



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

# NÁVRH SYSTÉMU PRO LOKALIZACI ZDROJE ZVUKU

DESIGN AND TESTING OF THE SYSTEM FOR LOCALIZING A SOUND SOURCE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Havelka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Najman

BRNO 2019

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Martin Havelka</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Najman</b>
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh systému pro lokalizaci zdroje zvuku

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Lokalizace zdrojů zvuku pomocí několika senzorů je jednoduchým řešením pro určení polohy uživatele či monitorování prostoru. Pro svou nenáročnost je možné tuto metodu použít s nízkými náklady na hardware, nicméně její nevýhodou může být malá přesnost. Cílem této práce je tedy zmapování a otestování několika možných řešení lokalizace zdroje zvuku, a to jak z pohledu použitého hardware (počet a umístění senzorů), tak různých metod zpracování signálu. Výstupem by mělo být zhodnocení funkčnosti a přesnosti jednotlivých řešení a vytvoření ukázkové aplikace. Předpokládá se využití programu MATLAB, případně jazyka Python nebo C při aplikaci na platformě Arduino/Raspberry Pi.

### Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše vhodných metod pro lokalizaci zdroje zvuku a hardware pro měření a zpracování signálu
2. Výběr komponent, sestavení testovacího zařízení a realizace základní funkcionality
3. Naprogramování a otestování vybraných metod lokalizace zdroje zvuku
  - Otestování přesnosti
  - Vliv počtu a rozmístění senzorů
  - Otestování robustnosti (vliv okolního rušení, překážek v prostoru, ...)
4. Vytvoření ukázkové aplikace s vizualizací výsledků lokalizace, případně možností změny parametrů či použité metody

### Seznam doporučené literatury:

- DOSTÁLEK, P.: Embedded systém pro lokalizaci zdroje zvuku. Zlín, 2010
- STRUMILLO, P.: Advances in Sound Localization. InTech, 2011

MUNGAMURU, B. a AARABI, P.: Enhanced sound localization. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. USA: IEEE, 2004

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi lokalizace zdroje zvuku. Na začátku jsou obecně zmíněna možná hardwarová i softwarová řešení, z nichž jsou vybrány dvě použitelné metody a vhodné komponenty testovacího zařízení. Dále navazuje praktická část práce, kde jsou naprogramované algoritmy popsány. Důležitou součástí je následné testování. Pro vybrané mikrofonní pole je otestována přesnost v závislosti na změně počtu a rozmístění senzorů, vlivu okolního rušení a na umístění překážky v prostoru. Výstupem testů je zhodnocení funkčnosti a přesnosti pro obě použité metody.

## **Klíčová slova**

TDOA, DAS Beamformer, lokalizace zdroje zvuku, Matlab, mikrofonní pole, DOA, CC

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with possibilities of sound source localization. There are generally mentioned possible hardware and software solutions at the beginning, from which two applicable methods and suitable components of test device are selected. Further there is a practical part of this work, where programmed algorithms are described. An essential part is testing. Accuracy is tested for the selected microphone array, depending on the change in the number and position of the sensors, the effect of ambient noise, and the location of the obstacle in the area. The output of the tests is the evaluation of functionality and accuracy for both methods used.

## **Keywords**

TDOA, DAS Beamformer, sound source localization, Matlab, microphone array, DOA, CC



## **Bibliografická citace:**

*HAVELKA, Martin. Návrh systému pro lokalizaci zdroje zvuku [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117375>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jan Najman.*

## **Prohlášení**

*„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma návrh systému pro lokalizace zdroje zvuku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této 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: **20. května 2019**

.....

podpis autora

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Najmanovi za vstřícný přístup a rady v průběhu realizace a psaní této práce. Dále děkuji rodičům a přítelkyni za podporu během celého dosavadního studia.*

V Brně dne: **20. května 2019**

.....

podpis autora

# Obsah

<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>12</b>
<b>2 Rešeršní část</b> .....	<b>13</b>
2.1 Algoritmy pro vyhodnocení směru přicházejícího signálu (DOA).....	14
2.1.1 Binaurální slyšení a přenosová funkce hlavy (HRTF).....	14
2.1.2 Metody založené na stanovení časových zpoždění (TDOA).....	16
2.1.3 Metody tvarování přijímací charakteristiky.....	18
2.2 Hardware .....	20
2.2.1 Mikrofonní moduly .....	21
2.2.2 A/D převodník a výpočetní jednotka .....	22
<b>3 Formulace problémů a cíle řešení</b> .....	<b>24</b>
3.1 Cíle .....	24
3.2 Kroky k dosažení cílů.....	24
3.3 Zhodnocení rešeršní části .....	24
<b>4 Experimentální část</b> .....	<b>26</b>
4.1 Použitý hardware.....	26
4.2 Naprogramované metody .....	27
4.2.1 Popis celého algoritmu.....	27
4.2.2 Kalibrace a detekce prvního překročení hladiny .....	28
4.2.3 TDOA .....	29
4.2.4 DAS Beamformer .....	30
4.3 Finální aplikace .....	32
<b>5 Testy a výsledky</b> .....	<b>33</b>
5.1 Přesnost v závislosti na vzdálenosti mezi mikrofony .....	33
5.2 Vliv počtu a rozmístění senzorů.....	35
5.2.1 Vliv počtu senzorů .....	36
5.2.2 Vliv rozmístění senzorů .....	37
5.3 Vliv překážky na vyhodnocení.....	39
5.4 Reakce na zvuk vzniklý tlesknutím.....	40

5.5	Vyhodnocení bez použití hladiny detekce .....	40
5.6	Výsledné zhodnocení testů.....	42
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>43</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>45</b>
	<b>Seznam zkratek .....</b>	<b>46</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>47</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Uniformní rovinné pole.....	13
Obrázek 2 - Akustická vlna dopadající na mikrofonní pár [3] .....	17
Obrázek 3 - Schéma DAS Beamformer [10].....	19
Obrázek 4 - Uniformní lineární mikrofonní pole [3].....	19
Obrázek 5 - Schéma hardwarové části.....	20
Obrázek 6 - Elektretový mikrofón .....	21
Obrázek 7 - Mikrofonní modul RobotDyn .....	26
Obrázek 8 - stojan s mikrofonním rovinným polem.....	27
Obrázek 9 - Schéma algoritmu vyhodnocení DOA .....	27
Obrázek 10 - Nahraný signál s vybranou oblastí detekce.....	28
Obrázek 11 - První detekované překročení hladiny.....	29
Obrázek 12 - Graf korelace v závislosti na posunutí .....	30
Obrázek 13 - Vyhodnocení DOA metodou DAS Beamformer .....	31
Obrázek 14 - Uživatelské rozhraní aplikace .....	32
Obrázek 15 - Uniformní lineární pole.....	33
Obrázek 16 - Graf chyby měření 2 mikrofony TDOA .....	34
Obrázek 17 - Graf chyby měření 2 mikrofony DAS .....	35
Obrázek 18 - Graf chyby měření pro proměnný počet senzorů TDOA.....	36
Obrázek 19 - Graf chyby měření pro proměnný počet senzorů DAS.....	37
Obrázek 20 - Zapojení čtvercového mikrofonního pole.....	37
Obrázek 21 - Graf chyby měření pro různé rozmístění TDOA .....	38
Obrázek 22 - Graf chyby měření pro různé rozmístění DAS .....	39
Obrázek 23 - Graf vyhodnocení DAS Beamformer -90° .....	41

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Srovnání parametrů Arduino .....	22
Tabulka 2 - Výsledky měření pro vliv vzdálenosti mezi mikrofony .....	34
Tabulka 3 - Průměrná chyba měření, vliv vzdálenosti .....	35
Tabulka 4 - Závislost přesnosti detekce na počtu senzorů.....	36
Tabulka 5 - Průměrná chyba měření, vliv počtu senzorů .....	37
Tabulka 6 - Závislost přesnosti detekce na rozmístění senzorů.....	38
Tabulka 7 - Průměrná chyba měření, vliv rozmístění senzorů .....	39
Tabulka 8 - Vliv překážek na vyhodnocení .....	39
Tabulka 9 - Výsledky detekce pro zvuk vzniklý tlesknutím .....	40
Tabulka 10 - Průměrná chyba měření, tlesknutí .....	40
Tabulka 11 - Výsledky vyhodnocení bez použití hladiny detekce .....	41
Tabulka 12 - Chyba měření pro všechny testované umístění a vzdálenosti .....	42

# 1 ÚVOD

Lokalizace zdroje zvuku je důležitou součástí každodenního života. Sluch, jeden z pěti smyslů, je významným zdrojem informací, které člověk získává z okolí. Tyto informace mu poskytují jasnější a komplexnější obraz světa. Díky vyhodnocení zvuku dokáže odhadnout směr a vzdálenost zdroje nebo intenzitu přicházejícího signálu. V přírodě se setkáváme s velmi sofistikovanými sluchovými orgány, které jsou inspirací pro technické aplikace.

Pro první technické aplikace v oblasti detekce zvuku bylo nutné využít sluchové ústrojí lidské, které bylo rozšířeno o sluchové aparáty rozšiřující dosah a efektivitu lidského sluchu. Tyto sluchové aparáty byly používány od poloviny první do začátku druhé světové války pro pasivní detekci letadel pomocí sledování zvuku a vibrací motorů. S vynálezem radaru se zvuková detekce stala zastaralou a přestala se používat [1].

Detekce zvuku opět nabyla na významu až s rozvojem elektrotechniky a výpočetní techniky s koncem 20. století. V současnosti se možnosti zpracování signálů rozšířily tak, že se aplikace spojené s lokalizací zvuku používají například v bezpečnostních systémech, v robotických aplikacích, při testování a analýze výrobků v auto motive [3].

Tato práce je součástí projektu Robotická hlava. Projekt má za cíl vytvořit funkční prototyp systému, který bude interagovat s okolním prostředím pomocí senzorů a naprogramovaných algoritmů. Součástí těchto senzorů je mikrofonní pole a s tím spojená detekce zdroje zvuku. Pro toto použití je nutné najít efektivní a finančně příznivé řešení. Na celý systém jsou kladeny nízké výpočetní nároky s odpovídající přesností a robustností. Je také důležité vzít v úvahu to, že systém má fungovat v prostředí s vysokou hladinou šumu a v přímé interakci s člověkem.

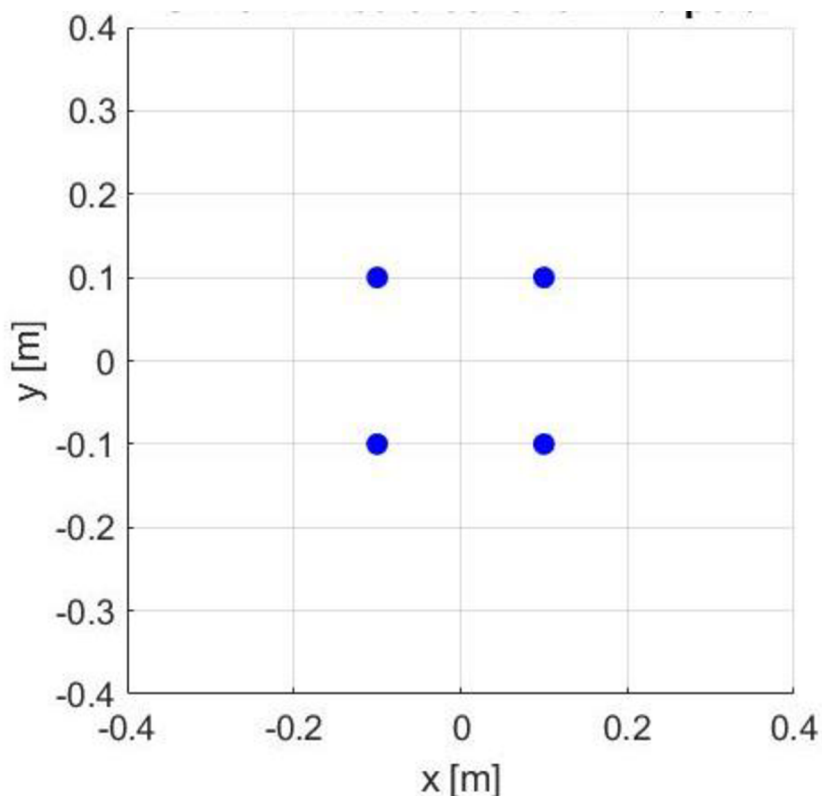
Proto je cílem této bakalářské práce zhodnotit hardwarové a softwarové možnosti lokalizace zvuku, vybrané metody otestovat a analyzovat jejich přesnost v závislosti na výše popsaných požadavcích a možnostech.

Práce je rozdělena do šesti kapitol. V kapitole 2 je vypracována rešerše různých přístupů k lokalizaci zvuku a možného použití hardware pro měření a zpracování signálu. Cíle práce a vyhodnocení rešeršní části jsou v kapitole 3. Kapitola 4 popisuje realizovaná řešení. Testování a výsledky jsou obsaženy v kapitole 5. V poslední kapitole jsou zhodnoceny výsledky práce a dále nastíněny možnosti dalšího pokračování a vylepšení.



## 2 REŠERŠNÍ ČÁST

K lokalizaci zdroje zvuku se používají mikrofonní pole, které zaznamenávají příchozí signál. Minimální počet senzorů pro detekci je jeden mikrofonní pár. Pole se dělí na lineární, rovinné a prostorové podle jejich rozmístění v prostoru. Lineární pole detekuje signál v 1D, rovinné pole ve 2D a prostorové ve 3D prostoru. Mikrofonní pole je uniformní, to znamená, že sousední mikrofony mají mezi sebou stejnou vzdálenost. Demonstrace uniformního rovinného pole je na Obrázek 1.



Obrázek 1 - Uniformní rovinné pole

Analogová data získaná z mikrofونů se převádí do digitální podoby vhodným vzorkováním. Poté je pomocí vhodných metod získána poloha zdroje zvuku.

Data se mohou zpracovávat v reálném čase (real-time), anebo se využije jejich zaznamenání do paměti. Tuto sekvenci lze vyhodnotit bez vazby na hardware a bez nutnosti okamžitého a velmi rychlého zpracování.

Pro aplikace pracující v reálném čase je nutná rychlá odezva, malá výpočetní náročnost a vyhovující přesnost. Při vzorkování je uživatel limitován parametry hardwaru. Kvalita zaznamenaného signálu také závisí na mikrofonních modulech, u kterých by v ideálním případě měl být průběh signálu totožný s mikrofony sousedními. Jedinou odlišností by měl být posuv jednotlivých signálů v čase.

Nejdůležitějším vlivem je prostředí, ve kterém se zvuk detekuje. Odrazy od stěn a překážek, více zdrojů zvuku a další možné vlastnosti prostředí mohou nepříznivě ovlivnit kvalitu a přesnost detekce.

Všechny tyto vlivy, použitý hardware i zvolený algoritmus, jsou důležité ke správné funkčnosti detekce a vybráním vhodných komponent a algoritmů lze zaručit spolehlivost a přesnost.

Tato rešeršní část mapuje možné použití algoritmů na vyhodnocení směru přicházejícího signálu DOA (Direction Of Arrival) a dále se zabývá souhrnem možných hardwarových řešení. V závislosti na rešeršní části je v kapitole 3 zhodnoceno vybrání vhodných metod, které budou základem vyhodnocovacího algoritmu. Dále je vybrán vhodný hardware, který bude splňovat požadavky zmíněné v úvodu.

