



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Elektrotechnická

Lokalizace zdroje zvuku polem mikrofonů

Sound source localization using a microphone array

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika

Studijní obor: Sítě elektronických komunikací

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Vítek, PhD.

David Král

Praha 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací „Lokalizace zdroje zvuku polem mikrofonů“ vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 11. 5. 2015

.....

vlastnoruční podpis autora

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Král David**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Sítě elektronických komunikací

Název tématu: **Lokalizace zdroje zvuku polem mikrofonů**

Pokyny pro vypracování:

1. Vypracujte přehled metod vhodných pro lokalizaci zdroje zvuku pomocí pole mikrofonů. Simulací v programovém prostředí Matlab ověřte vlastnosti jednotlivých metod.
2. Navrhněte systém se 4 mikrofony pro lokalizaci zdroje zvuku vybranou metodou.
3. Navržený systém implementujte pomocí DSP tak, aby se dal použít jako asistenční pomůcka pro neslyšící.
4. Diskutujte dosažené výsledky a další možnosti rozšíření systému, např. o identifikaci zdroje zvuku.

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí: Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 20. 11. 2014

Abstrakt: Tato práce se zabývá lokalizací zdroje zvuku polem mikrofonů, obsahuje popis metod vhodných pro lokalizaci pomocí pole mikrofonů. Popisuje návrh systému se čtyřmi mikrofony pomocí jedné z popsaných metod. Dále se zabývá implementací tohoto systému pomocí procesoru ATmega16, aby se dal použít jako asistenční pomůcka pro neslyšící.

Abstract: This thesis deals with localization of sound source using a microphone array, it contains a description of methods suitable for localization using microphone array. It describes design of a system with four microphones using one of the described methods. It also deals with the implementation of this system using processor ATmega16 which could be used as an assistance tool for hearing impaired.

Klíčová slova: lokalizace zvukového zdroje, pole mikrofonů, korelace, tvarování přijímací charakteristiky, Fourierova transformace, Matlab R2014b, EAGLE 6.4.0, AVR Studio 5.1, Arduino 1.6.2, elektretový mikrofon, LM538, ATmega16, Arduino Due

Keywords: sound source localization, microphone array, correlation, beamforming, Fourierova transformation, Matlab R2014b, EAGLE 6.4.0, AVR Studio 5.1, Arduino 1.6.2, electret microphone, LM538, ATmega16, Arduino Due

Poděkování

V první řadě bych velice rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Stanislavu Vítkovi, PhD. za účinnou odbornou pomoc, také za příjemnou spolupráci, velmi dobrou komunikaci a cenné rady během tvorby. Dále bych rád poděkoval celé své rodině za podporu, v první řadě své mamince, která mi po celou dobu studia vytvářela doslova ideální studijní podmínky. Chtěl bych ještě poděkovat své přítelkyni Moničce, která se mnou měla trpělivost i ve slabších chvílích a stále při mně stála.

Obsah

Seznam obrázků	- 8 -
Seznam tabulek	- 9 -
Seznam použitých zkratk	- 10 -
1. Úvod	- 12 -
2. Metody lokalizace zdroje zvuku	- 14 -
2.1 Spektrální odhad vysokého rozlišení.....	- 15 -
2.2 Metody tvarování přijímací charakteristiky	- 16 -
2.2.1 Tvarovač Delay And Sum (DAS).....	- 16 -
2.3 Metoda útlumu zvuku	- 18 -
2.3.1 Šíření zvuku v otevřeném prostoru	- 18 -
2.3.2 Popis systému s měřením útlumu	- 20 -
2.4 Metoda časových zpoždění.....	- 21 -
2.4.1 Teorie výpočtu zpoždění signálu mezi dvojicí mikrofonů	- 22 -
2.4.2 Křížová korelační funkce	- 24 -
2.4.3 Výpočet DOA pomocí křížové korelace	- 28 -
3. Simulace vybraných metod lokalizace zvuku	- 29 -
3.1 Simulace lokalizace pomocí útlumu.....	- 29 -
3.2 Simulace lokalizace pomocí TDOA č. 1.....	- 31 -
3.3 Simulace lokalizace pomocí TDOA č. 2.....	- 33 -
4. Implementace zařízení pro lokalizaci zvuku	- 36 -
4.1 Arduino Due	- 37 -
4.2 Elektretové mikrofony	- 39 -
4.2.1 Měření přijímací charakteristiky	- 40 -
4.3 Předzesilovací obvod	- 43 -
4.3.1 Návrh frekvenčních filtrů	- 43 -
4.4 ATmega16.....	- 45 -
4.5 Výstupní signalizace	- 46 -
5. Testování pro finální návrh	- 47 -
5.1 Testování závislosti počtu vzorků na určení DOA	- 47 -
5.2 Testování vzdáleností mezi mikrofony	- 49 -
5.3 Testování identifikace zdroje zvuku.....	- 51 -
6. Zpracování dat	- 53 -
6.1 ADC	- 53 -
6.2 Křížová korelace.....	- 55 -
6.3 Diskrétní Fourierova transformace - DFT.....	- 57 -
6.4 Porovnání spekter signálů	- 59 -
7. Návrh plošného spoje	- 61 -
8. Náklady na výrobu lokalizátoru zvuku	- 63 -
9. Závěr	- 64 -
Seznam použité literatury	- 66 -
Přílohy	I
A. Obsah přiloženého CD.....	I
B. Fotodokumentace z měření přijímacích charakteristik mikrofonů.....	III
C. Obrázková dokumentace návrhu plošného spoje.....	V

