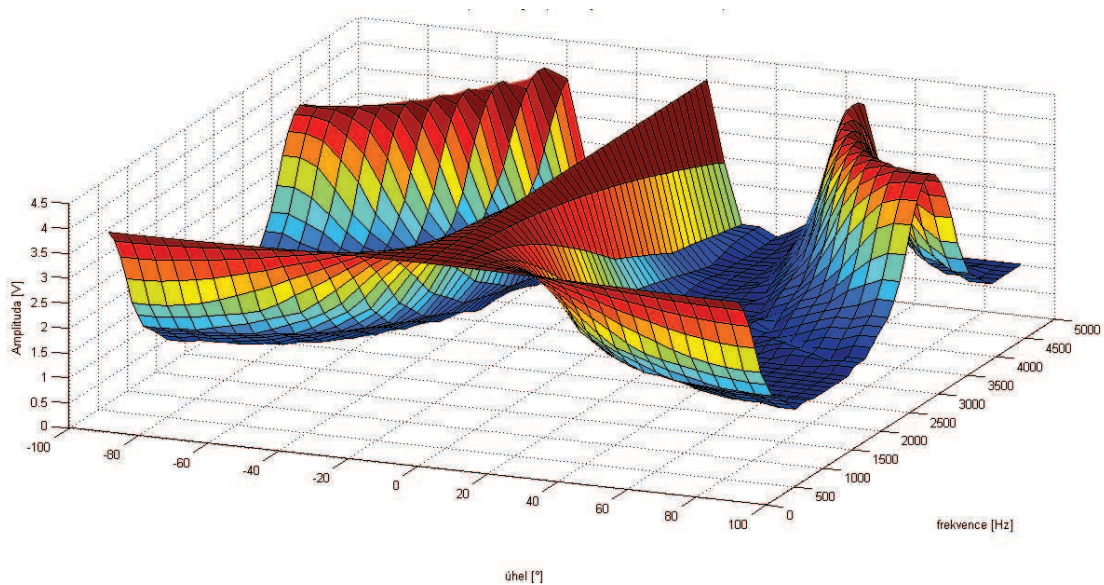


Obr. 2-8 Směrová charakteristika, 4 mikrofony

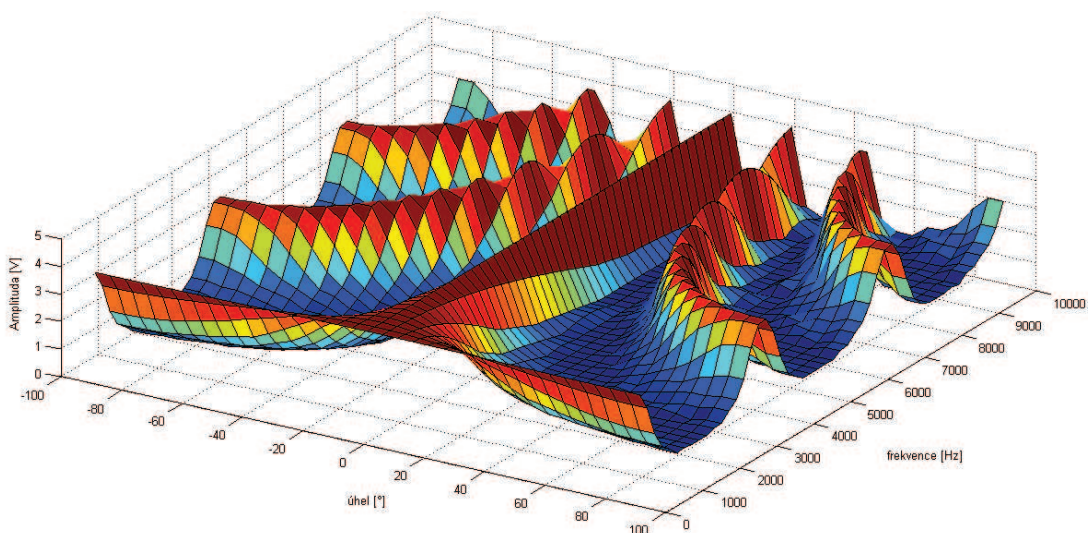
Z charakteristik **Obr. 2-6 - Obr. 2-8** vyplývá, že zvyšováním počtu mikrofonů se zužuje hlavní smyčka a tím zlepšuje přesnost určení zdroje zvuku. Rovněž se také zmenšují velikosti postranních smyček, což zmenšuje nepřesnost určení zdroje zvuku.

Dalším provedeným experimentem bylo porovnání chování mikrofonního pole při zpracování signálů o různých frekvencích. Pro tuto simulaci jsem použil pole se čtyřmi mikrofony se vzdálenostmi 10 cm mezi sebou.

Výsledkem je sít' směrových charakteristik, z níž je patrné, že se vzrůstající frekvencí signálu přibývá postranních smyček. Proto je vždy optimální volit rozměry mikrofonního pole s ohledem na zpracovávanou frekvenci a to tak, aby vzdálenost sousedních mikrofonů byla právě polovina vlnové délky zpracovávaného signálu.



Obr. 2-9 Směrová frekvenční charakteristika do 5 kHz

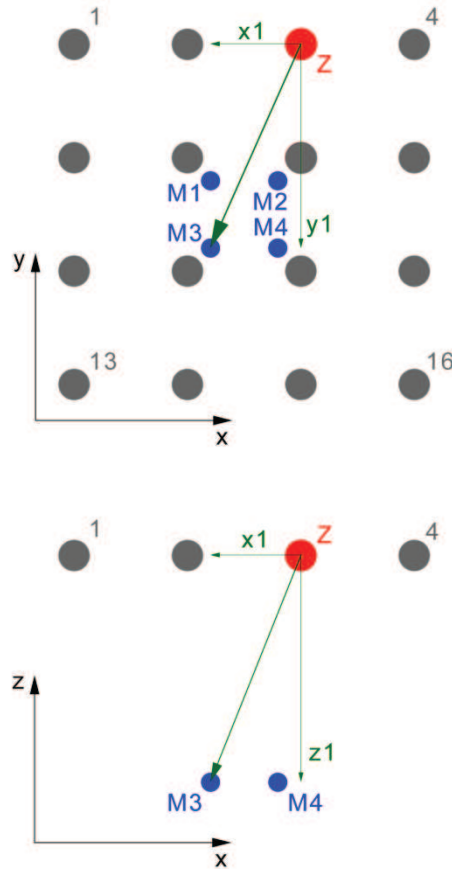


Obr. 2-10 Směrová frekvenční charakteristika do 10kHz

## 2.2 Simulace rovinného mikrofonního pole

Pro simulaci rovinného pole jsem použil rovněž Matlab, ale model tvarovače jsem napsal do m-file z důvodu snadné změny počtu mikrofonů. Rovinné mikrofonní pole se používá pro zobrazení zdroje zvuku ve vzdálené ploše. Jeho uspořádání a poloha vůči analyzované ploše je na **Obr. 2-11 Rovinné mikrofonní pole se 4 mikrofony**. Šedé body vyjadřují jednotlivé LD, červený je zdroj zvuku a modré je mikrofonní pole.

Váhy signálů jsem při těchto simulacích nastavil na  $1/N$ , kde  $N$  je počet mikrofonů, aby výsledná přijímací charakteristika byla v intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . Zdroj signálu měl frekvenci 5kHz.