## **2.1 Algoritmy pro vyhodnocení směru přicházejícího signálu (DOA)**

Metody pro vyhodnocení DOA lze rozdělit do několika skupin.

### **Aktivní metoda pro lokalizaci zvuku**

Senzor vyšle akustickou vlnu, která je odražena předmětem a poté detekována senzorem. Mezi systémy, které se řadí do aktivní metody, patří sonar (Sound Navigation and Ranging – Zvuková navigace a zaměřování).

### **Pasivní metoda pro lokalizaci zvuku**

Mikrofonní pole zaznamená signál přicházející od zdroje zvuku a následně ho vyhodnotí a zdroj zvuku lokalizuje [2].

V oblasti pasivních metod je více způsobů vyhodnocení DOA. V této bakalářské práci se budou uvažovat jen pasivní metody se statickým mikrofonním polem. Jak bylo zmíněno, pro pasivní metody existuje několik přístupů. Rešeršní část se zabývá těmito přístupy.

- Binaurální slyšení a přenosová funkce hlavy (HRTF) [4]
- Metody založené na časových zpoždění (TDOA) [3],[10]
- Metody založené na tvarování přijímací charakteristiky (Beamforming) [3],[7]

### **2.1.1 Binaurální slyšení a přenosová funkce hlavy (HRTF)**

V úvodu bylo zmíněno, že v přírodě můžeme nacházet mnoho důmyslných sluchových ústrojí, které jsou inspirací pro technické aplikace. Jednou z takových inspirací je zpracování a detekce zvuku u člověka.

Člověk dokáže detekovat zvuk ve 3D prostoru za použití 1 páru senzorů, uší. Když toto uspořádání srovnáme s uniformními lineárními mikrofonními poli, je zřejmé, že toto pole detekci ve 3D prostoru vyhodnotit nedokáže. Jedním z důvodů, proč zkoumat lidský sluch, je možnost použití tohoto přístupu v oblasti humanoidních robotů a robotických aplikací, které se snaží svojí funkcionalitou k člověku přiblížit.

Ucho je uzpůsobené tak, aby zvuk přicházející z okolí dokázalo nejen zachytit, ale i vyfiltrovat. Je členěné na tři hlavní části.

Vnější ucho se skládá z ušního boltce a zvukovodu. Ušní boltce má funkci nejen filtrační, kdy jsou některé zvukové vlny odraženy či pohlceny, ale je také velmi citlivý na směr přicházejícího zvuku. Je to dáno dutinami poblíž vstupu zvukových vln do zvukovodu tvořícími velmi složité rezonátory parametricky závislé na směru přicházejícího zvuku [3].

Střední ucho obsahuje bubínek, který je rozezníván přicházejícím zvukem. Tyto rezonance jsou skrze středoušní kůstky přenášeny na části vnitřního ucha. Konkrétně na hlemýžď, který je vyplněn tekutinou, na kterém je připojený sluchový nerv. Díky Cortiho orgánu, jsou změny tlaku v tekutině převáděny na impulsy, které putují sluchovým nervem do mozku.

Jak již bylo zmíněno, pro lokalizaci je stěžejní příjem signálu spojený s filtrováním. Filtrování (relativní zesílení, útlum a zpoždování frekvencí) zvuku hlavou a vnějším uchem zajistí informaci o poloze zdroje zvuku prostřednictvím diferencí ve frekvenčním spektru mezi ušima. Toto filtrování s dopadem na polohu je explicitně popsáno přenosovou funkcí hlavy (Head Related Transfer Function, množné číslo HRTFs) [3].

HRTF se dá také jednoduše popsat jako přenosová funkce, která popisuje přenos mezi zdrojem zvuku a vnitřním uchem. Vnímání zvuku jako prostorového jevu umožňuje binaurální slyšení. To znamená, že člověk vnímá zvuk oběma ušima. Proto pro každé ucho existuje jiná HRTF.

Je důležité zdůraznit, že se přenosové funkce s pozicí zdroje zvuku mění. Pro každou polohu zdroje zvuku existuje jiná HRTF. Je to způsobeno tím, že při změně pozice zdroje dopadá signál na uši a tělo pod jiným úhlem a tím je ovlivněno zmíněné zesilování, útlum a zpoždování frekvencí, které je stěžejní pro správnou detekci.

HRTFs jsou získávány experimentálně z měření na figuríně za použití dvou mikrofonů nebo přímo na člověku. Experimentálně zjištěné HRTFs se dále používají na virtuální aplikace (prostorový zvuk ve sluchátkách) [5]. Při použití HRTF levého a pravého ucha na detekovaný signál vznikne binaurální signál. Tento signál nese informaci o poloze zdroje, proto z něho lze zjistit horizontální (azimut) i vertikální úhel (elevace) přicházejícího signálu.

Pro určení azimutu jsou nejpoužívanější metody v anglické literatuře označované jako Interural Time Differences, meziušní časové difference (ITDs) a Interural Level Differences, meziušní difference v intenzitě (ILDs). Rozdíly mezi HRTFs levého a pravého ucha popisují právě tyto metody. Rozdíly jsou závislé na úhlu, odkud signál přichází a na frekvenci signálu. Metody využívají faktu, že zvuk dopadá na jednotlivé uši se vzájemným časovým zpožděním u krátkodobých signálů a s fázovým posunutím v periodických dlouhodobých signálech, pokud nepřichází z přímého směru.

Pro každé ucho můžeme definovat přicházející signál  $S_{levé}$  a  $S_{pravé}$ . Po aplikaci krátkodobé Fourierovy transformace (STFT), která provádí časově-frekvenční analýzu, máme signál  $S_{levé}$  a  $S_{pravé}$  převeden do časově-frekvenční oblasti. Při použití ITD a ILD na tyto signály získáme časovou diferencí  $\Delta T(t, f)$  a diferencí v intenzitě  $\Delta L(t, f)$ .

$$\Delta L(t, f) = 20 \log_{10} \left| \frac{S_{pravé}(t, f)}{S_{levé}(t, f)} \right| \quad (1)$$

$$\Delta P(t, f) = \arg\left(\frac{S_{\text{pravé}}(t, f)}{S_{\text{levé}}(t, f)}\right) + 2\pi p \quad (2)$$

kde  $\Delta P(t, f)$  vyjadřuje fázovou diferenci, která se převede na časovou,  $p$  je číselný parametr.

Tyto hodnoty jsou stále funkcí frekvence a času. Pro získání azimutu z těchto signálů, musíme použít naměřená HRTFs data pro různé azimuty. ITD a ILD jsou v případě použití HRTFs dat pro pravé a levé ucho závislé na frekvenci a azimutu. Tím vznikají nová data, v kterých lze najít pro diference závislé na čase a frekvenci, odpovídající data závislá na frekvenci a azimutu. Detailní popis v [6].

Ve zdroji [3] je určena maximální časová diference a mezní frekvence přijímaného signálu, pro které dokáže člověk jednoznačně určit polohu zdroje zvuku. Hodnota mezní frekvence  $f_{mez}$  pro průměrnou vzdálenost uší  $d = 0,2$  m a rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě  $t = 20$  °C je  $c = 343$  m/s. Při použití rovnice (3) vychází mezní frekvence  $f_{mez} = 857,5$  Hz.

$$f_{mez} = \frac{c}{2 \cdot d} \quad (3)$$

Toto omezení v reálné situaci nemusí platit, protože vnímání zvuku je velmi komplexní záležitostí a ovlivňuje ji více faktorů než jen vzdálenost mezi ušima.

Z důvodu toho, že pro robotickou hlavu neznáme přenosovou funkci HRTF a její experimentální získání není v možnostech této práce, nebude tato metoda zahrnuta do realizovaných metod.

## 2.1.2 Metody založené na stanovení časových zpoždění (TDOA)

Pro metody relativních časových zpoždění se používá zkratka TDOA (Time Difference of Arrival). TDOA má dvě části. Nejprve se vypočítá časové zpoždění TD (Time Delay) mezi mikrofonním párem. TD je rozdíl mezi časem, který urazí zvuk od zdroje ke každému z mikrofonů. Díky tomuto zpoždění lze následně vyhodnotit úhel přicházejícího signálu DOA (Direction of Arrival).

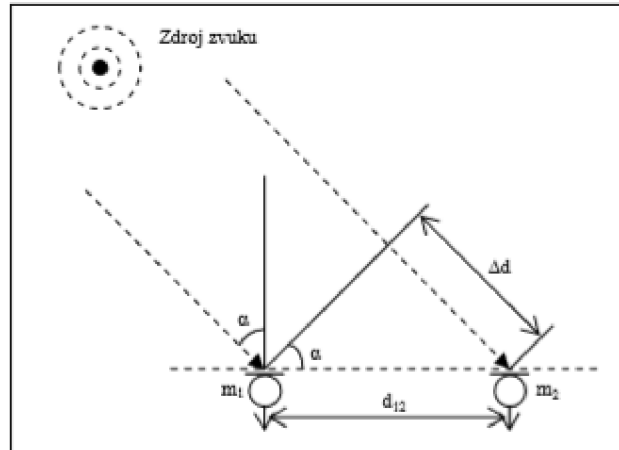
Časové zpoždění je vypočítáno pomocí metod, které jsou založené na korelační analýze, kdy jsou příchozí signály vzájemně porovnány. Výsledkem je posun ve vzorcích mezi referenčním signálem na prvním mikrofону a signálem na druhém mikrofону. Následně je díky známé vzorkovací frekvenci přepočten posun ve vzorcích na časové zpoždění. Podrobně je tato metoda popsána v následující části.

Při použití vypočítaného časového zpoždění a známé geometrie mikrofonního pole, lze vypočítat DOA. Tato metoda je díky své univerzálnosti a nenáročnosti hojně využívána. Její výhodou jsou malé nároky na výpočetní kapacitu a možnosti lokalizace různého spektra signálů.

Z důvodu definování geometrického problému příjmu zvuku, bude nejprve rozebrána geometrie mikrofonního pole a vyhodnocení DOA. Poté bude zmíněna metoda pro výpočet časového zpoždění mezi mikrofóny.

## Vyhodnocení směru přicházejícího signálu (DOA)

Při vyhodnocení se předpokládá, že zvuková vlna se šíří jako rovinná. Toto zjednodušení platí, když se zdroj zvuku nachází ve větší vzdálenosti, než je vzájemná vzdálenost mikrofonů [3]. Vztahy pro určení DOA se výrazně zjednoduší. Viz. Obrázek 2. Dále považujeme prostředí, ve kterém se zvuk šíří, jako homogenní.



Obrázek 2 - Akustická vlna dopadající na mikrofonní pár [3]

Uvažujme pole o dvou mikrofonech. Signál přicházející na mikrofon 1 označíme jako  $s_1(t)$  a signál přicházející na mikrofon 2 označíme jako  $s_2(t)$ . Z obrázku 2 je patrné, že signál  $s_1(t)$  je časově posunutý vůči signálu  $s_2(t)$ . Tento časový rozdíl je označen jako  $\Delta t_{12}$ . Signál  $s_2(t)$  tedy musí urazit delší vzdálenost. Rozdíl v uražených vzdálenostech je definován jako  $\Delta d_{12}$ , které získáme ze vztahu (4).

$$\Delta d_{12} = \Delta t_{12} c \quad (4)$$

Kde  $c$  je rychlost zvuku v prostředí.

Při známé vzdálenosti mezi mikrofony je určen úhel přicházejícího signálu  $\alpha$  ze vztahu (5).

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\Delta d}{d_{12}}\right) = \arcsin\left(\frac{\Delta t_{12} \cdot c}{d_{12}}\right) \quad (5)$$

Toto vyhodnocení platí pro jakýkoli mikrofonní pár nacházející se v mikrofonním poli. Přesnost detekce lze zvýšit přidáním několika dalších mikrofonů, kdy je pro každý pár vypočítána časová diference a tím pádem i úhel  $\alpha$ . Výsledný úhel je roven průměru získaných úhlů.

V závislosti na mikrofonním poli jsou vyhodnoceny úhly v horizontálním či vertikálním směru.

Pro určení souřadnic zdroje ve 2D prostoru je zapotřebí minimálně tři mikrofonů. Z nich se dají vytvořit 3 mikrofonní páry. Možné polohy zdroje zvuku leží na hyperbolách. Proto se toto vyhodnocení nazývá hyperbolickou lokalizací.

## Získání časového zpoždění (TD)

V předešlé části byl ukázaný výpočet DOA při známé hodnotě časového zpoždění  $\Delta t_{12}$ . K určení tohoto zpoždění je nutné použít metodu křížové korelace. (CC – Cross Correlation). Proto bude v následující části vysvětlen její princip.

CC určuje podobnost dvou signálů. Signály  $s_1(t)$  a  $s_2(t)$  jsou vzorkováním převedené na signály  $s_1(n)$  a signál  $s_2(n)$ . Kde  $n = (1, 2, \dots, N)$  a  $N$  označuje počet vzorků v signálu. Pak je CC těchto signálů určena dle následujícího vztahu použitého v [10].

$$R_{12}(k) = \sum_{n=1}^{N-|k|} (s_1(n) \cdot s_2(n+k)) \quad (6)$$

Kde  $k = (-N-1, \dots, 0, \dots, N-1)$  a vektor  $R_{12}(k)$  obsahuje koeficienty podobnosti (korelace) odpovídající příslušnému posunutí  $k$ . Při posunutí, kdy jsou si signály nejvíce podobné, bude hodnota koeficientu nejvyšší. Tato hodnota pro nejvyšší koeficient  $R_{12}$  určuje posunutí signálu  $s_2$  vůči signálu  $s_1$  ve vzorcích. Podělením této hodnoty vzorkovací frekvencí  $f_{vz}$  získáme hledané časové zpoždění.

$$\Delta t_{12} = \arg\left(\max(R_{12}(k))\right) \frac{1}{f_{vz}} \quad (7)$$

CC se vyhodnocuje buď v časové nebo ve frekvenční doméně. Algoritmus výše je pro časovou oblast. Ve frekvenční oblasti se využívá rychlé Fourierovy transformace (FFT).

### 2.1.3 Metody tvarování přijímací charakteristiky

Pro metody se používá název beamformer, v českém překladu tvarovač.

Beamformery jsou založené na sledování spektra signálu. Metoda hledá ve sledované oblasti směr, ve kterém je hladina akustické energie nejvyšší [10].

Proto hledaný úhel odpovídá nejvyšší hladině této energie. Metody tvarují, mění přijímací charakteristiku. Charakteristika je ovlivněna váhováním, kdy se mění zisky z prostředí pro jednotlivé mikrofony, a tím se zlepšuje přijímací charakteristika pole. To znamená, že pro žádané směry jsou požadované frekvence posíleny, v ostatních směrech jsou tlumeny.