Seznam obrázků

<i>Obr. 2.1 Schématické uspořádání DAS tvarovače</i>	- 17 -
<i>Obr. 2.2 Šíření sférické vlny</i>	- 18 -
<i>Obr. 2.3 Azimut a elevace směru příchodu zvuku</i>	- 22 -
<i>Obr. 2.4 Akustický signál dopadající na dva elementární mikrofony</i>	- 23 -
<i>Obr. 2.5 Vzájemná křížová korelace - převzato z [16]</i>	- 26 -
<i>Obr. 2.6 Diskrétní signály x a y - převzato z [16]</i>	- 27 -
<i>Obr. 2.7 Výsledek korelační funkce signálů z Obr. 2.6 - převzato z [16]</i>	- 27 -
<i>Obr. 3.1 Zobrazení náhodného rozložení pozic zdroje a mikrofonů</i>	- 30 -
<i>Obr. 3.2 Závislost útlumu na relativní vlhkosti</i>	- 31 -
<i>Obr. 3.3 Vizualizace DOA pro zvuk přicházející z -40° (vlevo) a z $+40^\circ$ (vpravo)</i>	- 32 -
<i>Obr. 3.4 GUI se zobrazením správného výpočtu parametrů</i>	- 35 -
<i>Obr. 3.5 Zobrazení podgrafů jednotlivých spekter</i>	- 35 -
<i>Obr. 4.1 Finální zapojení systému na nepájivém poli</i>	- 36 -
<i>Obr. 4.2 Zobrazení tabulek pro nastavení ADC Mode Registru - převzato z [21]</i>	- 38 -
<i>Obr. 4.3 Arduino Due - svrchní strana – převzato z [19]</i>	- 39 -
<i>Obr. 4.4 Arduino IDE - GUI</i>	- 39 -
<i>Obr. 4.5 Elektretový mikrofon MCE101</i>	- 40 -
<i>Obr. 4.6 Schéma zapojení pro měření přijímací charakteristiky pole</i>	- 40 -
<i>Obr. 4.7 Detailní pohled na mikrofonní pole</i>	- 41 -
<i>Obr. 4.8 Přijímací charakteristika elementárního mikrofonu</i>	- 42 -
<i>Obr. 4.9 Přijímací charakteristika čtvercového pole 4 mikrofonů</i>	- 43 -
<i>Obr. 4.10 Schéma předzesilovacího obvodu</i>	- 45 -
<i>Obr. 4.11 Schéma průběhu ukládání jednotlivých vzorků</i>	- 46 -
<i>Obr. 5.1 Závislost správného vyhodnocení DOA na počtu vzorků</i>	- 48 -
<i>Obr. 5.2 Závislost správného vyhodnocení DOA na vzdálenosti mikrofonů</i>	- 50 -
<i>Obr. 6.1 Grafy hodnot pro mikrofon x</i>	- 54 -
<i>Obr. 6.2 Grafy hodnot pro mikrofon y</i>	- 55 -
<i>Obr. 6.3 Grafické zobrazení koeficientů z Tab. 6.2</i>	- 57 -
<i>Obr. 6.4 Grafické zobrazení hodnot z Tab. 6.3</i>	- 58 -
<i>Obr. 7.1 Vzhled navržené desky</i>	- 61 -
<i>Obr. 7.2 Schéma zapojení pro návrh desky</i>	- 62 -
<i>Obr. i Strom složek příloh na CD</i>	I
<i>Obr. ii Foto měřicího pracoviště</i>	III
<i>Obr. iii Foto měřící aparatury a reproduktoru</i>	III
<i>Obr. iv Foto systému s vývojovým kitem Arduino Due na otočném měřicím zařízení</i>	IV
<i>Obr. v Obrázek svrchní vrstvy plošného spoje</i>	V
<i>Obr. vi Obrázek spodní vrstvy plošného spoje</i>	V