Obr. 2-11 Rovinné mikrofonní pole se 4 mikrofony

Mikrofonní pole (M1-M4) je rovinné. Analyzované body (1-16) jsou rovněž umístěny v rovině. Tyto dvě roviny jsou rovnoběžné a jsou od sebe vzdáleny o  $z_1$ . Ze souřadnic  $x_1$ ,  $y_1$  a  $z_1$  je možné vypočítat vzdálenost každého bodu od mikrofonu 1, protože jejich umístění v prostoru je známé.

$$d_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} = \sqrt{(x_{M1} - x_Z)^2 + (y_{M1} - y_Z)^2 + (z_{M1} - z_Z)^2}$$

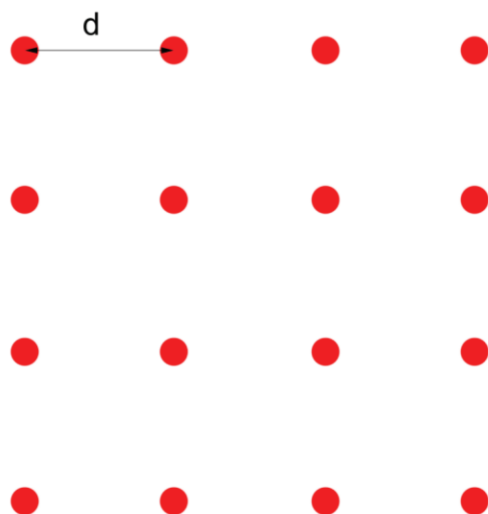
kde  $x_{M1}$ ,  $y_{M1}$ ,  $z_{M1}$  jsou absolutní souřadnice mikrofonu 1 a  $x_Z$ ,  $y_Z$ ,  $z_Z$  jsou absolutní souřadnice zdroje zvuku. Potom zpoždění signálu na mikrofonu 1 je:

$$\tau_1 = \frac{d_1}{v_z} = \frac{d_1}{343}$$

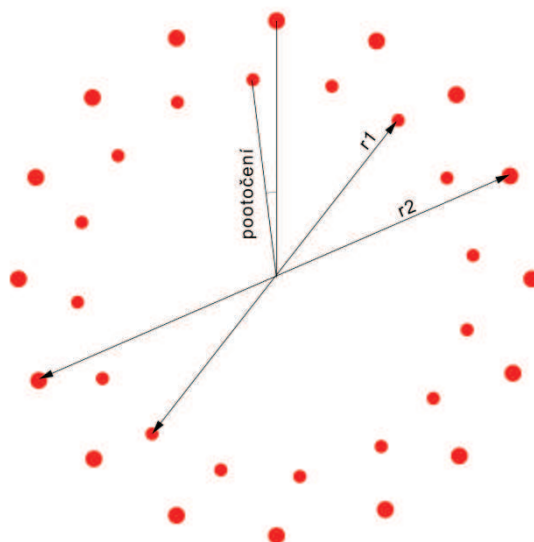
## 2.2.1 Uspořádání mikrofonního pole

Při simulacích jsem zvolil x,y polohu zdroje vždy 1;1 (ve směrových charakteristikách označeno červenou plnou tečkou). Mikrofony jsou označeny prázdnými tečkami.

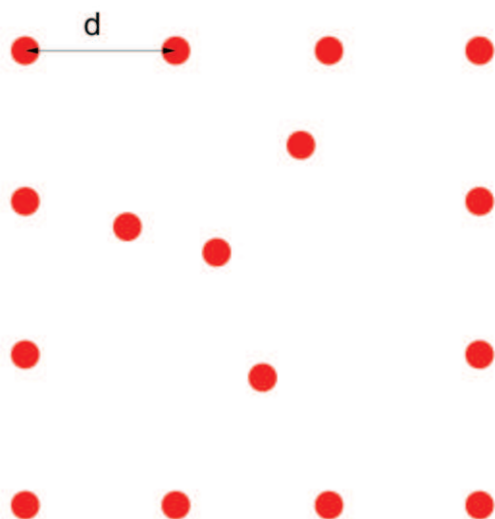
Simuloval jsem 4 uspořádání rovinných mikrofonních polí (viz. **Obr. 2-12 Čtvercové mikrofonní pole** až **Obr. 2-15 Náhodné kruhové pole**)



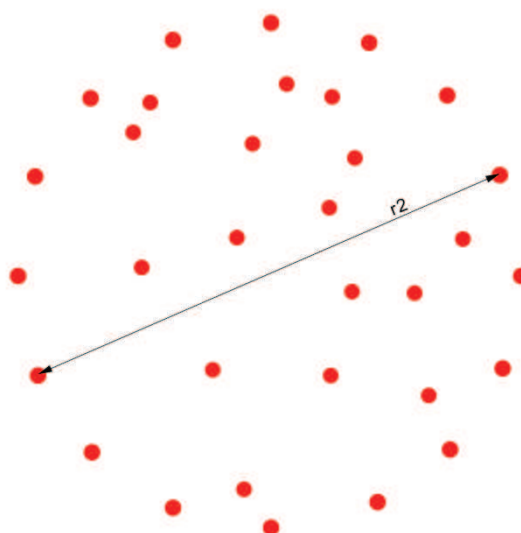
Obr. 2-12 Čtvercové mikrofonní pole



Obr. 2-13 Kruhové mikrofonní pole



Obr. 2-14 Náhodné čtvercové pole

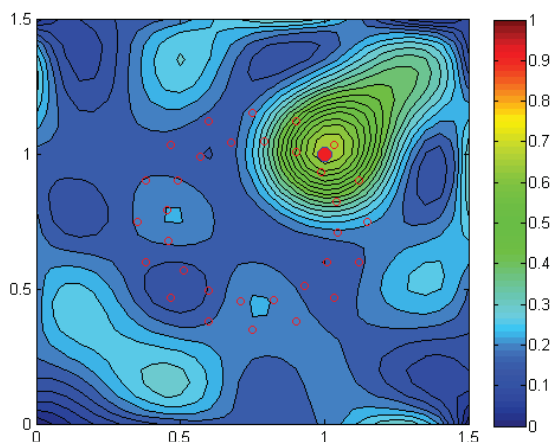


Obr. 2-15 Náhodné kruhové pole

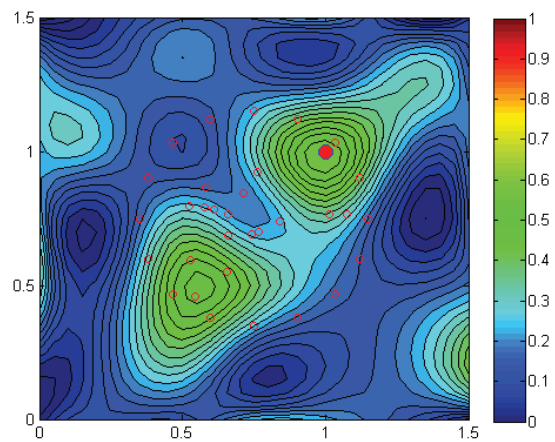
## 2.2.2 Kruhové pole

U kruhového pole jsou mikrofony uspořádány na dvou soustředných kružnicích, které jsou vůči sobě pootočené (viz **Obr. 2-13 Kruhové mikrofonní pole**). Výstupem simulace je 2-D mapa, která zobrazuje intenzitu zvuku v bodech zorného pole (viz. **Obr. 2-16 Směrová charakteristika kruhového pole**). Ve skutečnosti tvarovač zkoumá jen 16 bodů z důvodu rychlosti výpočtu. Ostatní body jsou dopočítány pomocí interpolace. Na **Obr. 2-17 Směrová charakteristika náhodného kruhového pole** je směrová charakteristika kruhového pole, které má mikrofony uvnitř vnější kružnice

rozmístěny náhodně. Z přijímacích charakteristik je patrné, že výhodnější rozložení mikrofonů je do dvou pootočených kružnic, protože u náhodného rozložení dochází k větší nejednoznačnosti určení zdroje zvuku.