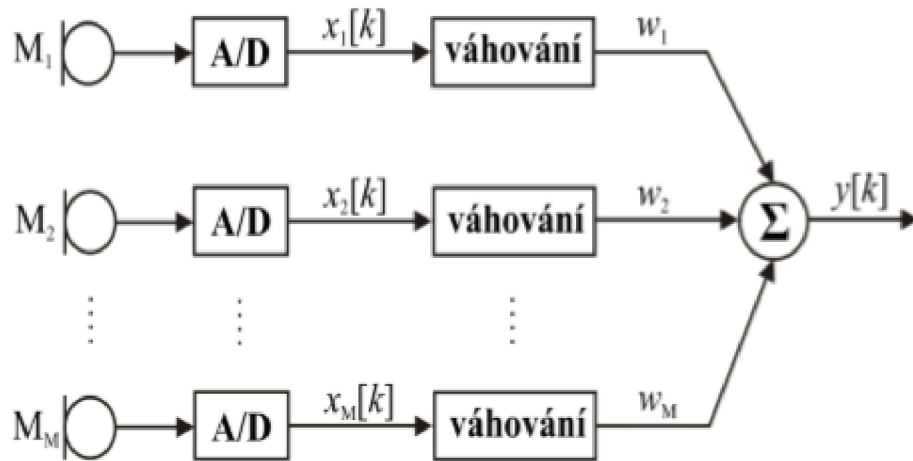
Beamformery můžeme rozdělit na konvenční a adaptivní.

Konvenční, jsou ty, které v průběhu přijímání a vyhodnocování nemohou měnit své nastavení. Mají pevné nastavení vzdáleností a vah.

Adaptivní neboli přizpůsobivé metody, mohou své parametry měnit v závislosti na přijímaném signálu. Nejznámějším zástupcem konvenčních beamformerů je beamformer typu Delay and Sum (DAS). Mezi adaptivní se řadí například Multiple signal classification beamformer (MUSIC).

## Delay and Sum beamformer (DAS)

V překladu zkratka znamená tvarovač typu zpoždění a součet. Název v podstatě popisuje funkcionalitu. Přijímaný signál je zpoždován a následně sčítán. Zpoždování určuje nastavení jednotlivých vah, kdy pro každý signál je vypočítané časové zpoždění odpovídající natočení směrové charakteristiky pole [3]. Toto popisuje Obrázek 3.



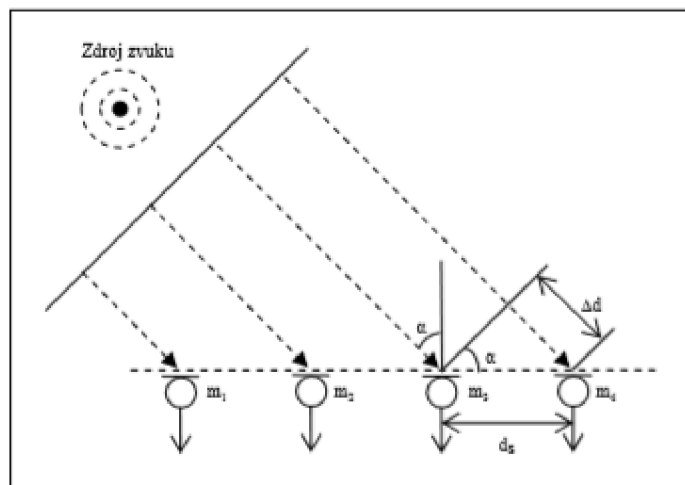
Obrázek 3 - Schéma DAS Beamformer [10]

Výstupní signál  $y(k)$  je určený následujícím vztahem.

$$y(k) = \sum_{i=1}^M x_i(k - h_i) \quad (8)$$

Kde  $x_i(k)$  jsou signály jednotlivých mikrofonů,  $i$  je index mikrofonu a  $M$  je jejich počet. Nastavení vah je označeno  $h_i$ . Obecně je toto nastavení určeno geometrií mikrofonního pole, kdy je pro požadovaný směr vypočítáno časové zpoždění mezi referenčním signálem a signály ostatními.

Uvedený algoritmus bude uvažován pro lineární mikrofonní pole na Obrázek 4.



Obrázek 4 - Uniformní lineární mikrofonní pole [3]

Pro přijímané signály označené jako  $x_i(k)$  platí, že na mikrofony přichází stejný signál, který je pouze časově posunutý. Toto zpoždění je popsáno následujícím vztahem.

$$\tau_i = \frac{\sin \alpha \cdot d_s}{c} \cdot (i - 1) \quad (9)$$

Kde  $i$  označuje index mikrofonu,  $\tau_i$  je časové zpoždění  $i$ -tého signálu závislé na úhlu  $\alpha$ ,  $\alpha$  označuje natočení směrové charakteristiky a  $d_s$  je vzdálenost mezi dvěma sousedními mikrofony. Zpoždění je převedeno na rozdíl ve vzorcích.

Signál na prvním mikrofonu  $x_1(t)$  je definovaný jak referenční. Signály na ostatních mikrofonech jsou zpožděvané. Poté jsou sečteny a vzniká jeden výstupní signál, který odpovídá úhlu směrové charakteristiky  $\alpha$ .

Sledovanou hodnotou je úroveň signálu pro každý možný úhel  $\alpha$ . Tato úroveň je definovaná dle následujícího vztahu.

$$X_{RMS}(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{\alpha}(i)^2} \quad (10)$$

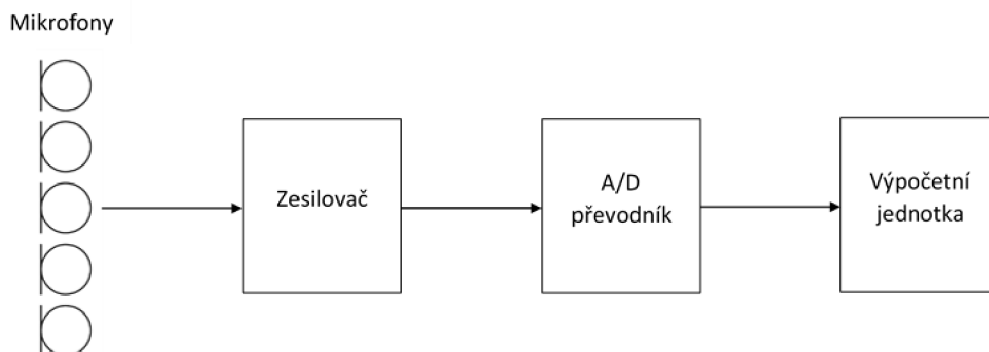
kde  $X_{RMS}(\alpha)$  je střední hodnota signálu (RMS) odpovídající úhlu  $\alpha$  a  $N$  je počet vzorků. Tyto vztahy jsou použité ve zdroji [3].

Pro nalezení DOA musí být algoritmus použit několikrát za sebou, podle velikosti minimálního sledovaného kroku. Pokud se bude sledovat úhel v rozmezí od  $-90^\circ$  do  $90^\circ$  s krokem  $1^\circ$ , musí se tento algoritmus provést 181krát. Pro každý úhel natočení charakteristiky  $\alpha$  vznikne jeden výstupní signál  $y_{\alpha}(i)$  a tomu odpovídající střední hodnota  $X_{RMS}(\alpha)$ . Index maximální hodnoty  $X_{RMS}(\alpha)$  odpovídá hledanému DOA.

Signál může být převeden do frekvenční oblasti pomocí rychlé Fourierovy transformace, kde je využito frekvenční váhování. Nastavení jednotlivých vah jsou frekvenčně závislá a charakteristika mikrofonního pole se s tímto nastavením mění. Popis je v [7].

## 2.2 Hardware

Nejprve bude zmíněn přijímací řetězec. Poté budou jednotlivé části samostatně rozebrány.



Obrázek 5 - Schéma hardwarové části



Akustický signál z prostředí zaznamenávají mikrofonní moduly, které ho převádí na elektrický. Signál je zesílen zesilovačem a převeden z analogového na digitální. Tento převod zajišťuje A/D převodník, který provede vzorkování dat. To je určeno zvolením vhodné vzorkovací frekvence.

Hodnotu vhodné vzorkovací frekvence určuje Shannon-Nyquistův teorém.

$$f_{vz} \geq f_{max} \cdot 2 \quad (11)$$

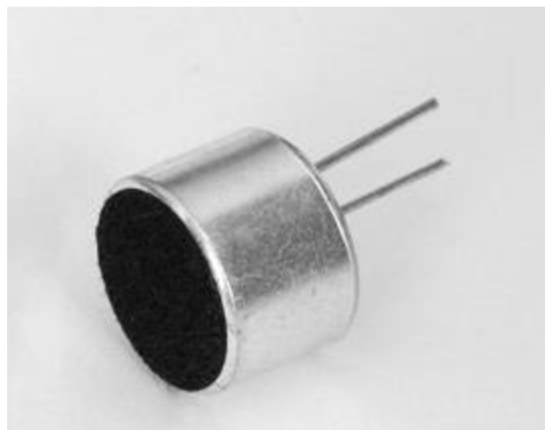
Kde  $f_{max}$  je maximální frekvence vzorkovaného signálu. Pokud tato podmínka není splněna, dochází k frekvenčnímu aliasingu. [10] Jev, kdy v signálu vzniknou frekvence, které v přijímaném signálu nebyly zastoupené.

Digitální signál je přiveden na výpočetní jednotku, kde dochází ke zpracování dat a k následnému vyhodnocení DOA.

### 2.2.1 Mikrofonní moduly

Mikrofony zaznamenávají zvukové (akustické) vlny a převádí je na signál elektrický reprezentovaný napětím. Tento převod je realizován několika způsoby, a proto se mikrofony rozdělují v závislosti na tomto parametru. Další důležitou vlastností je citlivost na směr přicházejícího signálu, která je závislá na charakteru použití mikrofону. Při všesměrové charakteristice je tato citlivost stejná pro každý směr. V současné době je vytvořeno mnoho druhů mikrofónů. Mezi ně patří mikrofony kondenzátorové, které zaznamenávají zvuk změnou kapacity kondenzátoru.

Do oblasti kondenzátorových mikrofónů patří mikrofony elektretové, které mají široké využití především díky malým rozměrům (do 2 mm) při dobré kvalitě zaznamenaného zvuku. [8]



Obrázek 6 - Elektretový mikrofón

Elektretové kondenzátorové mikrofony jsou založené na změně napětí na kondenzátoru. Přicházející signál rozeznívá membránu mikrofónu, která je připojena na elektrodu kondenzátoru. Díky tomu se v závislosti na kmitcích membrány mění jeho kapacita a tím se mění napětí mezi deskami. Na deskách kondenzátoru musí být

konstantní náboj  $Q$ , aby se při změně kapacity změnilo i napětí. Tento náboj v elektretových mikrofonech zajišťuje elektret, materiál, který je neustále nabitý. Z toho důvodu nemusí být elektretové mikrofony napájeny z externího zdroje. Výsledné napětí je třeba několikanásobně zvýšit, proto je nutné použít předzesilovač, který napájecí napětí vyžaduje.

## 2.2.2 A/D převodník a výpočetní jednotka

Dále musí být vybrán vhodný A/D převodník a výpočetní jednotka. Na tyto komponenty jsou kladeny nároky v podobě vzájemné kompatibility, dostatečného počtu vstupů, vysokého výpočetního výkonu a bezúdržbové funkčnosti. Uvažuje si i to, kdy jsou převodník a výpočetní jednotka integrovány do jednoho zařízení.

Pro tuto část byly zvoleny dvě možné konfigurace. První je měřicí karta a počítač, druhá učební platforma Arduino.

### Měřicí karta HUMUSOFT MF 624

Tato karta byla vybrána z důvodu toho, že se nachází v laboratoři MechLab a má velmi dobré vlastnosti pro práci v real-time i pro záznam dat.

Mezi základní vlastnosti patří 8 analogových 14 – bitových vstupů, 8 digitálních vstupů, tomu odpovídající počet výstupů. Kompatibilita s prostředím Simulink, konkrétně se Simulink Desktop Real-Time toolboxem. Ten umožňuje práci s daty v reálném čase. Může se jednat o nahrávání dat přes různá zařízení nebo o řízení či vyhodnocení v real-time. Nabízí maximální vzorkovací frekvenci 88 kHz pro 8 kanálů. Je plně kompatibilní s operačním systémem Windows. Její další výhodou je, že uvažovaná prostředí pro robotickou hlavu jsou Matlab a Simulink.

### Platforma Arduino

Arduino je učební opensource platforma. Skládá se z jednoduché desky a vývojového prostředí. Je poháněno mikrokontrolery od firmy Atmel. Programová část byla založena na Processing, což je programovací jazyk s vlastním editorem, určený k výuce programování. [9] Díky velkému množství desek a přídatných modulů si každý může sestavit jednodeskový počítač na své vlastní využití. Mezi tyto jednodeskové počítače patří Arduino UNO a Arduino MEGA. Následující tabulka srovnává vlastnosti těchto produktů.

**Tabulka 1 - Srovnání parametrů Arduino**

	Arduino Uno	Arduino Mega2560
Mikroprocesor	ATmega2560	ATmega328P
Výkon procesoru	16 MHz	16 MHz
SRAM	2 kB	8 kB
Počet analog vstupů	6	16
Flash paměť	32 kB	256 kB

Avšak problémem u každého z nich je omezená paměť a vzorkovací frekvence. Jednou z možností je vzorkovat data přes Arduino a posílat je po sériové lince do PC. Zde

je nebezpečí toho, že komunikace nebude dost rychlá. Další možností je uložit určitý objem dat a ten poslat do počítače po sériové lince. Zde je opět limit v podobě paměti. Při vzorkování 20 kHz a 8-bitovém zápise, bude objem dat z jednoho mikrofону za jednu vteřinu 20 kB.

## 3 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ

### 3.1 Cíle

Návrh systému pro lokalizaci zvuku s možnou implementací do real-time. Systému a všechny komponenty musí zohledňovat jeho využití.

Cílem je navrhnout, sestavit a otestovat systém, který bude zaznamenávat zvukové vjemy a vypočítá DOA. Předpokládaný zvuk bude vytvořen luskáním, tleskáním či hlasem. Výstupem by mělo být zhodnocení přesnosti pro jednotlivé zvukové vjemy a vybrání jednoho způsobu, na který systém bude velmi dobře reagovat. Dále bude výstupem celkové otestování systému z hlediska rozmístění senzorů, vzdáleností zdroje a celkové robustnosti. Vše bude zastřešovat finální aplikace. V aplikaci bude možné měnit parametry a v závislosti na nich se vyhodnotí předem naměřená data pro konkrétní konfiguraci. Použitý přístup bude předlohou pro real-time aplikaci.

### 3.2 Kroky k dosažení cílů

- Výběr vhodného hardware
- Sestavení konstrukce na uchycení mikrofونů, propojení komponent a ověření základní funkcionality
- Naprogramování vybraných metod
- Otestování metod a použitého hardware
- Vytvoření finální aplikace

### 3.3 Zhodnocení rešeršní části

Zde budou zhodnocené a vybrané výstupy rešeršní části, které budou realizované v části praktické.

#### Mikrofony

Pro záznam signálu byly vybrány mikrofonní moduly RobotDyn s elektretovými mikrofony z důvodu cenové a materiální dostupnosti. Výhodou je kompatibilita s měřicí kartou i s platformou Arduino.

#### A/D převodník a výpočetní jednotka

Koncepčně nejpríjetelnější řešení bylo použít měřicí kartu HUMUSOFT MF 624, která se nachází v laboratoři, a která má vyhovující parametry pro potřeby práce. Ve srovnání s moduly Arduino v kapitole 2.2.2 má karta v kombinaci s počítačem výrazně vyšší výpočetní výkon i paměť.