Seznam tabulek

<i>Tab. 5.1 Naměřené hodnoty pro maximální zpoždění o 8 vzorků</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Tab. 5.2 Naměřené hodnoty pro maximální zpoždění o 10 vzorků</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Tab. 5.3 Hodnoty měření pro testování vzdálenosti</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Tab. 6.1 Hodnoty zachycené na výstupu ADC a jejich přepočet</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Tab. 6.2 Hodnoty koeficientů křížové korelace</i>	<i>- 56 -</i>
<i>Tab. 6.3 Hodnoty spektrálních koeficientů</i>	<i>- 58 -</i>
<i>Tab. 6.4 Hodnoty vzdáleností spekter</i>	<i>- 60 -</i>
<i>Tab. 8.1 Soupis součástí a jejich cena</i>	<i>- 63 -</i>

Seznam použitých zkratek

ADC	Analog-to-Digital Converter – Analogově-digitální převodník
ADMUX	ADC Multiplexer Selection Register – Multiplexerový výběrový registr analogově/digitálního převodníku
AR	Autoregressive Modeling - Autoregresní modelování
ARM	Advanced RISC Machine – Pokročilý procesor s RISC instrukční sadou
A/D	Analogově/Digitální
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DAS	Delay and Sum – Zpoždění a součet
DD	Differential Doppler – Diferenční Dopplerův jev
DFT	Discrete Fourier Transform – Diskrétní Fourierova transformace
DIP	Dual In-line Package – Pouzdro s piny ve dvou řadách
DOA	Direction Of Arrival – Směr příchodu
DSP	Digital signal processor - Digitální signálový procesor
EPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory – Mazatelná programovatelná paměť pouze pro čtení
FDOA	Frequency Difference Of Arrival – Frekvenční rozdíl přichozích
FEL	Fakulta Elektrotechnická
FFT	Fast Fourier Transform – Rychlá Fourierova transformace
GUI	Graphical User Interface – Grafické uživatelské rozhraní
ISP	In-System Programming – Programování uvnitř systému
I/O	Input/Output – Vstupně/Výstupní
JTAG	Joint Test Action Group – Skupina spojených testovacích akcí
LED	Light-Emitting Diode – Světlo emitující dioda
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems – Mikro-elektro-mechanické systémy
MUSIC	Multiple Signal Classification – Vícenásobná klasifikace signálu
MV	Minimum Variance – Minimální rozptyl

OZ	Operační Zesilovač
PC	Personal computer – Osobní počítač
PF	Particle Filtering – Částicové filtrování
PWM	Pulse Width Modulation – Pulsně šířková modulace
RC	Resistor, Capacitor – Odpor, Kondenzátor
RISC	Reduced Instruction Set Computing – Počítač s redukováným instrukčním setem
SMD	Surface-Mount Device – Součástka pro povrchovou montáž
SNR	Signal-to-Noise Ratio – Odstup signálu od šumu
SPI	Serial Peripheral Interface – Sériové periferní rozhraní
SRAM	Static Random Access Memory – Statická paměť s náhodným přístupem
TDOA	Time Difference Of Arrival – Časový rozdíl příchozích
US	United States – Spojené státy americké
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter – Univerzální synchronní/asynchronní přijímač/vysílač
3D	Three-dimensional – Trojrozměrný

1. Úvod

Jedním ze základních problémů, se kterými se neslyšící setkávají v běžném provozu, je absence reakce na hlasité akustické signály, zejména varovné. Současné podpůrné systémy kompenzují vlastnosti poškozeného sluchového orgánu (zesilovač zvuku, kochleární endoprotéza). V případě, kdy je sluchový orgán poškozen tak, že již není možno ho alespoň částečně nahradit, potom je třeba využít např. vizuálního vjemu (tj. znaková řeč, psané písmo). Příkladem je pomůcka pro neslyšící řidiče, která je zaměřena na prostou detekci zvýšené úrovně hluku a jednoduchou optickou signalizaci. Technické řešení pomůcky neslyšícího chodce ovšem musí kromě detekce podnětu také stanovit azimut (směr) případně i vzdálenost zdroje a vhodným způsobem tuto informaci uživateli zprostředkovat.