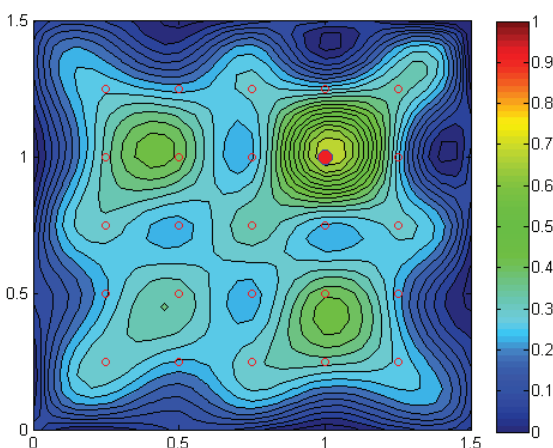
Obr. 2-16 Směrová charakteristika kruhového pole



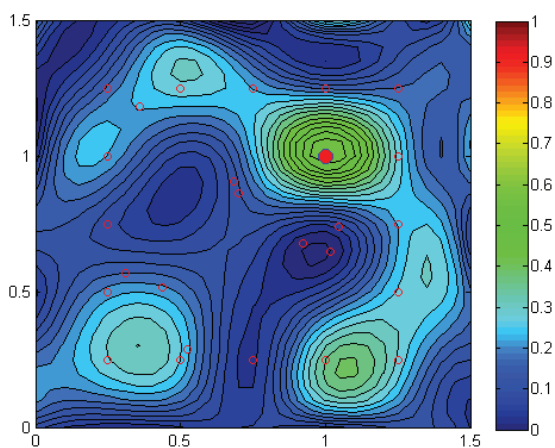
Obr. 2-17 Směrová charakteristika náhodného kruhového pole

### 2.2.3 Čtvercové pole

U čtvercového pole jsou mikrofony uspořádány do matice (viz. **Obr. 2-12 Čtvercové mikrofonní pole**). Ze směrových charakteristik (viz. **Obr. 2-18 Směrová charakteristika čtvercového pole** a **Obr. 2-19 Směrová charakteristika náhodného čtvercového pole**) je vidět, že u čtvercového pole je výhodnější rozmístit vnitřní mikrofony náhodně.



Obr. 2-18 Směrová charakteristika čtvercového pole



Obr. 2-19 Směrová charakteristika náhodného čtvercového pole



V praxi se častěji používají pravidelné kruhové mikrofonní pole se vzájemně pootočenými kružnicemi, protože podle jejich směrových charakteristik se lépe lokalizuje zdroj zvuku, což také vyplývá z výše uvedených výsledků. Další simulované charakteristiky jsou v příloze 2.

## 2.2.4 MSE kruhového pole

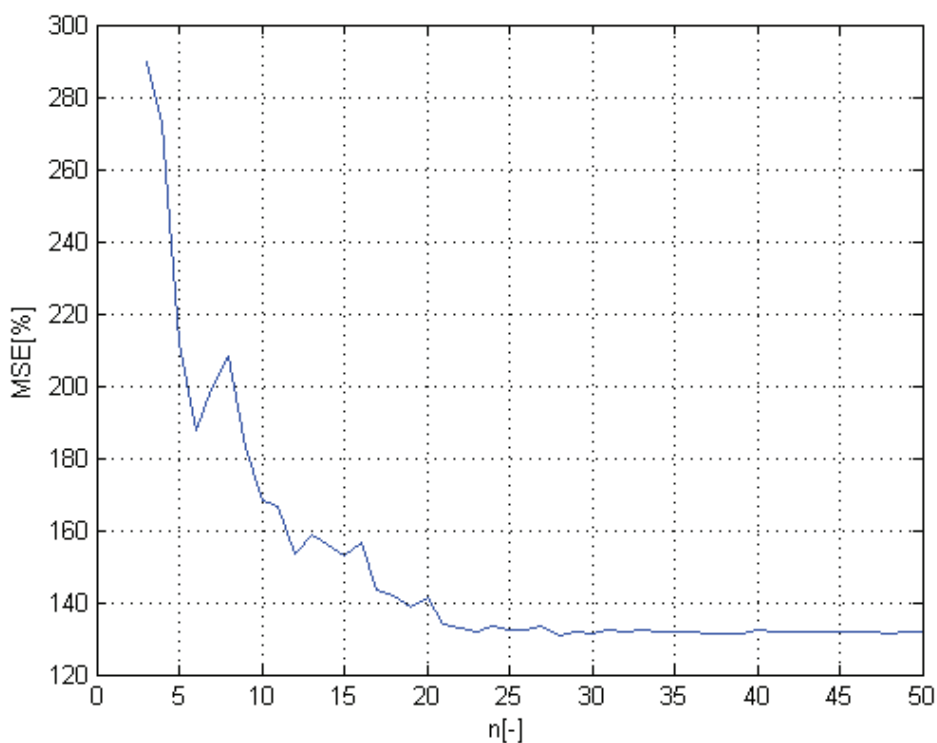
V další simulaci jsem se zaměřil na určení a zhodnocení chyby lokalizace zvuku při použití kruhového mikrofonního pole. Jako nejvhodnější se ukázala MSE (Mean Square Error), která určuje chybu oproti známému ideálnímu případu. Jako ideální jsem zvolil průběh, kdy je zisk z LD(1;1) roven 1 a z ostatních LD je 0. MSE se počítá následovně:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (A_{ni} - A_{si})^2}{\sum_{i=1}^K A_{si}^2}} * 100 \quad [\%]$$

kde  $A_n$  je naměřená hodnota a  $A_s$  správná hodnota,  $K$  je počet LD. V mém případě je MSE:

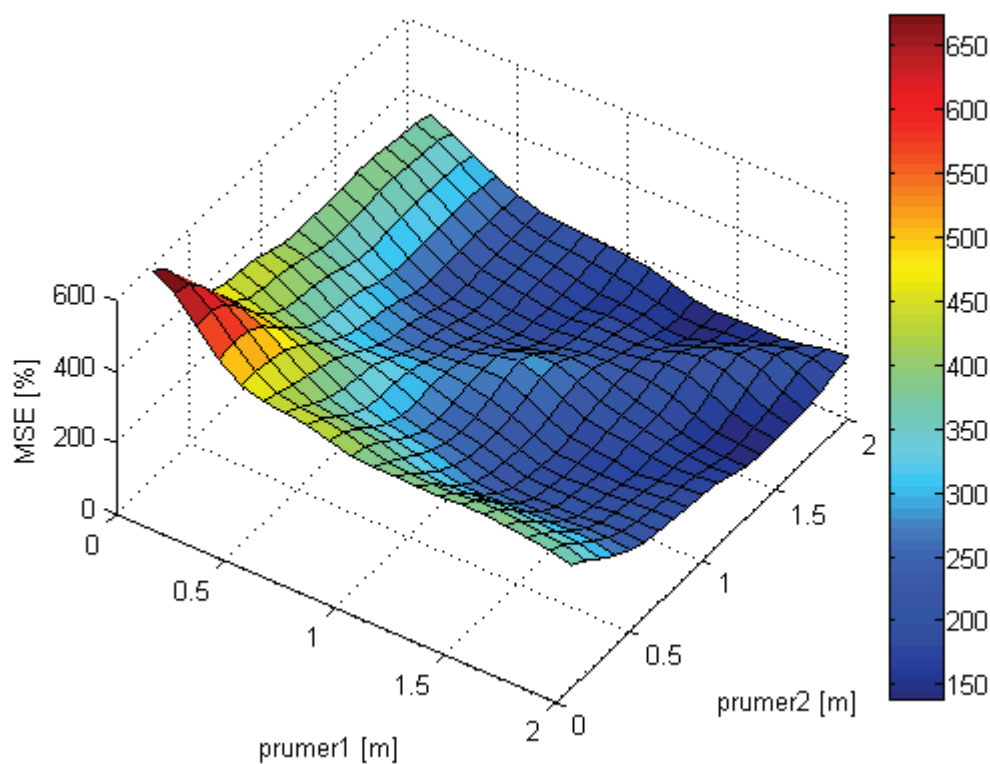
$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (A_{ni} - A_{si})^2}{1}} * 100 \quad [\%]$$

Nejprve jsem zjišťoval, jaký vliv na MSE má počet mikrofonů v poli. Výsledný graf je na **Obr. 2-20 MSE pro různý počet mikrofonů**. Z grafu je patrné, že nemá smysl používat pole s více než 21 mikrofony na kružnici, protože MSE se už více nezmění.