K porovnání poslouží parametry notebooku, na kterém byla vyhodnocena naměřená data. Jedná se o ASUS s dvoujádrovým procesorem Intel CORE i5 o výkonu 2,20 GHz a paměti RAM 8 GB. Výpočetní výkon je tedy ve srovnání s Arduino Mega2560 137krát vyšší a velikost operační paměť je  $1 \times 10^6$  větší.

Zmíněnou výhodou je také kompatibilita s prostředím Simulink, které je součástí programu MATLAB. Nahrávání dat bude proto realizované v prostředí Simulink bez nutnosti úpravy.

### **Vybrané metody**

Pro realizaci byly vybrány metody TDOA založené na křížové korelaci a DAS Beamformer v časové oblasti. Přístup a získané znalosti mohou být dále využity pro realizaci v real time. Metody byly naprogramovány v MATLABu s využitím Phased Array System Toolbox™ (PAS). Zmíněné algoritmy byly uvažovány pro lineární uniformní pole, skrze které byly rozšířeny pro další rozmístění.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Následující kapitola se bude zabývat praktickou realizací systému pro detekci zvuku. Experimentální část přímo navazuje na řešení. Vybrané algoritmy a uvažované hardwarové řešení jsou v ní dále rozvíjeny. Přístup k problému musí být uvažován v kontextu cílů práce, které jsou zmíněné v kapitole 3.

Pro výpočty se bude uvažovat hodnota rychlosti zvuku v prostředí jako konstantní.

$$c = 331,57 + (0,607 \cdot T) \quad (12)$$

Při teplotě  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , je hodnota  $c = 343,7 \text{ ms}^{-1}$ .

Mezi hlavní problémy detekce lze zařadit rušivé prostředí, omezenou vzorkovací frekvenci, možnosti mikrofonních modulů a kvalita zaznamenaného signálu. Dále odrazy od stěn, dozvuky, více zdrojů zvuku atd. Z důvodu velké komplexnosti problému je třeba provést zjednodušení, která celý proces výrazně zrychlí a zároveň významně neovlivní přesnost detekce.

### 4.1 Použitý hardware

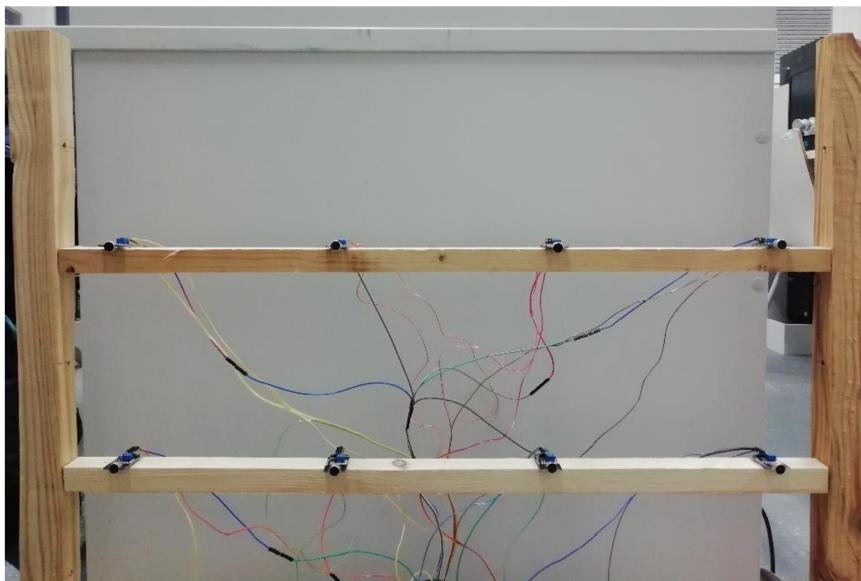
Měřicí řetězec vychází z Obrázek 5. Signál je zachycen pomocí mikrofonních modulů RobotDyn s elektretovým mikrofonom a výkonovým zesilovačem LM358.



Obrázek 7 - Mikrofonní modul RobotDyn

Tento modul umožňuje nastavit detekci požadované hladiny zvuku manuálním potenciometrem. Informace je přenášena přes digitální výstup označený DO (Digital Output). Signál je vedený z analogového výstupu AO (Analog Output) pomocí kabelů do měřicí karty. Napájení je přivedené na svorku označenou VCC (Voltage Common Collector), která označuje napájení přivedené na kolektor tranzistoru. Pro modul je toto napájení definováno jako napájecí napětí výkonového zesilovače, které bylo zvoleno na 5 V. Svorka GND (země) označuje uzemnění. Ukázka zachyceného signálu je na obrázku 9.

Mikrofony jsou uchycené na dřevěné konstrukci, která nabízí různé možnosti rozmístění. Konstrukce a umístění mikrofonů je ukázáno na obrázku níže.



**Obrázek 8 - stojan s mikrofonním rovinným polem**

Měřicí karta zpracovává přivedený signál podle vzorkovací frekvence nastavené v počítači. Komunikaci mezi kartou a PC zajišťuje zmíněné prostředí Simulink. Pro ovládání byly použity bločky Digital Output ze Simulink Desktop Real Time Toolboxu.

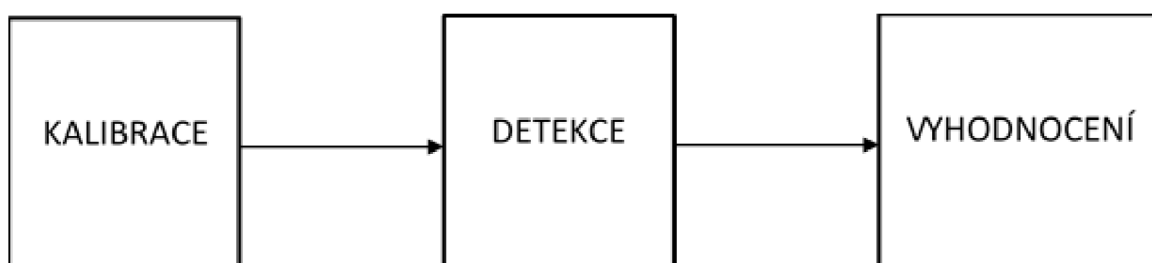
Měřicí karta a záznam dat do počítače byl testován od frekvence 10 kHz po frekvenci 80 kHz pro 4 kanály. Jako limitní byla stanovena vzorkovací frekvence 40 kHz. Při vyšších vzorkovacích frekvencích bylo zjištěno velké zatížení počítače a nedostatečná rychlost v komunikaci mezi PC a kartou. Nahraný signál byl uložen do PC jako třída Time Series, s datovým typem double. Uložená data byla dále zpracována vyhodnocovacími algoritmy, které jsou vysvětlené v následující kapitole 4.2.

## 4.2 Naprogramované metody

Tato kapitola se zabývá popisem naprogramovaných metod. Nejprve je zmíněn celkový popis algoritmu. Následně jsou jednotlivé části dále vysvětleny.

### 4.2.1 Popis celého algoritmu

Algoritmus byl rozdělen na hlavní 3 části. Viz. Obrázek 9.



**Obrázek 9 - Schéma algoritmu vyhodnocení DOA**

Krok 1 je nazvaný Kalibrace. V tomto kroku se vyhodnocují data z měřeného prostředí. Mikrofony několik vteřin detekují zvuk v prostředí, kde se provádí vyhodnocení. Zaznamenaný je šum z okolí. Díky této kalibraci je získána hladina detekce

pro každý mikrofon. Krok 2 je nazvaný Detekce. V tomto kroku se postupně z celkového zaznamenaného signálu vybere oblast o velikosti několika milisekund, která přesně odpovídá první zvukové vlně nad hladinou detekce, kterou každý z mikrofonů zachytil. Pro takto upravený signál následuje vyhodnocovací algoritmus v kroku 3. Zde jsou použité metody vybrané v rešeršní části. Zmíněné schéma

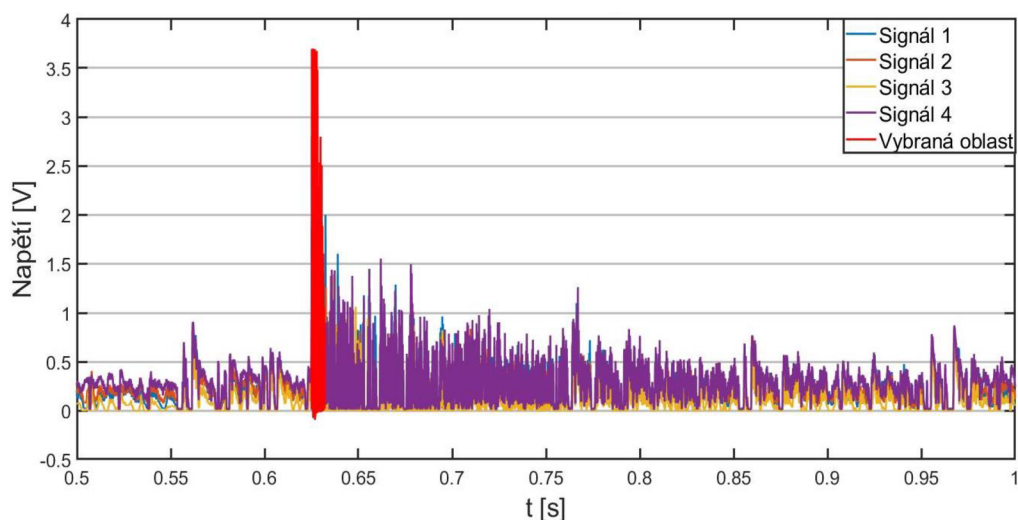
## 4.2.2 Kalibrace a detekce prvního překročení hladiny

Určení hladiny detekce je založené na získání maxima signálu z každého mikrofonu. K tomu je použita funkce max, která určí nejvyšší hodnotu obsaženou ve vektoru dat. Každý signál lze definovat jako vektor o velikosti  $N \times 1$ . Kde  $N$  je počet vzorků závislý na vzorkovací frekvenci a času. Pro každý signál je tedy určena hladina detekce, která je zapsaná do sloupcového vektoru o velikosti  $M \times 1$ . Kde  $M$  je počet mikrofonů.

Následuje detekce. Na obrázcích na konci podkapitoly jsou názorně vidět jednotlivé fáze výběru dat. Vstupem je hladina detekce. Následně je v signálu detekováno první překročení hladiny. Je získán index pro tuto hodnotu a poté je vybraná dostatečná oblast v okolí tohoto indexu. Vybraná oblast je pro všechny signály stejná. V Obrázek 10 je označena červeně. Následně je v pro každý signál detekované první překročení hladiny detekce. Tuto část popisuje obrázek 10. Vidíme, že oblast vybraná pro tento krok je v rozsahu přibližně 8 ms. Tato hodnota byla zvolena, aby byl v oblasti obsažený každý sledovaný signál.

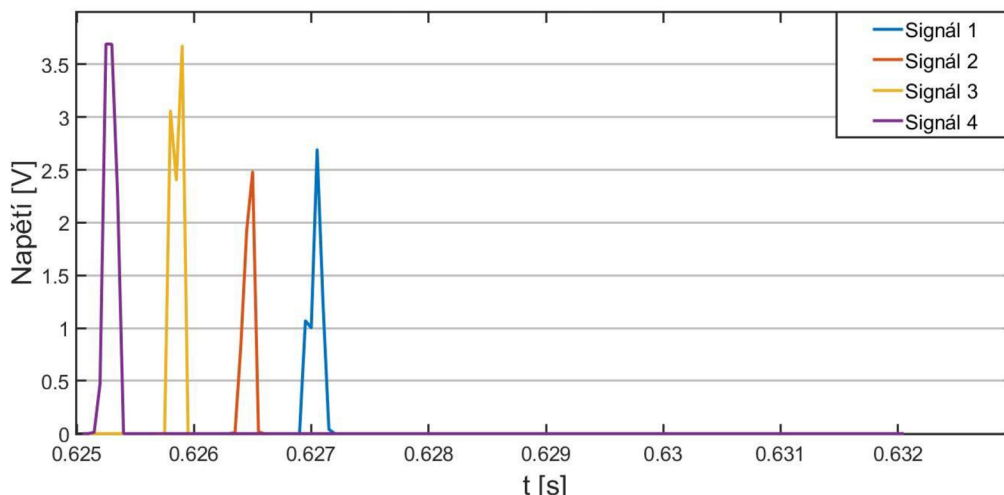
Tímto krokem se odstraní nechtěné jevy v podobě dozvuků a interferencí. Je také zabráněno vyhodnocování dalších oblastí překračujících hladinu detekce, které mohou přicházet z jiných úhlů v průběhu dalšího času.

Dochází také k výraznému zrychlení vyhodnocovacích algoritmů, kdy se vyhodnocovaná oblast z několika desítek tisíc vzorků sníží na oblast s desítkami či stovkami vzorků. Takto upravený signál je dále zpracován ve vyhodnocovací části. V případě, že není detekované překročení hladiny, výsledkem bude nulový signál a tím pádem nebude existovat žádné vyhodnocení.



Obrázek 10 - Nahraný signál s vybranou oblastí detekce





Obrázek 11 - První detekované překročení hladiny

### 4.2.3 TDOA

Tato metoda je popsána v rešeršní části a základ je proto stejný. Při psaní kódu byla využita funkce `xcorr`, která je součástí zmíněného PAS toolboxu. Pro detekované signály, které popsala kapitola 4.2.2 je vypočítána křížová korelace, následně je přes známou geometrii mikrofonního pole dopočítány DOA. Detailní popis následuje zde.

Vstupem funkce je matice mikrofonních signálů, které jsou v matici zapsané ve sloupcových vektorech. Prvnímu sloupci tedy náleží první signál.

#### Inicializace globálních proměnných

Jedná se o rychlost zvuku  $c$ , počet mikrofonů  $M$  a vzdálenost mezi nimi  $d$ . Tyto hodnoty jsou stejné pro všechny použité funkce, proto se výhodně mohou zařadit do globálních proměnných. Tyto proměnné jsou nadřazené a vidí je každá použitá funkce, proto se nemusí stále znovu a znovu definovat.

#### Inicializace proměnných pro záznam časových zpoždění a úhlů

Pro proměnné jsou definované nulové matice o velikosti, která bude potřena pro zápis dat.