Existuje sice US patent, který popisuje pomůcku řešící stejný problém [1] a také firma Google uvažovala o využití platformy Google Glass pro podobný účel. Na trhu ovšem žádná pomůcka dostupná není. V této diplomové práci proto navrhuji systém řešící situace, kdy neslyšící nemůže reagovat na hlasitý zvukový signál využívaný slyšícími pro zaměření a upoutání pozornosti. Pomůcka využívá pole mikrofonů pro měření úrovně hluku. Jednotlivá měření jsou vyhodnocena procesorem a informace o síle a směru zvukového signálu jsou neslyšícímu předány vizuálně pomocí světelných zdrojů.

Při specifikaci vlastností pomůcky pro neslyšící, jejíž návrh je předmětem této diplomové práce, jsem zohlednil několik faktorů:

- celková cena
- potřebný výkon procesoru pro zpracování dat
- počet mikrofonů potřebný pro efektivní lokalizaci zdroje zvuku

Je zřejmé, že konečná cena zařízení je limitujícím faktorem pro výběr procesoru. Od počátku jsem, vzhledem k dostupnosti a předchozí znalosti získané během studia na ČVUT FEL, zvolil platformu Atmel AVR. Vhodným kandidátem se jevil typ ATmega16, který byl pro realizaci nakonec skutečně použit. Ve prospěch tohoto procesoru z velké míry rozhodla existence provedení v pouzdře DIP, které je vhodné pro testování na nepájivém kontaktním poli a cena, jenž je velmi nízká. Pro účely

testování navržených algoritmů a pro případná měření jsem zvolil výkonný vývojový kit Arduino Due.

Volba procesoru ovlivňuje i maximální počet mikrofonů, které jsou v návrhu zařízení použity. Z logiky věci vyplývá, že pro určení směru přicházejícího zvuku jsou třeba nejméně tři mikrofony, ideálně čtyři. Vzhledem k rychlosti procesoru a jeho A/D převodníku je tento počet, i s uvážením několika omezení, na hraně.

Svou diplomovou práci jsem rozdělil do tří větších celků. První část (kapitola 2) je věnována teoretickému rozboru problémů lokalizace zdroje zvuku. Popsal jsem čtyři metody lokalizace. V druhé části (kapitola 3) jsem se soustředil na simulaci vybraných metod v programovém prostředí Matlab. Práce na simulacích mi pomohla lépe pochopit jednotlivé metody a ověřit si správnost myšlenek, které jsem aplikoval v praktické části práce v kapitolách 4, 5 a 6, kde popisují samotnou implementaci zařízení.

2. Metody lokalizace zdroje zvuku

Pro měření pozice zdroje zvuku se používají mikrofony, což jsou akusticko-elektrické měniče či senzory. Pro lokalizaci polem mikrofonů jsou třeba dva či více mikrofonů a libovolný druh výpočetní jednotky. Dle způsobu geometrického rozložení dělíme mikrofonní pole na následující typy:

- lineární pole
- rovinné pole
- prostorové pole

Tyto tři druhy pole lze ještě dále rozdělovat na dvě podskupiny dle vzdáleností mezi mikrofony. Pokud jsou všechny mikrofony od sebe stejně vzdálené, jedná se o pole uniformní čili rovnoměrné. V případě, že se vzdálenosti mezi mikrofony liší, jedná se o pole neuniformní neboli nerovnoměrné. Lineární pole je definováno jako řada mikrofonů za sebou. Ve své podstatě je lineární pole specifická podskupina rovinného pole. Rovinné pole, jak jeho název napovídá, má uspořádané mikrofony libovolně, ale vždy v jedné rovině. Pole prostorové je na tom s názvem podobně jako pole rovinné, také jeho název odpovídá uspořádání mikrofonů – ve 3D prostoru. Ve své práci se vzhledem k požadavkům na výsledný systém zaobírám prvními dvěma rozloženími pole – lineárním a rovinným.