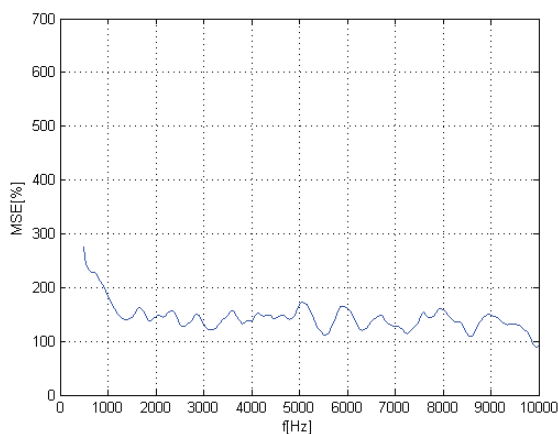
Obr. 2-20 MSE pro různý počet mikrofonů

Dále jsem zjišťoval jaký vliv na MSE mají průměry kružnic, na nichž jsou umístěny mikrofony. Z grafu **Obr. 2-21 MSE pro různé průměry kružnic mikrofonního pole** je vidět, že pro lepší lokalizaci (menší MSE) je výhodnější použít pole s většími průměry kružnic, které však nejsou stejné.

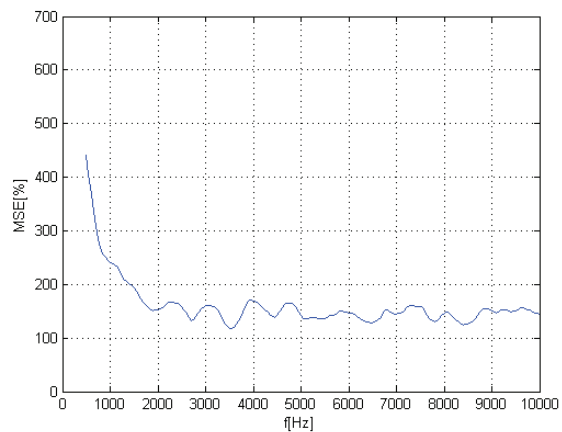


**Obr. 2-21 MSE pro různé průměry kružnic mikrofonního pole**

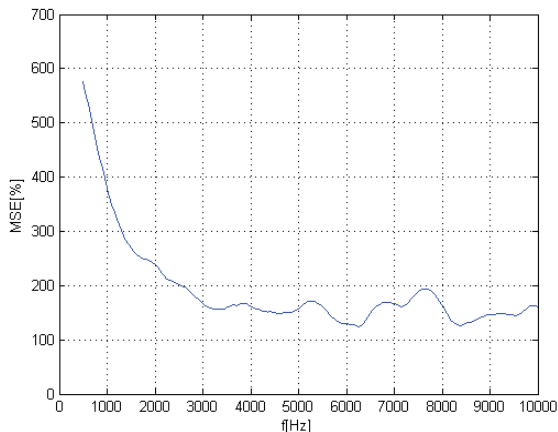
Na velikost MSE má vliv také vzdálenost mikrofonního pole od zdroje signálu. Z grafů **Obr. 2-22 MSE 0,5m** až **Obr. 2-25 MSE 5m** je vidět, že je lepší pole přiblížit ke zdroji zvuku, aby se zlepšila lokalizace zdrojů zvuku s nízkou frekvencí.



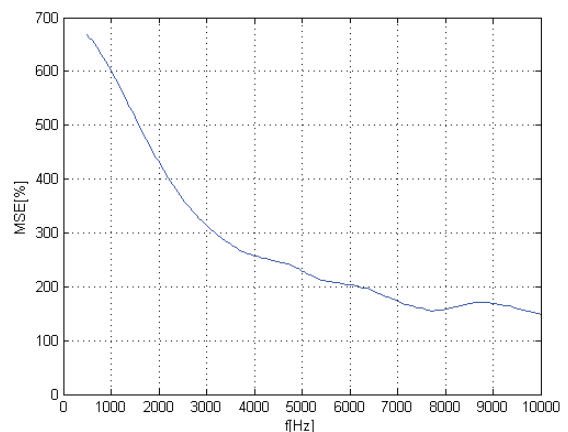
**Obr. 2-22 MSE 0,5m**



**Obr. 2-23 MSE 1m**



Obr. 2-24 MSE 2m



Obr. 2-25 MSE 5m

Ze simulovaných výsledků vyplývá, že nejvhodnější uspořádání mikrofonního pole je do soustředných kružnic s velkým průměrem a s 21 mikrofony na jedné kružnici.

### 3 MĚŘENÍ

Měření probíhalo v laboratoři E610, kde působí spousta rušivých vlivů, hlavně odrazy od okolních stěn a dozvuky. Lepších výsledků by bylo možné dosáhnout měřením v bezodrazové místnosti.

Pro měření jsem použil MEMS mikrofony Knowles Acoustics SP0103N, které se používají v mobilních telefonech. Tyto mikrofony se napájí 1,5-5V. Pracují se signály od 100Hz do 1kHz a vykazují všesměrovou přijímací charakteristiku, což je pro můj účel vhodné. Pouzdro mikrofonu obsahuje také neinvertující operační zesilovač, jehož zesílení je možné nastavit vnějším odporem R3 (viz.

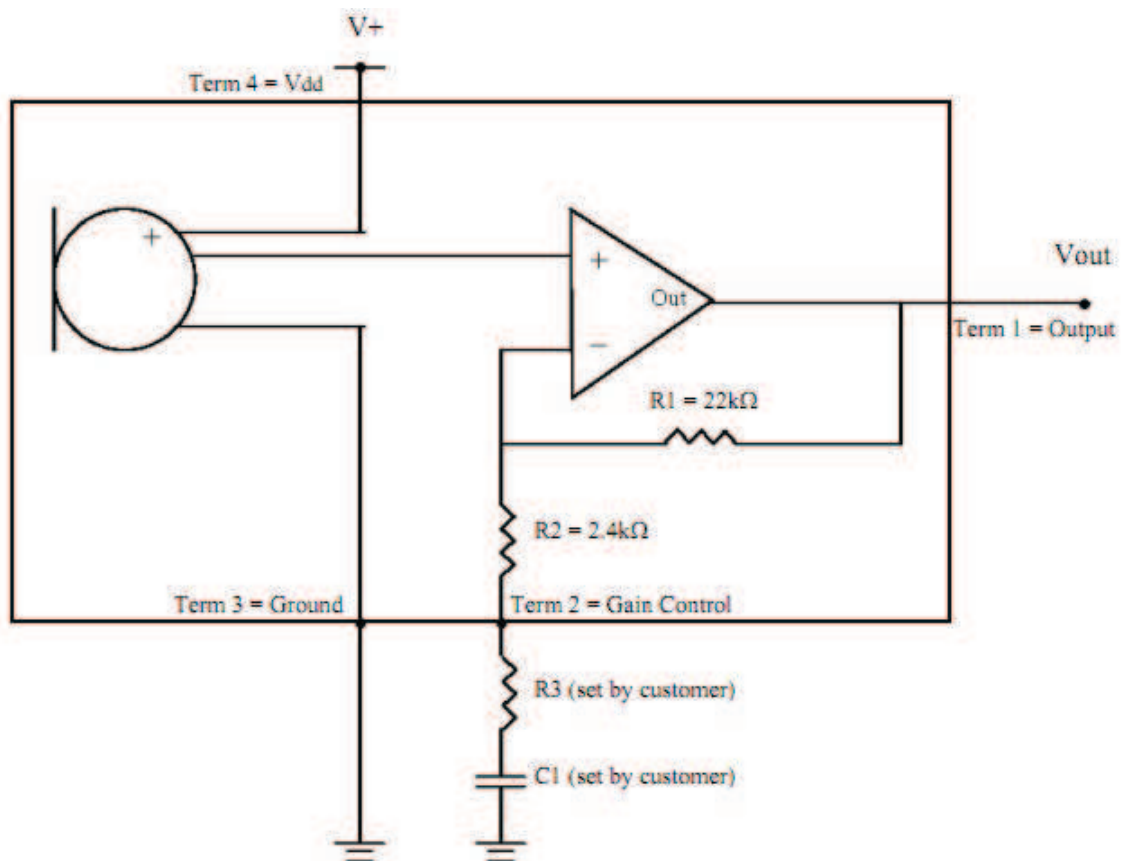
Obr. 3-1 Vnitřní zapojení SP0103N) [3]