#### Výpočet křížové korelace a získání časového zpoždění

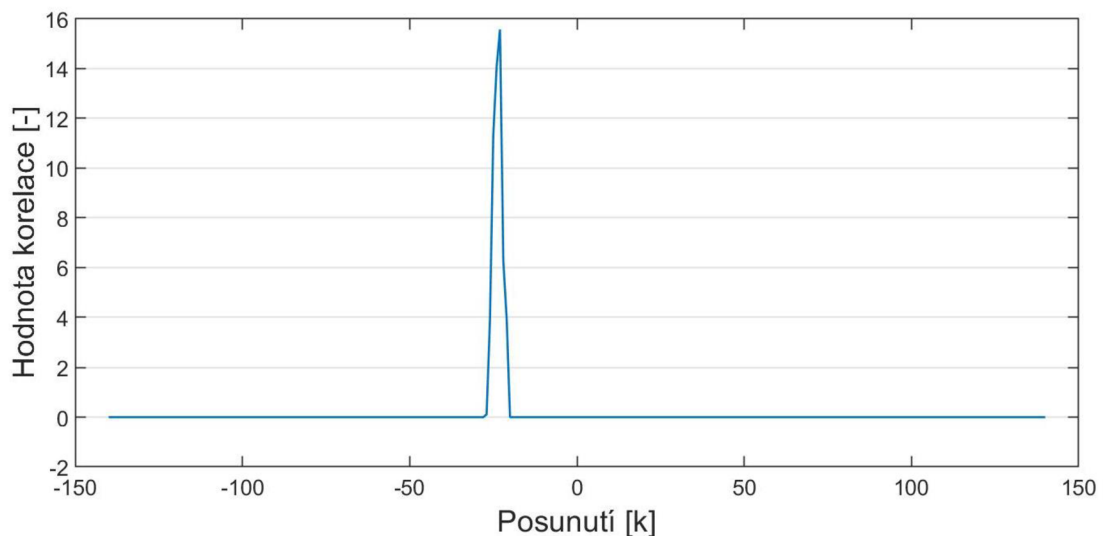
Všechny signály jsou porovnávány s referenčním signálem. Jako referenční signál je určen první sloupec v matici. Výstupem funkce `xcorr` je korelační vektor, získaný z rovnice (6) a vektor posunutí odpovídající korelačnímu vektoru. Při nalezení indexu maximální hodnoty v korelačním vektoru se pro index najde odpovídající hodnota ve vektoru posunutí. Tato hodnota určuje zpoždění ve vzorcích a podělením vzorkovací frekvencí je získáno časové zpoždění, které je zapsáno do vektoru časových zpoždění. Tento krok popisuje rovnice (7). Krok je zopakován pro všechna časová zpoždění mezi referenčním signálem a signály ostatními.

Zde bude následovat příklad výpočtu časového zpoždění. Nahraný signál je pro úhel  $-90^\circ$ . Vypočtená korelace bude mezi signály na mikrofonu 1 a mikrofonu 2, které mají mezi sebou vzdálenost  $d_{12} = 0,4$  m. Nejprve se určí podobnost signálů z křížové

korelace. Výsledný rozdíl ve vzorcích je  $k = -23$ . Pokud se signál 2 posune o -23 vzorků, tak je jeho podobnost se signálem 1 největší. Při vzorkovací frekvenci 20 kHz je výsledné časové zpoždění rovno.

$$t_{12} = k \cdot \frac{1}{f_{vz}} = -23 \cdot \frac{1}{20\,000} = -0.0012 \text{ s}$$

Korelační graf závislosti hodnoty korelace na vypočítaném posunutí je vykreslen v následujícím obrázku.



**Obrázek 12 - Graf korelace v závislosti na posunutí**

## Výpočet DOA

Pro určení DOA je použita geometrie lineárního mikrofonního pole. To popisuje rovnice (5). V reálném prostředí se může stát, že výsledný úhel vyjde s imaginární částí, což znamená, že pro konkrétní časové zpoždění není nalezeno řešení v reálných číslech. Proto jsou výsledné úhly kontrolovány a v případě, že mají imaginární složku, jsou vymazány z vektoru úhlů. Výsledný úhel je získán zprůměrováním hodnot z vektoru.

Pro vypočtené časové posunutí z předchozího kroku  $t_{12} = -0,0012 \text{ s}$  je díky známé vzdálenosti  $d_{12} = 0,4 \text{ m}$  dopočítán DOA  $\alpha$ .

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\Delta t_{12} \cdot c}{d_{12}}\right) = \arcsin\left(\frac{-0,0012 \cdot 343,7}{0,4}\right) = -81 \text{ [}^\circ\text{]}$$

### 4.2.4 DAS Beamformer

Jak již bylo zmíněné, metoda je programována v časové oblasti.

Vstupem do funkce je opět matice mikrofonních signálů. Následně je definovaný skenovací krok. Mikrofonní pole detekuje signály v oblasti od  $-90^\circ$  do  $90^\circ$ . Zvolený krok je  $1^\circ$ . Proto má vektor skenovaných úhlů velikost  $1 \times 181$ . Pro každý krok se bude opakovat následující algoritmus, to odpovídá 181 opakování.

## Zpoždění (Delay)

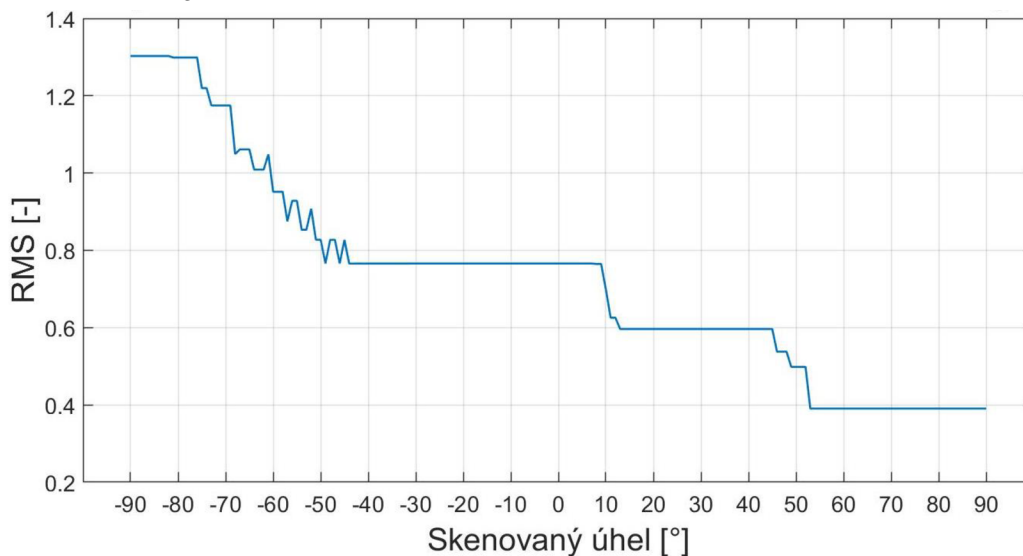
Prvním krokem je výpočet časového zpoždění pro každý mikrofonní pár v závislosti na velikosti skenovaného úhlu. Vynásobením vzorkovací frekvencí je zpoždění převedeno na rozdíl ve vzorcích.

Zde je problém v tom, že vypočítané časové zpoždění přesně neodpovídá posuvu. Časový rozdíl mezi sousedními dvěma vzorky je roven převrácené hodnotě vzorkovací frekvence. Pro frekvenci  $f_{vz} = 20\,000$  Hz odpovídá časový rozdíl  $t_{vz} = 0,5 \cdot 10^{-3}$  s. Posuv ve vzorcích musí být celé číslo, proto je zaokrouhlený na bližší hodnotu a touto operací je do výsledků zanesena chyba. Tato chyba se zmenšuje s vyšší vzorkovací frekvencí. Jak již bylo zmíněno, vzorkovací frekvence závisí na použitém hardware. S vyšší frekvencí roste počet vzorků a tím i velikost ukládaných data setů. Proto je nutné zvolit optimální kombinaci.

Když je znám posun ve vzorcích, tak jsou příslušné signály posunuty o tuto hodnotu. První signál je opět brán jako referenční a ostatní signály se vůči němu posouvají. Pro posunutí je zkoumán směr. Pokud je posunutí kladné, signál je posunut o příslušný počet vzorků doleva. Pokud je záporné, signál se posouvá doprava. Takto posunuté signály se zapisují do matice. Algoritmus je opakován pro každou kombinaci mezi referenčním signálem a signály ostatními a pro všechny skenované úhly.

## Součet (Sum)

V případě, že jsou zaznamenány signály pro všechny skenované úhly, jsou signály sečteny. Sčítané jsou signály pro konkrétní skenovaný úhel. Proto opět vznikne 181 signálů, z kterých bude následně vybrán DOA. Pro každý sečtený signál je určena střední hodnota RMS. Tato hodnota je zapsána do RMS matice, kde každá hodnota odpovídá jednomu skenovanému úhlu. Hledaný úhel odpovídá indexu maximální hodnoty této matice. Na Obrázek 13 je graf závislosti RMS hodnoty signálů na skenovaném úhlu. Nejvyšší hodnota označuje vypočítaný DOA. Výpočet je prováděn pro signál v kapitole 4.2.3 a to pro úhel  $-90^\circ$ . Výsledný vypočtený úhel je vyhodnocen jako úhel mezi  $-83^\circ$  a  $-90^\circ$ . Tato nejednoznačnost je způsobena zmíněnou chybou v zaokrouhlování vzorků, související s nízkou vzorkovací frekvencí.



Obrázek 13 - Vyhodnocení DOA metodou DAS Beamformer

## 4.3 Finální aplikace

Pro realizované metody byla vytvořena finální aplikace. K její realizaci bylo využito OOP (objektově orientované programování). Aplikace nabízí následující možnosti.

### Volba počtu a rozmístění mikrofonů

V aplikaci je možný výběr mezi dvěma testovanými uniformními mikrofonními poli. Jedná se o pole lineární a čtvercové. Lineární mikrofonní pole má proměnlivý počet mikrofonů. Čtvercové pole je pro čtyři mikrofony. Dále jsou na výběr dvě možnosti pro vzdálenosti a to 0,1 a 0,2 m. Měření z důvodu časové náročnosti nebyla realizována pro všechny možné kombinace, proto pro některé konfigurace a úhly není možné výpočet realizovat.

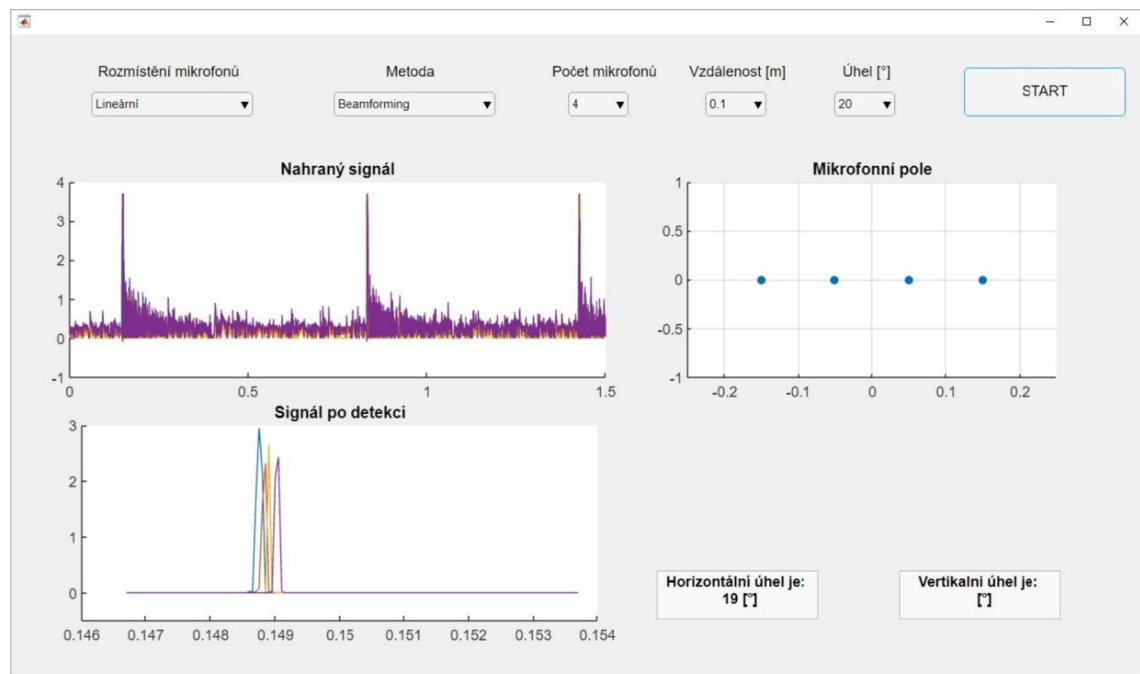
### Volba výpočetní metody

Výběr je možný mezi TDOA a DAS Beamformer.

### Výběr měřeného úhlu

K aplikaci jsou připojené soubory s daty. Jedná se o naměřená data, která byla analyzována v testovací části. Uživatel si proto může vybrat z nabízených dat některé úhly, pro které se bude vyhodnocení spouštět.

K zahájení výpočtu je nutné zmáčknout tlačítko start. V okně je následně vykreslen graf nahraného analyzovaného signálu. Dále je vykreslen graf prvního překročení hladiny detekce pro každý signál a graf vykreslující mikrofonní pole. Vypočtený úhel je zobrazený v textových oknech.



Obrázek 14 - Uživatelské rozhraní aplikace

## 5 TESTY A VÝSLEDKY

Testování bylo prováděno v laboratoři Mechlab. Prostředí není uzpůsobené na nahrávání zvuku a vlivem velkého počtu lidí, kteří se v laboratoři pohybují, je zde proměnlivá hladina okolního hluku. Proto je nutné výsledky posuzovat v tomto kontextu.

Průběh testů byl následující:

Nejprve byla odzkoušena funkčnost zapojení. Bylo ověřeno, že jsou mikrofony správně seřazeny a po přezkoumání zaznamenaného signálu, kdy byly všechny zaznamenané signály v pořádku, následovalo měření. Pro algoritmus je zásadní, zjistit hladinu detekce. Proto byl na začátku měření zaznamenan šum mikrofonů a hluk z okolí. Toto měření probíhalo po dobu dvou vteřin.

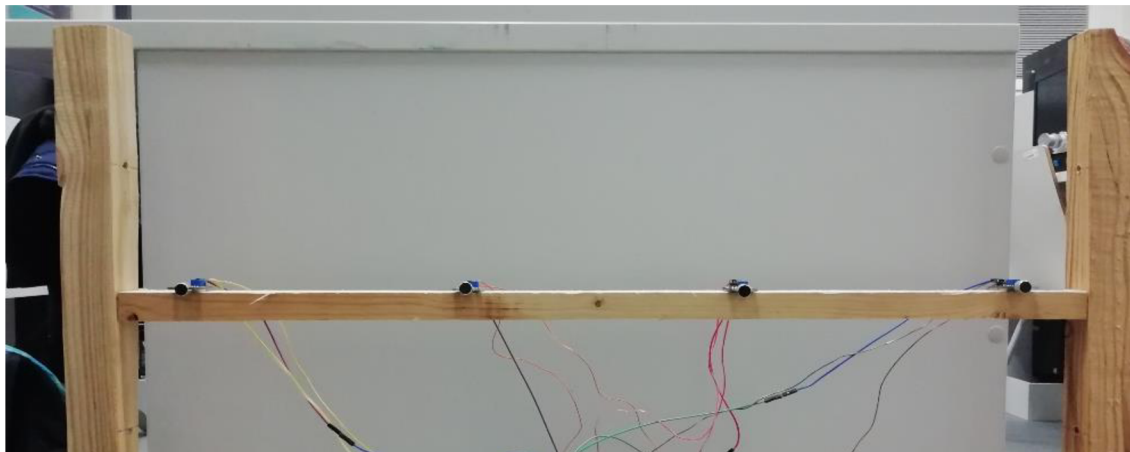
Pro testy byla zvolena vzorkovací frekvence  $f_{vz} = 20$  kHz a doba nahrávání  $t_n = 2$  s. Měření bylo ovládané přes PC programem Simulink. Pro mód záznamu byl nastaven external mode. Tento mód zajišťuje rychlejší komunikaci mezi Simulinkem a deskou počítače. Proto může být zápis dat realizován na vyšších vzorkovacích frekvencích, aniž by došlo k tomu, že procesor nestihne navzorkovaná data zpracovat a poslat do Simulinku. Problematický je u external modu záznam dat, kdy nebylo možné data zaznamenat přímo do souboru, ale pro uložení do souboru musela být využita funkce Simulation Data Inspector.

K měření byl využit dřevěný stojan na Obrázek 8 - stojan s mikrofonním rovinným polem na kterém byly umístěny mikrofonní moduly RobotDyn. Maximální počet modulů použitých na měření byly 4.

Analyzovaný zvuk byl realizován luskáním. V každé nahrávce bylo obsaženo několik lusknutí, které umožňují získat data pro více nezávislých měření. Tato data byla analyzována a výsledky byly zaznamenány do tabulky. Výsledná data použitá v následujících kapitolách jsou vždy aritmetickým průměrem  $\bar{x}$ . Tabulky obsahující výsledky všech měření, aritmetický průměr  $\bar{x}$  i chybu měření  $\Delta x$  se nachází v příloze.

### 5.1 Přesnost v závislosti na vzdálenosti mezi mikrofony

Měření bylo realizováno pro mikrofonní lineární pole se dvěma mikrofony.



Obrázek 15 - Uniformní lineární pole

Porovnávané vzdálenosti mezi sousedními mikrofony jsou

- $d_{s1} = 0,1$  m
- $d_{s2} = 0,2$  m

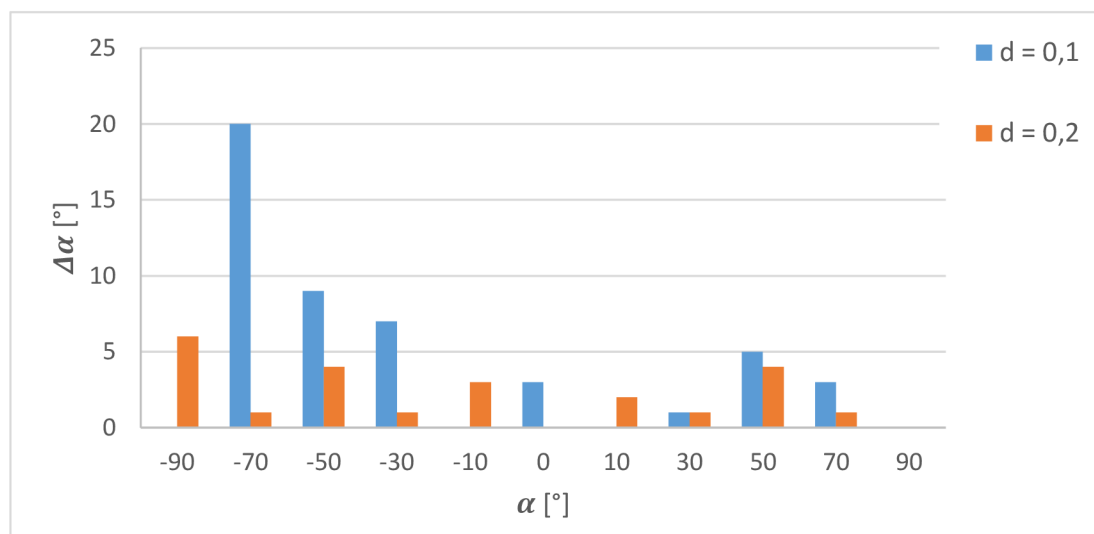
Sledovaný úhel  $\alpha$  je v intervalu od  $-90^\circ$  do  $90^\circ$  s krokem  $20^\circ$ . Data pro  $d_{s1} = 0,1$  m jsou průměrem  $\bar{x}$  pro tři nezávislá měření z tabulky C a pro  $d_{s2} = 0,2$  m z tabulky D v příloze.

**Tabulka 2 - Výsledky měření pro vliv vzdálenosti mezi mikrofony**

$\alpha$ [°]	$\alpha_{TDOA}$ [°]		$\alpha_{BEAM}$ [°]	
	$d_{s1}$	$d_{s2}$	$d_{s1}$	$d_{s2}$
-90	-90	-88	-90	-90
-70	-80	-71	-90	-90
-50	-59	-57	-90	-56
-30	-37	-33	-38	-33
-10	-10	-14	-25	-12
0	-3	5	-15	4
10	10	7	15	12
30	31	27	40	35
50	55	48	55	58
70	67	71	75	76
90	90	75	80	81

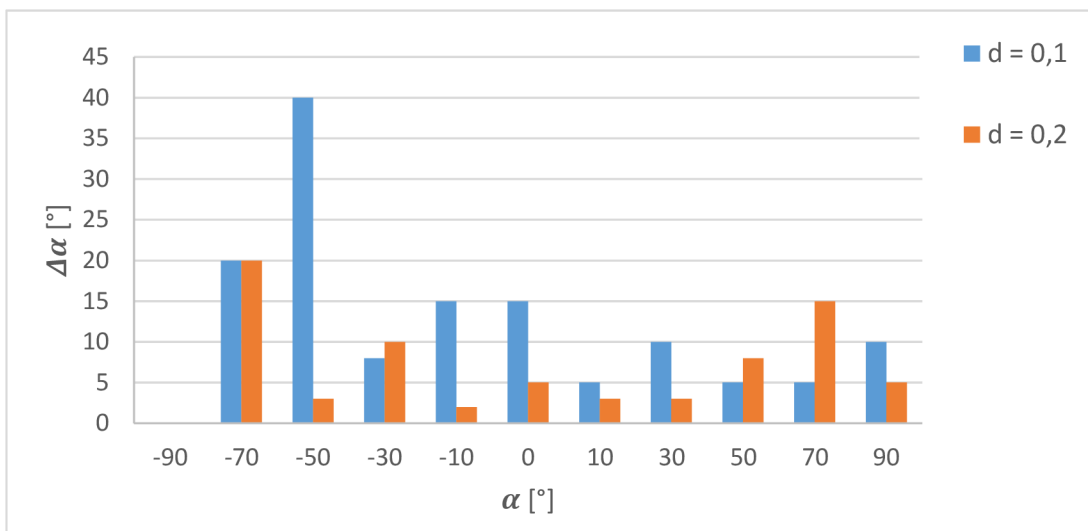
V následujících grafech je zobrazena závislost chyby měření  $\Delta\alpha$  na sledovaném úhlu  $\alpha$ . Hodnoty opět vycházejí z tabulek C a D v příloze.

**Obrázek 16 - Graf chyby měření 2 mikrofony TDOA**





Obrázek 17 - Graf chyby měření 2 mikrofony DAS



Aritmetický průměr chyby měření  $\Delta x$  pro použité metody a vzdálenosti je v následující tabulce.

Tabulka 3 - Průměrná chyba měření, vliv vzdálenosti

	$d_{s1}$	$d_{s2}$
$\Delta\alpha_{TDOA}$ [°]	4	2
$\Delta\alpha_{BEAM}$ [°]	12	7

Z výsledků měření vyplývá, že nejmenší průměrnou chybu ze všech měření má metoda TDOA pro vzdálenost mezi senzory označenou  $d_{s2}$ . Nejvyšší chybu má metoda DAS Beamformer při vzdálenosti  $d_{s1}$ . Obě metody mají přesnější výsledky při vzdálenosti senzorů  $d_{s2}$ .

Je to způsobeno tím, že při větší vzdálenosti senzorů, je vyšší rozlišitelnost. Toto tvrzení je dokázané v následujícím příkladu, kdy nejmenší možný úhel  $\alpha_{min}$  je určený časovým zpožděním  $\Delta t_{min}$ , které je závislé na vzorkovací frekvenci, na rychlosti zvuku  $c$  a na vzdálenosti mezi senzory  $d_{12}$ .

$$\alpha_{min} = \arcsin\left(\frac{\Delta t_{min} \cdot c}{d_{12}}\right) \quad (13)$$

Pro vzdálenosti  $d_{s2} = 0,2$  m a  $f_{vz} = 20$  kHz je rozlišitelnost  $\alpha_{min} = 4,89^\circ$ .

## 5.2 Vliv počtu a rozmístění senzorů

V následující podkapitole budou ukázané výsledky pro lineární mikrofonní pole se dvěma a se čtyřmi mikrofony a dále pro čtvercové pole se čtyřmi mikrofony. Pro porovnání s lineárním polem byla zkoumána pouze horizontální rovina. Nejprve tedy bude zkoumán vliv počtu senzorů, poté bude ukázané srovnání dvou různých rozmístění čtyř senzorů.

## 5.2.1 Vliv počtu senzorů

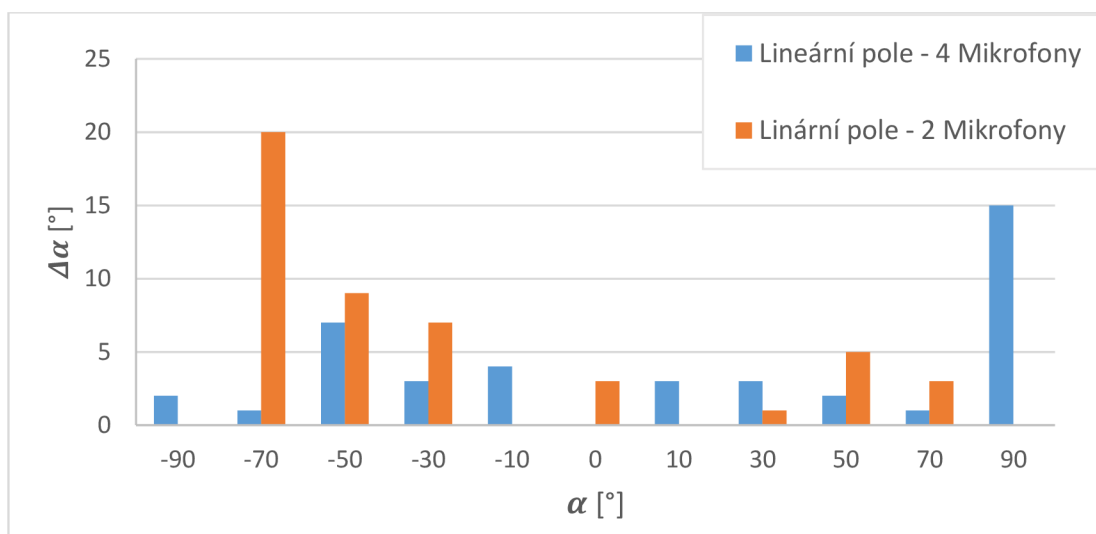
Měření bylo provedeno pro lineární mikrofonní pole se dvěma a čtyřmi mikrofony. Data vychází z tabulky A a tabulky C v příloze. Hodnoty jsou aritmetickým průměrem  $\bar{x}$  ze tří nezávislých měření. Dále jsou použity hodnoty průměrné chyby měření pro každý sledovaný úhel. Vzdálenost mezi mikrofony byla určena na  $d = 0,1$  m. Tabulka 5 popisuje závislost přesnosti detekce na počtu senzorů. Kdy  $M$  označuje počet mikrofonů.

Tabulka 4 - Závislost přesnosti detekce na počtu senzorů

$\alpha$ [°]	$\alpha_{TDOA}$ [°]		$\alpha_{BEAM}$ [°]	
	$M = 2$	$M = 4$	$M = 2$	$M = 4$
-90	-90	-88	-90	-90
-70	-80	-71	-90	-90
-50	-59	-57	-90	-56
-30	-37	-33	-38	-33
-10	-10	-14	-25	-12
0	-3	5	-15	4
10	10	7	15	12
30	31	27	40	35
50	55	48	55	58
70	67	71	75	76
90	90	75	80	81

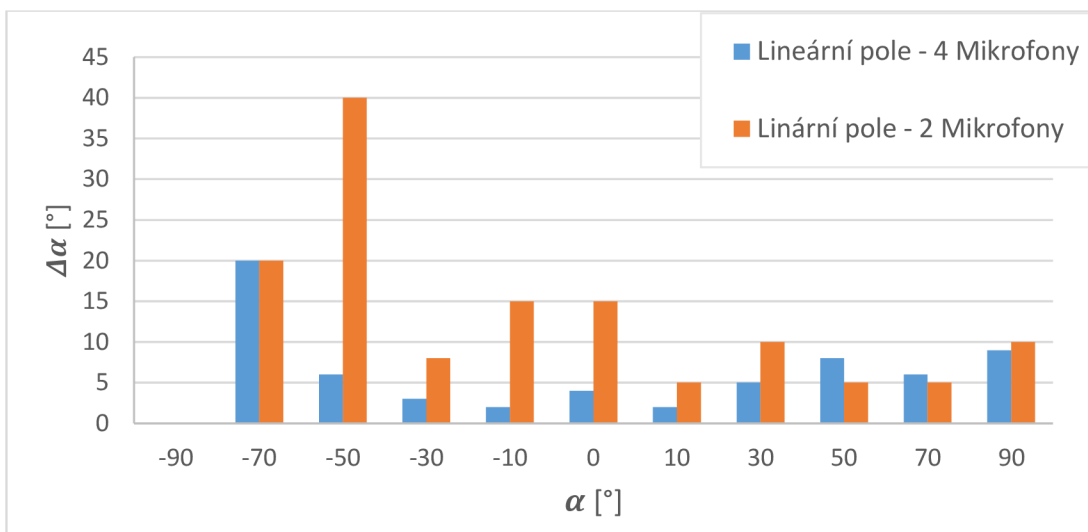
V následujícím obrázku je graf závislosti chyby měření  $\Delta\alpha$  na sledovaném úhlu  $\alpha$ .

Obrázek 18 - Graf chyby měření pro proměnný počet senzorů TDOA





Obrázek 19 - Graf chyby měření pro proměnný počet senzorů DAS



Aritmetický průměr chyby měření  $\Delta x$  pro použité metody a rozmístění je v následující tabulce.

Tabulka 5 - Průměrná chyba měření, vliv počtu senzorů

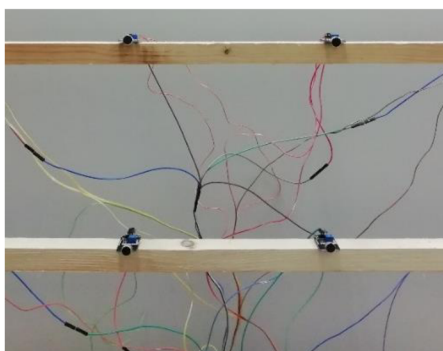
	M = 2	M = 4
$\Delta\alpha_{TDOA}$ [°]	4	4
$\Delta\alpha_{BEAM}$ [°]	12	6

Z výsledků je patrné, že se zvyšujícím se počtem senzorů se přesnost u metody TDOA nemění. Z grafu můžeme vidět, že hodnoty chyby pro úhel  $-70^\circ$  a  $90^\circ$  výrazně převyšují průměrnou hodnotu. U metody DAS Beamformer vidíme, že pro větší počet senzorů je přesnost výsledků výrazně lepší. Tento jev je způsobený vyšší rozlišovací schopností dalších mikrofonních párů, které mají na přesnost vliv.