$$G = 1 + \frac{R1}{R2 + R3} \quad [-], \quad g = 20 * \log(G) \quad [dB]$$

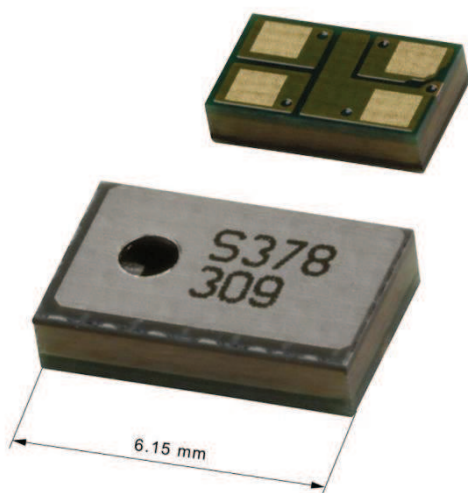
#### 3.1 Měřicí karta NI 9234

Tuto USB kartu vyrábí National Instruments, proto velmi dobře spolupracuje s vývojovým prostředím LabView. Karta má 4 analogové vstupy s BNC konektory a delta-sigma A/D převodník s rozlišením 24 bitů. Maximální rychlost karty je 51,2 kS/s. Karta disponuje softwarovým výběrem AC/DC vazby na vstupu. Maximální rozsah napětí vstupního signálu je ±5.

Tvarovač DAS jsem pro účely měření naprogramoval v LabView (viz. Příloha 1)



Obr. 3-1 Vnitřní zapojení SP0103N [3]



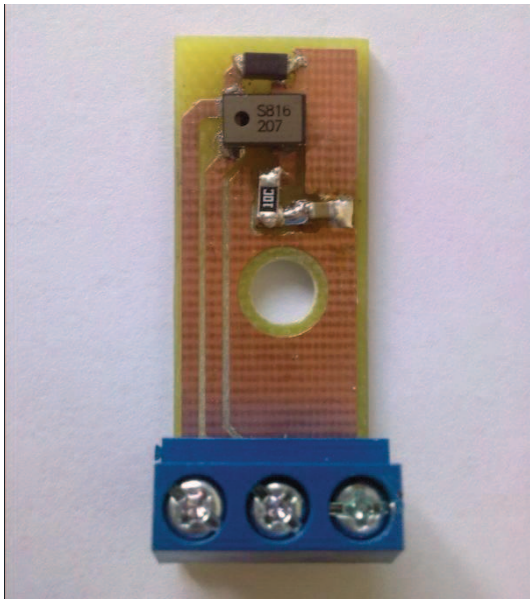
Obr. 3-2 Mikrofon Knowles SP0103N



Obr. 3-3 Měřicí karta NI 9234

## 3.2 System pro měření s MEMS mikrofony

K realizaci mikrofonního pole s mikrofony SP0103N bylo nutné vytvořit několik plošných spojů. Jednak 4 plošné spoje s mikrofony (**Obr. 3-4 Odvod s SP0103N**). Zesílení předzesilovače bylo nastaveno 10x (20dB) a mezní frekvence horní propusti na 141 Hz. Dále plošný spoj pro přivedení signálu z mikrofونů k měřicí kartě (**Obr. 3-5 Obvod pro připojení k měřicí kartě**)



Obr. 3-4 Odvod s SP0103N



Obr. 3-5 Obvod pro připojení k měřicí kartě

Pro měření jsem z hliníkových profilů sestrojil čtvercové pole se 4 mikrony v rozích. (viz. **Obr. 3-6 Reálné mikrofonní pole**). Jako zdroj signálu jsem použil výškový reproduktor SONY, který jsem budil sinusovým signálem z výkonového generátoru.

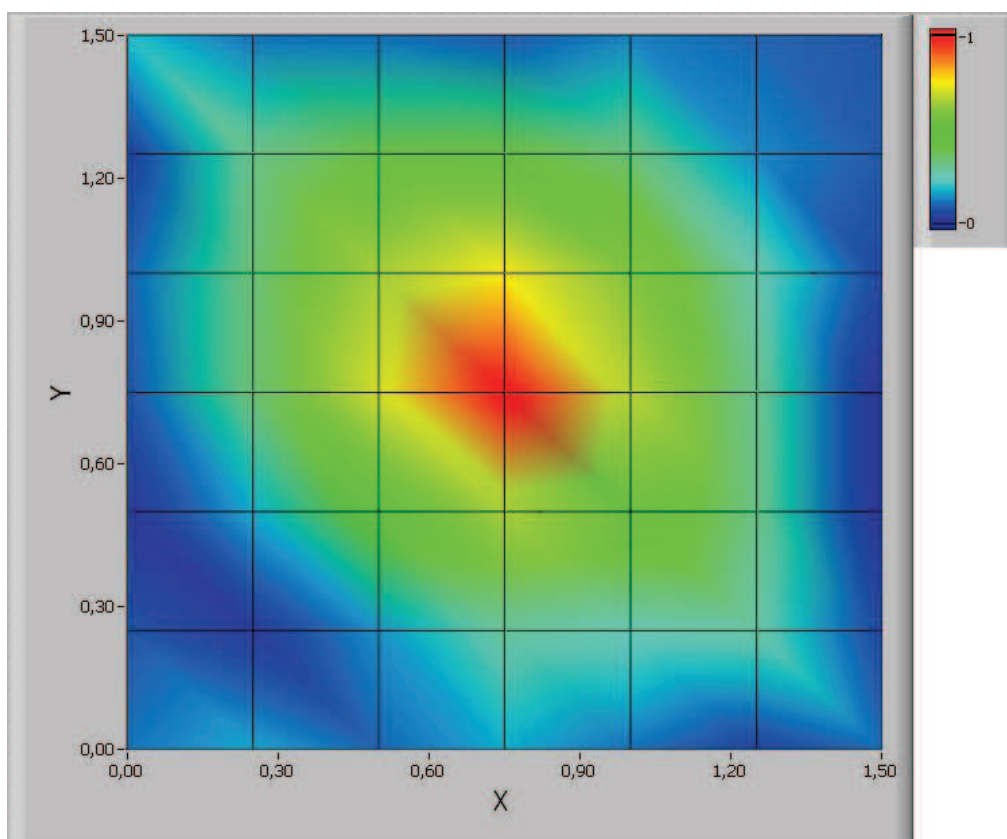


**Obr. 3-6 Reálné mikrofonní pole**

### 3.3 Výsledky měření

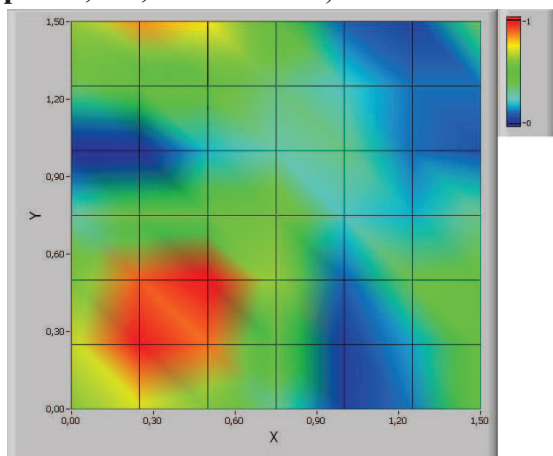
Tvarovač postupně měří odezvu ze 49 (7x7) LD vzdálených od sebe 25cm. Celkem analyzuje plochu 1,5x1,5m.

Nejdříve bylo nutné zjistit, zda nedochází k posuvu fáze na některém z mikrofonů a případně tyto posuvy zohlednit v modelu tvarovače. Tuto skutečnost jsem ověřil tak, že jsem umístil všechny mikrofony vedle sebe (při zanedbání vzdálenosti mezi nimi cca 2cm se nachází v jednom místě). Potom na všechny mikrofony přichází zvuk ve stejný čas, zvukové vlny na jednotlivých mikrofonech nejsou fázově posunuty a přijímací charakteristika tvarovače se čtvercovým mikrofonním polem vykazuje největší zisk ve středu zorného pole (viz. **Obr. 3-7 Kalibrace mikrofonního pole**).