### 5.2.2 Vliv rozmístění senzorů

V této kapitole je zkoumán vliv rozmístění senzorů. Měření bylo realizováno pro uniformní rovinné čtvercové mikrofonní pole a pro lineární mikrofonní pole.

Obrázek 20 - Zapojení čtvercového mikrofonního pole



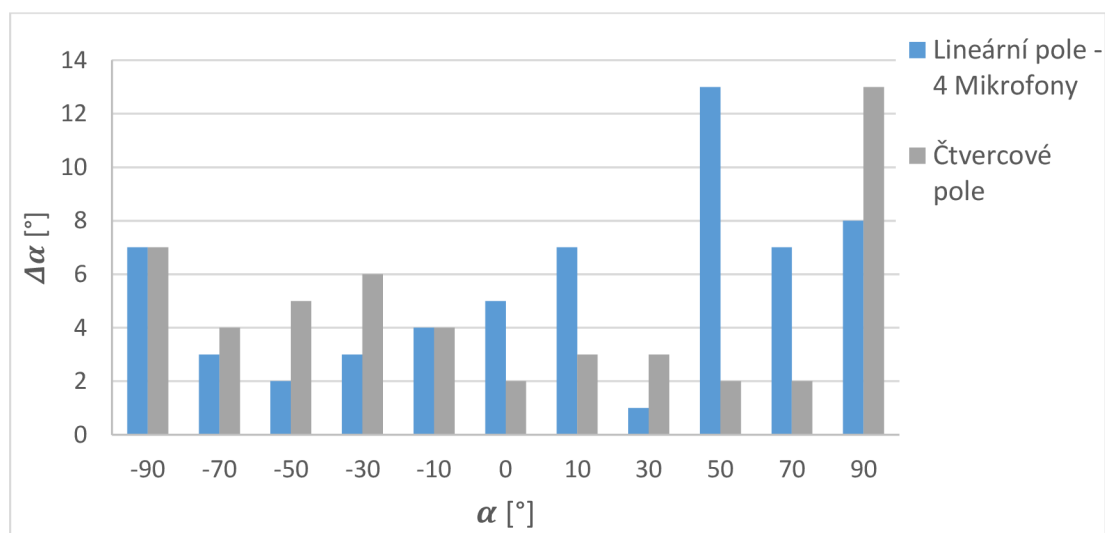
Mikrofonní pole je rozmístěné ve 2D prostoru, tím je možné určit DOA v horizontální i vertikální rovině. Z důvodu toho, že je mikrofonní pole porovnávané s polem lineárním, je sledovaný úhel pouze v horizontální rovině. Vzdálenost mezi mikrofony byla  $d = 0,2$  m. Výsledky pro čtvercové pole jsou v příloze v tabulce E.

**Tabulka 6 - Závislost přesnosti detekce na rozmístění senzorů**

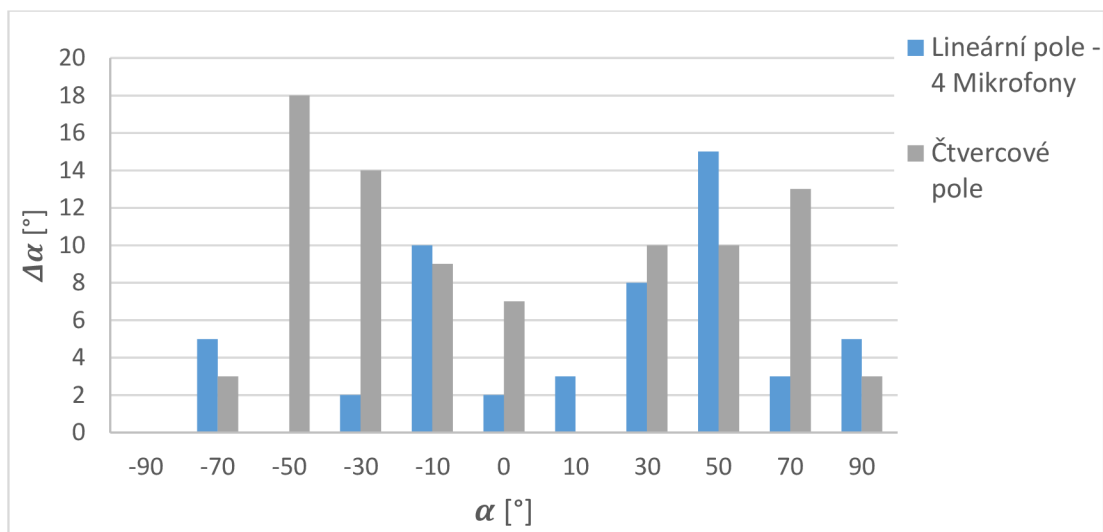
$\alpha$ [°]	$\alpha_{TDOA}$ [°]		$\alpha_{BEAM}$ [°]	
	Lineární	Čtvercové	Lineární	Čtvercové
-90	-83	-83	-90	-90
-70	-67	-74	-65	-83
-50	-48	-55	-50	-68
-30	-33	-36	-32	-44
-10	-16	-14	-20	-19
0	-5	-2	2	-7
10	3	7	7	10
30	29	33	38	40
50	63	52	65	60
70	63	72	67	83
90	83	77	85	87

V následujícím obrázku je graf závislosti chyby měření  $\Delta\alpha$  na sledovaném úhlu  $\alpha$ .

**Obrázek 21 - Graf chyby měření pro různé rozmístění TDOA**



Obrázek 22 - Graf chyby měření pro různé rozmístění DAS



Tabulka 7 - Průměrná chyba měření, vliv rozmístění senzorů

	Lineární	Čtvercové
$\Delta\alpha_{TDOA}$ [°]	5	5
$\Delta\alpha_{BEAM}$ [°]	5	8

Z výsledků je patrné, že obě použitá rozmístění mají pro metodu TDOA stejný výsledek průměrné chyby měření. Pro metodu DAS Beamformer je výhodnější použít lineární pole.

### 5.3 Vliv překážky na vyhodnocení

Dalším testem bylo prozkoumání vlivu překážky na vyhodnocení. Jako překážka byla zvolena deska z plexiskla. Pro různé umístění byl testován úhel  $\theta = 30^\circ$ . Nejprve byl ověřen úhel bez překážky. Poté byla deska postavena před mikrofonní pár ve vzdálenostech 5 a 0 cm. Následně byla přemístěna za mikrofonní pár.

Tabulka 8 - Vliv překážek na vyhodnocení

$d$ [cm]	$\alpha_{TDOA}$ [°]	$\alpha_{BEAM}$ [°]
Bez překážky	31	34
0	31	34
5	31	34
Překážka za mikrofony	31	34

Z výsledků je vidět, že deska z plexiskla nijak neovlivňuje detekci.

## 5.4 Reakce na zvuk vzniklý tlesknutím

Pro detekci zvuku je důležité definovat, jaké zvuky je schopné systém vyhodnotit. Pro porovnání byl vybrán zvuk realizovaný tleskáním, který má větší energii, vyšší amplitudu a větší dozvuk než zvuk realizovaný luskáním. Zvuk byl detekován čtvercovým rovinným uniformním polem se čtyřmi senzory a se vzdáleností mezi nimi  $d = 0,2$  m.

Hodnoty jsou aritmetickým průměrem  $\bar{x}$  ze tří nezávislých měření nacházející se v tabulce F v příloze.

Tabulka 9 - Výsledky detekce pro zvuk vzniklý tlesknutím

$\alpha$ [°]	$\alpha_{TDOA}$ [°]	$\alpha_{BEAM}$ [°]
90	80	85
70	65	72
50	70	51
30	25	30
10	10	11
0	0	-2

Tabulka 10 - Průměrná chyba měření, tlesknutí

	Tlesknutí
$\Delta\alpha_{TDOA}$ [°]	4
$\Delta\alpha_{BEAM}$ [°]	2

Z měření vyplývá, že metody reagují na zvuk vzniklý tlesknutím v případě TDOA stejně dobře, jako na zvuk vzniklý lusknutím. U metody DAS Beamformer je průměrná chyba menší než ve všech dosavadních měřeních, kdy byl vyhodnocován zvuk vzniklý lusknutím.

## 5.5 Vyhodnocení bez použití hladiny detekce

Pro měření byla vždy určena hladina detekce, která určovala výběr pár vzorků z každého analyzovaného signálu. Popis v kapitole 4.2.2.

V tomto měření byl zkoumán výpočet pro signál bez použití hladiny detekce. Pro každé měření byla vybraná oblast jednoho zachyceného lusknutí. Analyzován byl signál, který byl použit v kapitole 5.1 pro  $d_{s2}$ .

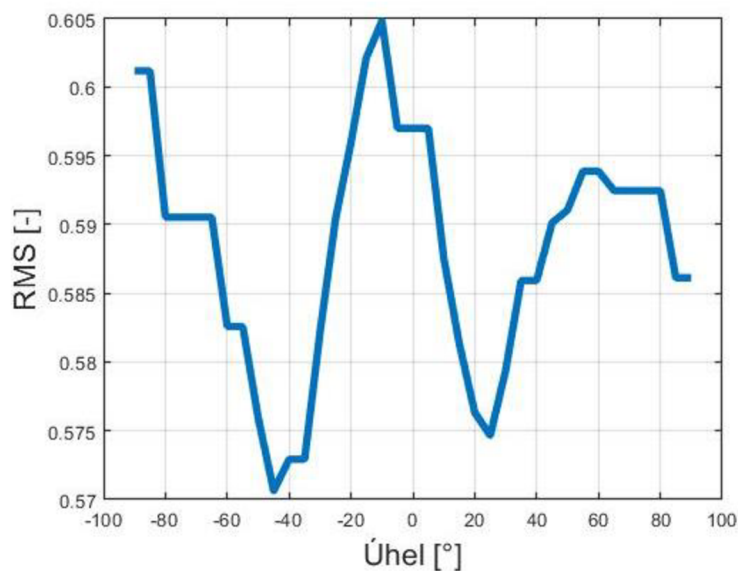
Tabulka 11 - Výsledky vyhodnocení bez použití hladiny detekce

$\alpha$ [°]	$\alpha_{TDOA}$ [°]				$\alpha_{BEAM}$ [°]			
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Měření č. 4	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Měření č. 4
-90	-5	-5	-5	-5	-10	-10	-10	-10
-70	-10	-10	-5	-10	-15	-15	-10	-15
-50	-50	37	15	20	-60	45	20	25
-30	-31	-25	-31	-31	-40	-30	-40	-40
-10	-5	0	0	-	-10	-5	-5	-
0	5	0	-	-	8	-7	-	-
10	5	5	5	-	8	8	10	-
30	25	15	15	-14	30	20	20	-20
50	-5	-5	51	15	-10	-10	55	20
70	71	5	5	71	85	10	10	85
90	10	10	10	5	15	15	15	10

Toto měření velmi dobře ukazuje význam hladiny detekce. Pokud se použije celý signál, tak jsou do vyhodnocení zahrnuty jevy jako jsou odrazy, interference, dozvuky, nekvalitní příjem mikrofonů, více zdrojů zvuku, hluk z okolí atd. Tyto vlivy velmi ovlivňují přesnost detekce. Vidíme, že pro některá měření se výsledky blíží měřenému úhlu, avšak tato správná vyhodnocení jsou náhodná.

Metodu DAS Beamformer dokáže detekovat více zdrojů zvuku. Když se podíváme na následující obrázek, uvidíme 3 maxima v signálu. Jedno z nich se blíží skutečnému úhlu  $-90^\circ$ .

Obrázek 23 - Graf vyhodnocení DAS Beamformer  $-90^\circ$



Toto vyhodnocení potvrzuje, že metoda DAS Beamformer dokáže detekovat více zdrojů zvuku obsažených v signálu. Zároveň nelze zaručit, že nejvyšší RMS hodnota, bude odpovídat hledanému úhlu.

## 5.6 Výsledné zhodnocení testů

Pro přehlednost výsledků a celkové zhodnocení testovací části byla vytvořena následující tabulka. Tabulka ukazuje hodnotu průměrné chyby měření pro všechna realizovaná měření a obě použité metody. Hodnoty jsou získané z tabulek v předchozích kapitolách.

Tabulka 12 - Chyba měření pro všechny testované umístění a vzdálenosti

Vzdálenost mezi mikr.	$d_{s1} = 0,1 \text{ m}$			$d_{s2} = 0,2 \text{ m}$		
	Lineární mikr. pole		Čtvercové mikr. pole	Lineární mikr. pole		Čtvercové mikr. pole
	2 mikrofony	4 mikrofony		2 mikrofony	4 mikrofony	
$\Delta\alpha_{\text{TDOA}} [^\circ]$	4	4	-	2	5	5
$\Delta\alpha_{\text{BEAM}} [^\circ]$	12	6	-	7	5	8

Z dat je patrné, že metoda TDOA má lepší výsledky pro všechna realizovaná měření. Průměrná chyba u všech měření nepřesáhla  $5^\circ$ . Nejlepších výsledků pro tuto metodu bylo dosaženo při použití jednoho mikrofonního páru se vzdáleností  $d_{s2}$ , kdy byla velikost průměrné chyby  $2^\circ$ . Dále z měření vyplývá, že pro lineární pole se čtyřmi senzory je přesnost nižší nebo stejná než při použití menšího počtu senzorů.

Metoda DAS Beamformer je ve všech měření méně nebo stejně přesná. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití lineárního mikrofonního pole se vzdáleností  $d_{s2}$ , kdy je velikost průměrné chyby  $5^\circ$ . Nejhorších výsledků dosáhla při použití jednoho mikrofonního páru se vzdáleností  $d_{s1}$ , kdy byla velikost průměrné chyby  $12^\circ$ . Dále vidíme, že pro tuto metodu je výhodnější použít více mikrofonů, s kterými se zvyšuje přesnost detekce.

Z výsledků porovnání lineárního a čtvercového pole vyplývá, že pro metodu TDOA je průměrná chyba měření pro obě pole stejně velká a má hodnotu  $5^\circ$ . Pro metodu DAS Beamformer jsou výsledky lepší při použití lineárního pole. Velikost průměrné chyby měření je  $5^\circ$ .

V kapitole 5.3 je zjištěn vliv desky z plexiskla na detekci. Z výsledků je zřejmé, že na vyhodnocení nemá překážka vliv.

## 6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zhodnotit možnosti lokalizace zvuku z hlediska vyhodnocovacích metod a použitého hardware pro měření a zpracování signálu. Realizované postupy a získané znalosti vycházející z práce mohou být použity pro budoucí aplikaci pracující v reálném čase v projektu robotické hlavy.

V rešeršní části jsou ukázané tři možné softwarové přístupy. Dále je zmíněné obecné schéma hardwarové části a jsou navržena dvě možná řešení realizace. V kontextu cílů práce byly použity metody TDOA a DAS Beamformer realizované v časové oblasti. Dále byly vybrány jednotlivé komponenty měřicího řetězce. Pro záznam zvuku byly použity mikrofonní moduly RobotDyn, k A/D převodu signálu byla vybrána měřicí karta HUMUSOFT MF 624. Všechny navrhnuté algoritmy byly naprogramované v prostředí Matlab.

V praktické části byl navržen postup výběru oblasti signálu, která je určena k vyhodnocení. Poté je popsána realizace jednotlivých algoritmů a jsou ukázány příklady výpočtu pro obě metody. V oblasti hardware jsou použity vybrané komponenty. Dále byl sestaven dřevěný stojan, na kterém byly umístěny mikrofony tvořící mikrofonní rovinné a lineární pole. V závěru praktické části je popis finální aplikace, která umožňuje výpočet a vizualizaci výsledků při změně parametrů a použité metody.

Použité metody byly ověřeny v testovací části. Testy probíhaly pro jeden mikrofonní pár, pro lineární a rovinné pole. Testovaným zvukem bylo luskání, v jednom z testů i tleskání. Testován byl vliv vzdáleností mezi senzory. Poté vliv počtu a rozmístění senzorů. Následovalo testování vlivu překážky, vyhodnocení zvuku pro tlesknutí a vyhodnocení celého signálu bez použití hladiny detekce. Zhodnocení testovací části je v kapitole 5.6.

Z testů vyplývá, že přesnější výsledky má metoda TDOA. Dále můžeme vidět, že nejvyšší přesnost je dosažena při použití jednoho mikrofonního páru. Toto zjištění je v celku překvapivé a může ho mít za následek mnoho faktorů. Nejpravděpodobnějším je chybné použití zjednodušené vzdáleného pole, rozdíly však nejsou příliš významné.

Při porovnávání lineárního a čtvercového pole bylo zjištěno, že metoda TDOA má pro obě rozmístění podobnou průměrnou přesnost. Pro metodu DAS Beamformer je vhodnější použít lineární pole. Z testů vlivu překážky na přesnost vyhodnocení vidíme, že překážka z plexiskla nemá vliv na vyhodnocení. Tento poznatek může být využit v případě, že by robotická hlava byla umístěna za stěnu z podobného materiálu, aby se předešlo jejímu poškození.

Ve všech dosavadních měřeních byl analyzován zvuk z vzniklý luskání, pro rozšíření možného detekovaného zvuku bylo otestováno také zvuk z tleskání. Z výsledků vyplývá, že pro tleskání jsou výsledky přesnější. Při použití na robotické hlavě je proto možné reagovat na oba zvuky.

V kapitole 5.5 je analyzován signál bez hladiny detekce a je ukázáno, že správné vyhodnocení je vcelku náhodné. Přesnost je zásadně ovlivněna prostředím, kde se zvuk šíří a metody ve většině případů nejsou schopné správně určit DOA. Toto měření zároveň ukazuje důležitost hladiny detekce použité v ostatních měření, kdy jsou vlivy v prostředí eliminovány na minimální hodnotu.

Větší přesnost může být dosažena při použití vyšší vzorkovací frekvence. Dále mohou být použity kvalitnější mikrofony pro záznam dat. Správnost detekce je zásadně ovlivněna určením hladiny detekce, proto by bylo vhodné určovat hladinu detekce v závislosti na přijímaném signálu.

Prioritou pro pokračování v práci by měla být realizace v reálném čase, kde by bylo možné navázat na myšlenku hladiny detekce. V případě použití mikrofону s digitálně ovládaným potenciometrem by bylo možné nastavovat hladinu detekce přímo v mikrofonním modulu. Pokud by byl použit buffer s vhodným časovým rozsahem, který by byl vyhodnocován v případě překročení hladiny, mohlo by být následné vyhodnocení analogické jako vyhodnocení použité v této práci. Pro získání časového zpoždění z hodnot v bufferu by byla vhodná metoda TDOA, která je nenáročná na výpočetní čas a má odpovídající výsledky již pro 2 mikrofonní páry. Pro systém pracující ve 2D je nutné použít rovinné pole se čtyřmi mikrofony.



# LITERATURA

- [1] Rare historical photos [online]. rarehistoricalphotos, 2016 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://rarehistoricalphotos.com/aircraft-detection-radar-1917-1940/>
- [2] KHADDOUR, Hasan. Lokalizace a interpretace zdrojů zvuku v akustických polích. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. Disertační práce.
- [3] DOSTÁLEK, Petr. Embedded systém pro lokalizaci zdroje zvuku. Zlín, 2009. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
- [4] KULKARNI, Abhijit a H. steven COLBURN. Role of spectral detail in sound-source localization. Nature [online]. 1998, 396(6713), 747-749. DOI: 10.1038/25526. ISSN 00280836.
- [5] ZHANG, W, T ABHAYAPALA, R KENNEDY, R DURAISWAMI a W ZHANG. Insights into head-related transfer function: Spatial dimensionality and continuous representation. Journal of the Acoustical Society of America [online]. 2010, 127(4), 2347-2357 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1121/1.3336399. ISSN 0001-4966. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/743711427/>
- [6] RASPAUD, M, H VISTE a G EVANGELISTA. Binaural Source Localization by Joint Estimation of ILD and ITD. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing [online]. IEEE, 2010, 18(1), 68-77 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1109/TASL.2009.2023644. ISSN 1558-7916. Dostupné z: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/4967888>
- [7] BARTOŇ Z. Tvarování přijímací charakteristiky mikrofonních polí. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2010. Počet stran 78. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce Ing. Ivan Míča.
- [8] WEST, James e. Electret condenser microphones. The Journal of the Acoustical Society of America [online]. 2010, 127(3), 2008-2008 [cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1121/1.3385215. ISSN 0001-4966. Dostupné z: <https://doi.org/10.1121/1.3385219>
- [9] VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. 2. vydání. Bučovice: Nakladatelství Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.
- [10] BEZDÍČEK, M. Lokalizace pohyblivých akustických zdrojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ivan Míča.

## SEZNAM ZKRATEK

DOA	...	Direction of Arrival
HRTF	...	Head Related Transfer Function
TDOA	...	Time Difference of Arrival
STFT	...	Short Term Fourier Transformation
ITD	...	Interaural Time Difference
ILD	...	Interaural Level Difference
FFT	...	Fast Fourier Transformation
DAS	...	Delay and Sum
MUSIC	...	Multiple signal classification beamformer
RMS	...	Root Mean Square

# SEZNAM PŘÍLOH

## Přílohy obsažené v textu:

Tabulka A: Lineární pole o 4 mikrofonech .....	48
Tabulka B: Lineární pole o 4 mikrofonech.....	49
Tabulka C: Jeden mikrofonní pár .....	50
Tabulka D: Jeden mikrofonní pár .....	51
Tabulka E: Čtvercové mikrofonní pole .....	52

## Elektronické přílohy:

### Data:

- 2MIK – data pro měření s dvěma mikrofony
- 4MIK – data pro měření se 4 mikrofony v lineárním poli
- 4MIK\_CTVEREC – data pro měření se 4 mikrofony ve čtvercovém poli
- PREKAZKA – data pro měření s překážkou
- TLESKANI – data pro vyhodnocení tleskání

### Naprogramované funkce a skripty:

- Skript a funkce pro lineární pole pro obě použité metody
- Skript a funkce pro čtvercové pole pro obě použité metody
- Finální aplikace – UI

## Tabulka A: Lineární pole o 4 mikrofonech

$d = 0,1 \text{ m}$							
$\alpha$ [°]	$\alpha_{\text{TDOA}}$ [°]					$\bar{x}$ [°]	$\Delta\alpha_{\text{TDOA}}$ [°]
	1.	2.	3.	4.	5.		
-90	-90	-80	-90	-90	-90	-88	2
-70	-69	-66	-66	-69	-86	-71	1
-50	-54	-57	-47	-57	-52	-57	7
-30	-30	-21	-41	-35	-37	-33	3
-10	-10	-15	-16	-15	-10	-14	4
0	-5	-6	-5	1	-5	5	0
10	15	8	8	-6	8	7	3
30	26	24	22	30	32	27	3
50	49	47	45	56	45	48	2
70	76	62	80	69	79	71	1
90	69	66	69	79	90	76	15
$\alpha$ [°]	$\alpha_{\text{BEAM}}$ [°]					$\bar{x}$ [°]	$\Delta\alpha_{\text{BEAM}}$ [°]
	1.	2.	3.	4.	5.		
-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	0
-70	-90	-90	-90	-90	-90	-90	20
-50	-55	-55	-55	-55	-60	-56	6
-30	-30	-20	-40	-35	-40	-33	3
-10	-10	-10	-15	-15	-10	-12	2
0	5	5	5	0	5	4	4
10	15	15	10	5	15	12	2
30	30	30	40	40	35	35	5
50	60	55	60	60	55	58	8
70	75	75	75	85	75	76	6
90	85	85	85	75	75	81	9

## Tabulka B: Lineární pole o 4 mikrofonech

$d = 0,2 \text{ m}$							
$\alpha$ [°]	$\alpha_{\text{TDOA}}$ [°]					$\bar{x}$ [°]	$\Delta\alpha_{\text{TDOA}}$ [°]
	1.	2.	3.	4.	5.		
-90	-81	-87	-82	-	-	-83	7
-70	-69	-66	-67	-	-	-67	3
-50	-47	-50	-47	-	-	-48	2
-30	-30	-37	-32	-	-	-33	3
-10	-7	-21	-20	-	-	-16	4
0	-6	-2	-2	-	-	-5	5
10	4	2	4	-	-	3	7
30	18	30	38	-	-	29	1
50	42	86	62	-	-	63	13
70	63	60	65	-	-	63	7
90	76	90	83	-	-	83	8
$\alpha$ [°]	$\alpha_{\text{BEAM}}$ [°]					$\bar{x}$ [°]	$\Delta\alpha_{\text{BEAM}}$ [°]
	1.	2.	3.	4.	5.		
-90	-90	-90	-90	-	-	-90	0
-70	-55	-70	-70	-	-	-65	5
-50	-30	-60	-60	-	-	-50	0
-30	-35	-30	-30	-	-	-32	2
-10	-20	-25	-15	-	-	-20	10
0	0	5	0	-	-	2	2
10	10	5	5	-	-	7	3
30	25	40	50	-	-	38	8
50	50	60	85	-	-	65	15
70	70	70	65	-	-	67	3
90	85	85	85	-	-	85	5

### Tabulka C: Jeden mikrofonní pár

d = 0,1 m					
$\alpha$ [°]	$\alpha_{TDOA}$ [°]			$\bar{x}$ [°]	$\Delta\alpha_{TDOA}$ [°]
	1.	2.	3.		
-90	-90	-90	-90	-90	0
-70	-59	-90	-90	-80	20
-50	-59	-59	-59	-59	9
-30	-31	-43	-	-37	7
-10	-10	-10	-10	-10	0
0	0	-10	-0	-3	3
10	10	10	10	10	0
30	31	31	31	31	1
50	43	43	43	55	5
70	90	59	59	67	3
90	90	90	90	90	0
$\alpha$ [°]	$\alpha_{BEAM}$ [°]			$\bar{x}$ [°]	$\Delta\alpha_{BEAM}$ [°]
	1.	2.	3.		
-90	-90	-90	-90	-90	0
-70	-90	-90	-90	-90	20
-50	-90	-90	-90	-90	40
-30	-35	-40	-	-38	8
-10	-25	-25	-25	-25	15
0	-10	-25	-10	-15	15
10	15	15	15	15	5
30	40	40	40	40	10
50	55	55	55	55	5
70	75	75	75	75	5
90	75	75	90	80	10

## Tabulka D: Jeden mikrofonní pár

<b>d = 0,2 m</b>					
<b><math>\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\alpha_{TDOA}</math> [°]</b>			<b><math>\bar{x}</math> [°]</b>	<b><math>\Delta\alpha_{TDOA}</math> [°]</b>
	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>		
<b>-90</b>	-90	-90	-71	-84	6
<b>-70</b>	-71	-71	-71	-71	1
<b>-50</b>	-43	-43	-51	-46	4
<b>-30</b>	-31	-31	-31	-31	1
<b>-10</b>	-15	-15	-10	-13	3
<b>0</b>	0	0	-	0	0
<b>10</b>	10	10	15	12	2
<b>30</b>	25	31	31	29	1
<b>50</b>	51	59	51	54	4
<b>70</b>	71	71	71	71	1
<b>90</b>	90	90	90	90	0
<b><math>\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\alpha_{BEAM}</math> [°]</b>			<b><math>\bar{x}</math> [°]</b>	<b><math>\Delta\alpha_{BEAM}</math> [°]</b>
	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>		
<b>-90</b>	-90	-90	-90	-90	0
<b>-70</b>	-90	-90	-90	-90	20
<b>-50</b>	-50	-50	-60	-53	3
<b>-30</b>	-40	-40	-40	-40	10
<b>-10</b>	-20	-20	-15	-18	2
<b>0</b>	-5	-5	-	-5	5
<b>10</b>	15	15	20	17	3
<b>30</b>	30	35	35	33	3
<b>50</b>	55	65	55	58	8
<b>70</b>	85	85	85	85	15
<b>90</b>	85	85	85	85	5

## Tabulka E: Čtvercové mikrofonní pole

<b>d = 0,2 m</b>					
<b><math>\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\alpha_{TDOA}</math> [°]</b>			<b><math>\bar{x}</math> [°]</b>	<b><math>\Delta\alpha_{TDOA}</math> [°]</b>
	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>		
<b>-90</b>	-80	-80	-90	-83	7
<b>-70</b>	-80	-80	-63	-74	4
<b>-50</b>	-50,6	-59	-55	-55	5
<b>-30</b>	-34	-37	-37	-36	6
<b>-10</b>	-15	-15	-12	-14	4
<b>0</b>	0	0	-5	-2	2
<b>10</b>	7	7	7	7	3
<b>30</b>	31	34	34	33	3
<b>50</b>	51	51	55	52	2
<b>70</b>	65	71	80	72	2
<b>90</b>	71	71	90	77	13
<b><math>\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\alpha_{BEAM}</math> [°]</b>			<b><math>\bar{x}</math> [°]</b>	<b><math>\Delta\alpha_{BEAM}</math> [°]</b>
	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>		
<b>-90</b>	-90	-90	-90	-90	0
<b>-70</b>	-90	-90	-68	-83	3
<b>-50</b>	-55	-80	-70	-68	18
<b>-30</b>	-43	-45	-45	-44	14
<b>-10</b>	-20	-20	-18	-19	9
<b>0</b>	-5	-5	-10	-7	7
<b>10</b>	13	8	8	10	0
<b>30</b>	35	40	45	40	10
<b>50</b>	55	55	70	60	10
<b>70</b>	75	85	90	83	13
<b>90</b>	85	85	90	87	3



## Tabulka F: Vyhodnocení tleskání

<b>d = 0,2 m</b>					
<b><math>\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\alpha_{TDOA}</math> [°]</b>			<b><math>\bar{x}</math> [°]</b>	<b><math>\Delta\alpha_{TDOA}</math> [°]</b>
	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>		
<b>90</b>	90	71	80	80	10
<b>70</b>	59	59	80	66	4
<b>50</b>	43	55	47	48	2
<b>30</b>	25	25	26	25	5
<b>10</b>	10	7	5	7	3
<b>0</b>	0	2	0	1	1
<b><math>\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\alpha_{BEAM}</math> [°]</b>			<b><math>\bar{x}</math> [°]</b>	<b><math>\Delta\alpha_{BEAM}</math> [°]</b>
	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>		
<b>90</b>	85	85	85	85	5
<b>70</b>	65	65	85	72	2
<b>50</b>	50	51	53	51	1
<b>30</b>	30	30	30	30	0
<b>10</b>	15	13	5	11	1
<b>0</b>	-5	3	-5	-2	2