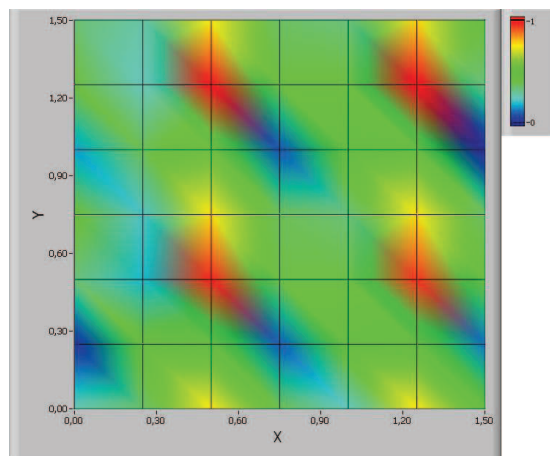


Obr. 3-7 Kalibrace mikrofonního pole

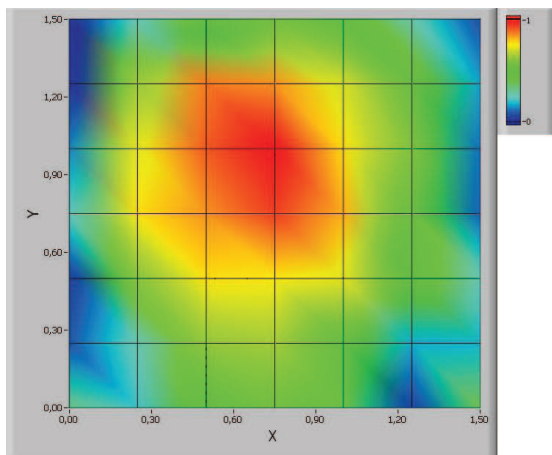
Při měření se zdroj zvuku vždy nacházel na pozici 0,5;0,5. Nejdříve jsem ověřoval vliv frekvence zpracovávaného signálu na přesnost lokalizace zvuku. Pro toto měření jsem použil mikrofonní pole se vzdáleností 0,5m mezi mikrofony a vzdáleností zdroje zvuku od mikrofonního pole 2m. Měřil jsem pro frekvence zdroje 1, 2 a 5kHz. Z přijímacích charakteristik vyplývá, že nejlépe lokalizovaný kmitočet je 1kHz. Pro vyšší kmitočty dochází k nejednoznačnosti vlivem překročení  $f_{max}$  (viz. **Obr. 3-9 Mic. pole 0,5x0,5m-2m 2kHz**).



Obr. 3-8 Mic. pole 0,5x0,5m-2m 1kHz

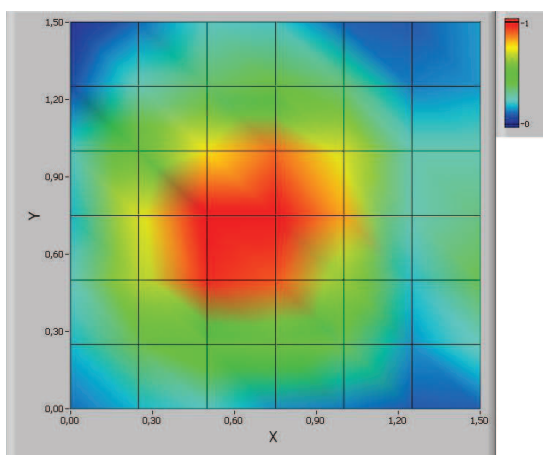


Obr. 3-9 Mic. pole 0,5x0,5m-2m 2kHz

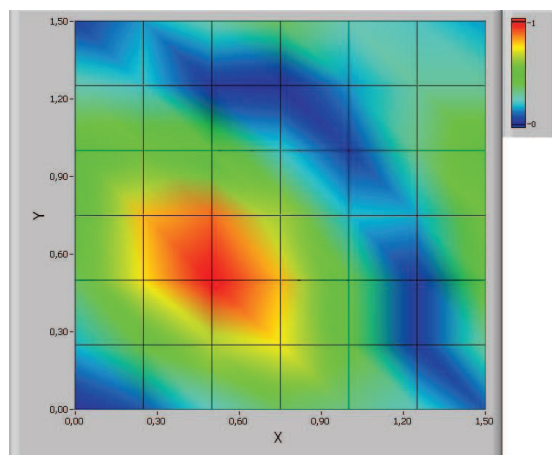


**Obr. 3-10 Mic. pole 0,5x0,5m-2m 5kHz**

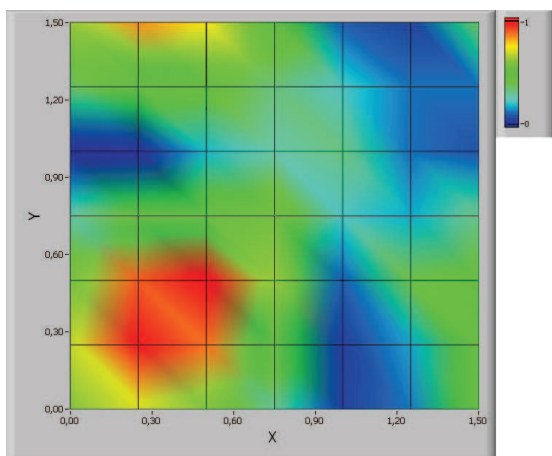
Dále jsem měřil jak se liší odezva v závislosti na rozměrech mikrofonního pole (vzdálenosti mezi mikrofony). Pro toto měření jsem umístil zdroj signálu 2m od mikrofonního pole, vzdálenost mezi mikrofony jsem nastavoval na 0,1, 0,3 a 0,5m a kmitočet zdroje na 1kHz.



**Obr. 3-11 Mic. pole 0,1x0,1-2m 1kHz**



**Obr. 3-12 Mic. pole 0,3x0,3-2m 1kHz**



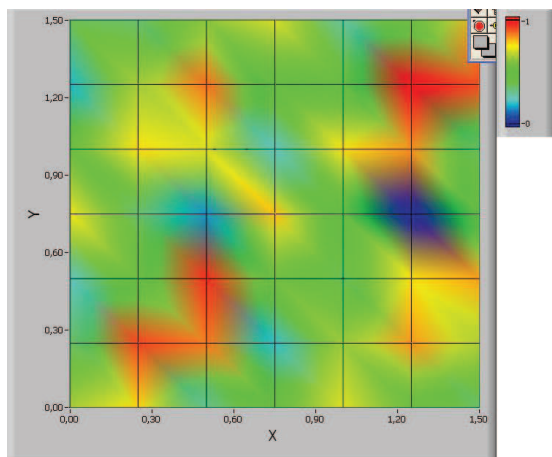
**Obr. 3-13 Mic. pole 0,5x0,5-2m 1kHz**



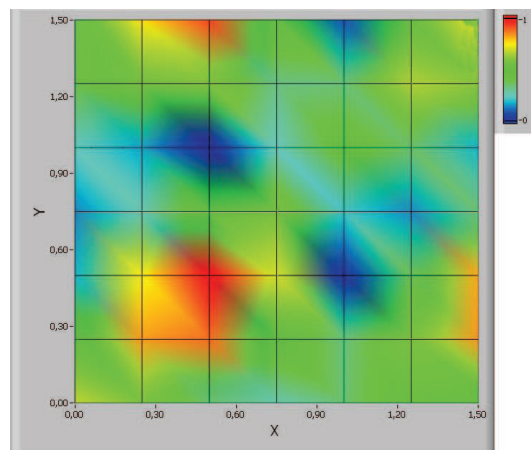
Z **Obr. 3-11 - Obr. 3-13** vyplývá, že pro lokalizaci zdroje zvuku o frekvenci 1kHz je nejlepší rozmístit mikrofony ve čtvercovém poli 0,3m od sebe. Toto měření také potvrzuje fakt, že nejvhodnější vzdálenost mezi mikrofony je právě polovina vlnové délky zpracovávaného signálu:

$$d \doteq \frac{v}{f} = \frac{343}{1000} = 0,343m$$

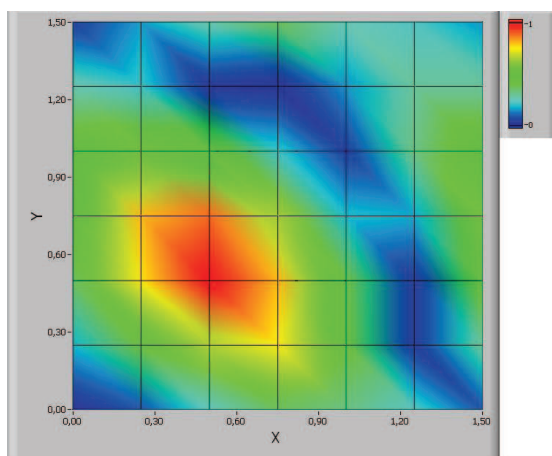
V dalším měření jsem zkoumal vliv vzdálenosti mikrofonního pole od zdroje zvuku na jeho lokalizaci. Použil jsem opět sinusový signál o frekvenci 1 kHz, čtvercové mikrofonní pole se vzdáleností 0,3m mezi mikrofony a vzdálenost pole od zdroje jsem nastavoval na 1, 1,5 a 2m. Výsledné přijímací charakteristiky jsou na **Obr. 3-14 - Obr. 3-16**.



**Obr. 3-14** Mic. pole 0,3x0,3 - 1m 1kHz



**Obr. 3-15** Mic. pole 0,3x0,3 - 1,5m 1kHz



**Obr. 3-16** Mic. pole 0,3x0,3 - 2m 1kHz

Z charakteristik vyplývá, že s rostoucí vzdáleností mikrofonního pole od zdroje zvuku se zlepšuje přesnost lokalizace, kdy pro vzdálenost 1m se zdá, že se v zorném poli nachází 3 zdroje zvuku, kdežto pro vzdálenost 2m se v zorném poli nachází už jenom jeden zdroj zvuku na souřadnicích 0,5;0,5.

## 4 ZÁVĚR

V práci jsou popsány metody používané pro lokalizaci zdroje zvuku pomocí mikrofonního pole. V praxi nejpoužívanější metoda je tvarování přijímací charakteristiky díky své jednoduchosti a možnosti lokalizace více zdrojů současně, proto jsem tuto metodu simuloval v prostředí Matlab a došel k následujícím závěrům.

Při simulaci ULA je vhodné zvolit vzdálenost mezi mikrofony polovinu vlnové délky zpracovávaného signálu. Větší počet mikrofonů zpřesňuje lokalizaci tím, že zužuje hlavní smyčku a zmenšuje postranní smyčky v přijímací charakteristice. U rovinného mikrofonního pole je vhodné umístit mikrofony na soustředných kružnicích, které jsou pootočený kolem středu namísto čtvercového mikrofonního pole, kde jsou mikrofony umístěny v matici. Při tomto rozložení nemá smysl používat více než 21 mikrofonů na kružnici, protože další mikrofony přesnost lokalizace nezlepší. Dalším aspektem ovlivňujícím přesnost lokalizace je frekvence zdroje zvuku, který lokalizujeme. Pro vyšší frekvence je lepší použít mikrofonní pole, které má mikrofony blíže u sebe. Pokud se mikrofonní pole vzdaluje od zdroje zvuku, klesá přesnost lokalizace a to zejména pro nízké kmitočty (cca do 4kHz).

V praktické části jsem naprogramoval metodu tvarování přijímací charakteristiky s tvarovačem DAS v prostředí LabView. Mikrofonní pole jsem setrojl čtvercové se čtyřmi mikrofony v rozích, protože dodaná měřicí karta neměla více vstupů. Měření probíhalo v laboratoři E610. Při měření nejlépe proběhla lokalizace zdroje zvuku s frekvencí 1kHz a to s mikrofonním polem o rozměrech 0,3x0,3m. Pro menší vzdálenost mezi mikrofony byla charakteristika méně ostrá a pro větší vzdálenost se začínalo uplatňovat překročení mezní frekvence. Pro vyšší frekvence docházelo k překročení mezní frekvence a neurčitosti lokalizace zdroje zvuku. Při oddalování mikrofonního pole od zdroje zvuku se zpřesňovala jeho lokalizace.

## Literatura

- [1] BENESTY, J. Microphone Array Signal Processing. Springer-Verlag Berlin, 2008. 240s. ISBN 978-3-540-78611-5
- [2] EKSLER, V. Prostorová lokalizace a separace naslepo zdrojů akustických signálů polem mikrofonů. Brno, 2006. 98s. Dizertační práce
- [3] SP0103N Datasheet. 2003. 5s.
- [4] KIRKWOOD, B. Acoustic Source Localization Using Time-Delay Estimation. Technical University of Denmark, 2003. 192s. Dizertační práce
- [5] GRÉNAR, M. Tvarování přijímací charakteristiky mikrofonního pole. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ivan Míča
- [6] SØRENSEN, J. Noise Source Identification. Presentace fy. Brüel & Kjær
- [7] BEZDÍČEK, M. Lokalizace pohyblivých akustických zdrojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 56s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ivan Míča
- [8] HAVLÍČEK, J. VLACH, J. VLACH, M. Začínáme s LabView. Praha, 2008. 248s. ISBN 978-80-7300-245-9
- [9] LEE, J. MEMS Microphone. 2009. Presentace
- [10] <http://www.memx.com/> (online)

## Seznam zkratek a veličin

ULA	rovnorné lineární pole <i>uniform linear array</i>
DOA	směr příchodu signálu <i>direction of arrival</i>
MV	minimum variance
AR	autoregressive modeling
MUSIC	multiple signal classification
LD	směr pohledu tvarovače <i>look direction</i>
DAS	delay and sum
TDOA	časový rozdíl příchodu signálu mezi mikrofony <i>time difference of arrival</i>
$\tau$	časové zpoždění signálu
$v_z$	rychlost zvuku 343m/s
$d$	vzdálenost mezi sousedními mikrofony
$\theta$	úhel pohledu
$\lambda_{\min}$	minimální vln. délka
$f_{\max}$	mezní frekvence
$R_{ab}$	křížová korelace mezi a,b
T	časové okno
$\rho_{ab}$	koeficient křížové korelace
$y_n(k)$	dikrétní signál
$a_n$	zeslabení sigálu
$s(k)$	signál přicházející od zdroje
$F_n(k)$	zpoždění signálu na n-tém mikrofону
$v_n$	rušení na n-tém mikrofону
N	počet mikrofonů
MSE	mean square error chyba vůči
$A_n$	měřená hodnota
$A_s$	správná hodnota
K	počet analyzovaných bodů (LD)

## **Seznam příloh**

Příloha 1. Schéma tvarovače DAS se 4 mikrofony v LabVIEW

Příloha 2. Další simulované charakteristiky

## **Obsah přiloženého CD**

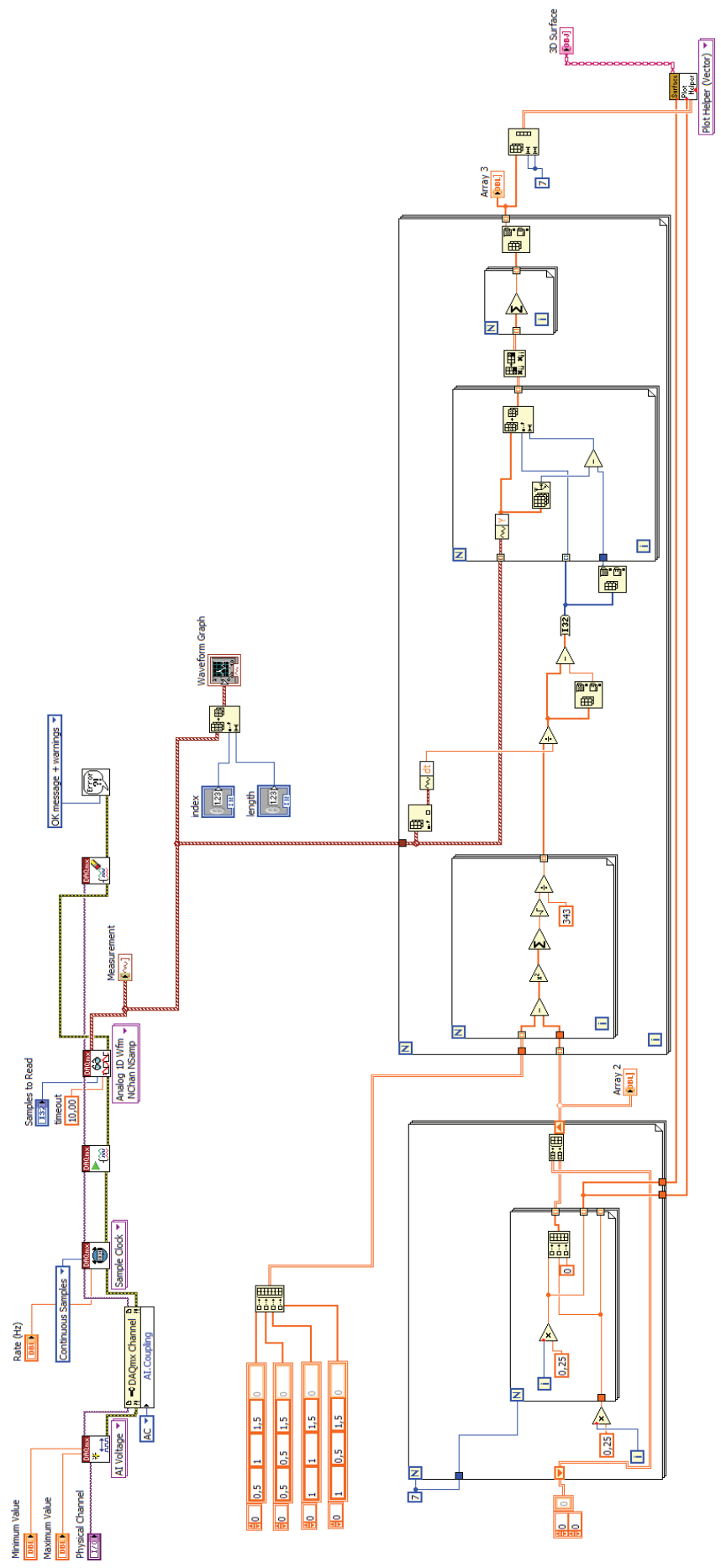
Příloha 1. Elektronická verze práce

Příloha 2. Zdrojové kódy Matlab a LabVIEW

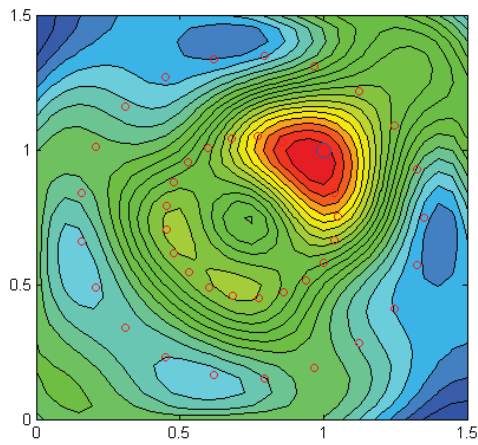
Příloha 3. DPS pro měření s MEMS mikrofony

Příloha 4. Datasheet mikrofону Knowles SP0103N

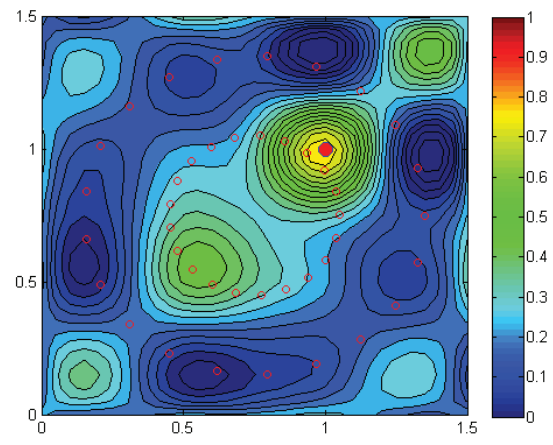
Príloha 1. Schéma tvarovače DAS se 4 mikrofony v LabVIEW



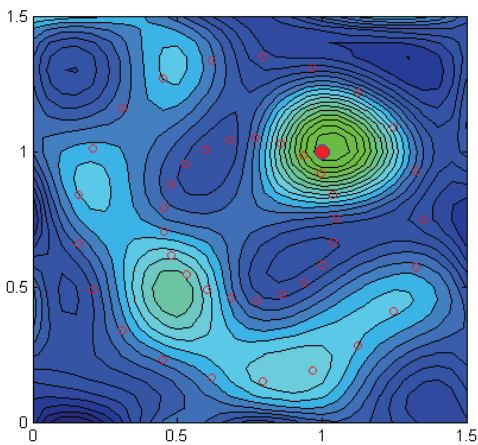
Příloha 2. Další simulované charakteristiky



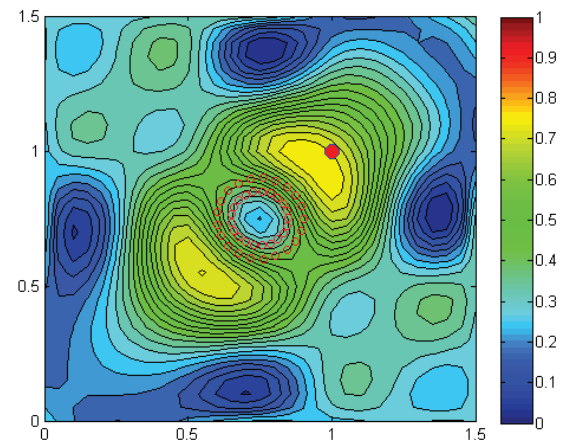
Obr. 0-1  $r_1=0,6\text{m}$   $r_2=1,2\text{m}$  1kHz



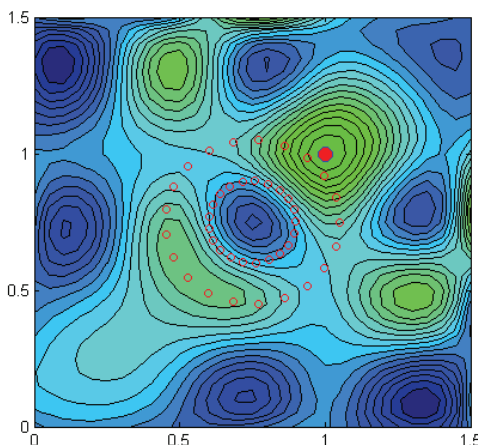
Obr. 0-2  $r_1=0,6\text{m}$   $r_2=1,2\text{m}$  2kHz



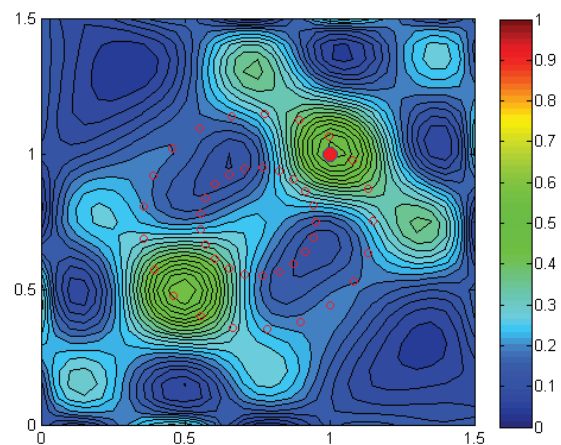
Obr. 0-3  $r_1=0,6\text{m}$   $r_2=1,2\text{m}$  5kHz



Obr. 0-4 5kHz  $r_1=0,2\text{m}$   $r_2=0,3\text{m}$



Obr. 0-5 5kHz  $r_1=0,3\text{m}$   $r_2=0,6\text{m}$



Obr. 0-6 5kHz  $r_1=0,4\text{m}$   $r_2=0,8\text{m}$