Pro lokalizaci zdroje zvuku polem mikrofonů existuje několik všeobecně známých principů. Některé z těchto principů v následující kapitole přiblížím. Budu se věnovat především metodě založené na spektrálním odhadu vysokého rozlišení, metodě tvarování přijímací charakteristiky, metodě časových zpoždění a metodě útlumu zvuku.

Pro nadcházející teorii, simulace a realizaci systému je nutné upozornit na definici vzdáleného pole a na předpoklad, že prostředí, ve kterém se šíří vlna, je homogenní. Za vzdálené pole se obecně považuje situace, kdy vzdálenost zdroje zvuku od mikrofonu resp. pole mikrofonů je srovnatelná s velikostí tohoto zdroje, takže zakřivení kulové vlnoplochy šířícího se akustického signálu je velmi malé. Tím pádem lze vlnoplochu považovat za rovinnou. Vzorec (2.1) udává mez mezi blízkým a vzdáleným polem.

$$D = \frac{2 * L^2}{\lambda} \quad (2.1)$$

D je vzdálenost od zdroje, **L** je velikost zdroje a λ je vlnová délka odpovídající frekvenci akustického signálu.

Další podmínkou pro úspěšnou lokalizaci zvukového zdroje je splnění podmínky, která potlačí prostorový aliasing. Vzorec (2.2) určuje hodnotu minimální vlnové délky, která musí být menší než vzdálenost dvou elementárních mikrofonů v poli.

$$d < \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (2.2)$$

λ_{min} je hodnota minimální vlnové délky akustického signálu, **d** je vzdálenost dvou elementárních mikrofonů.

2.1 Spektrální odhad vysokého rozlišení

V anglické literatuře tyto metody lze nalézt pod názvem High-Resolution Spectral-Estimation-Based Locators. Autoregresní modelování (AR) je jedna z metod spektrálního odhadu vysokého rozlišení, kterou lze využít jen pro případ vzdáleného pole. Další metody jsou spektrální odhad minimálního rozptylu (MV - Minimum Variance) a vícenásobná klasifikace signálu (MUSIC - Multiple Signal Classification). Tyto dvě metody se dají rozšířit i pro situaci blízkého pole. Za situaci blízkého pole je obecně považován případ, když je vzdálenost mikrofonu od akustického zdroje menší než vypočítaná vzdálenost **D** ze vzorce (2.1). Zmíněné metody jsou založeny na spektrálních fázových korelačních maticích. Exaktní podoba této matice je odvozena pro všechny elementární prvky v mikrofonním poli z vypočítaných údajů. Při stacionárních parametrech odhadu zdroje a šumu dochází k odvození spektrálních fázových korelačních matic středními hodnotami signálů. V praxi je velmi obtížné zajistit tyto stacionární podmínky pro řečové zdroje.

Metody založené na spektrálních odhadech vysokého rozlišení nacházejí své využití v oboru radarové lokalizace, protože drtivá většina těchto metod má svůj limit v aplikacích s úzkopásmovými signály. U spektrálního odhadu vysokého rozlišení je možné lépe určit polohu zvukových zdrojů, které mezi sebou mají malou vzdálenost, než u metod založených na tvarování přijímací charakteristiky.[7] Detailnější informace o těchto metodách je možno nalézt v kapitole 8 v [3].

2.2 Metody tvarování přijímací charakteristiky

Tyto metody patří svou podstatou mezi spektrální metody. Ve světě je známo mnoho typů těchto metod. Jeden ze základních přístupů je použití tvarovače typu delay and sum. Složitější tvarovače přijímací charakteristiky využívají filtry signálového pole. Díky typům těchto filtrů tvarovačů (filter and sum tvarovačů) je rozlišujeme od ostatních metod. Metody tvarování přijímací charakteristiky vyhledávají v daném prostoru okruh akustického záření, v němž je hladina akustické energie největší. Úhel, pod kterým zvuková vlna dopadá a tudíž i směr příchodu zvuku, je možné vyčíst z tvarované přijímací charakteristiky pole mikrofonů. Pro dosažení co nejkvalitnější směrové charakteristiky, v námi požadovaném směru, se mění váhy elementárních mikrofonů v poli. Výhodou těchto metod je lokalizace více akustických zdrojů. Více informací o metodách tvarování lze nalézt v [3].

Dříve byly tyto metody pro zachytávání hlasového signálu v řečových aplikacích užívány často, nyní se kvůli jejich velké náročnosti na výpočetní systém, využívají v lokalizátorech zdrojů zvuku jen zřídkakdy. [7]

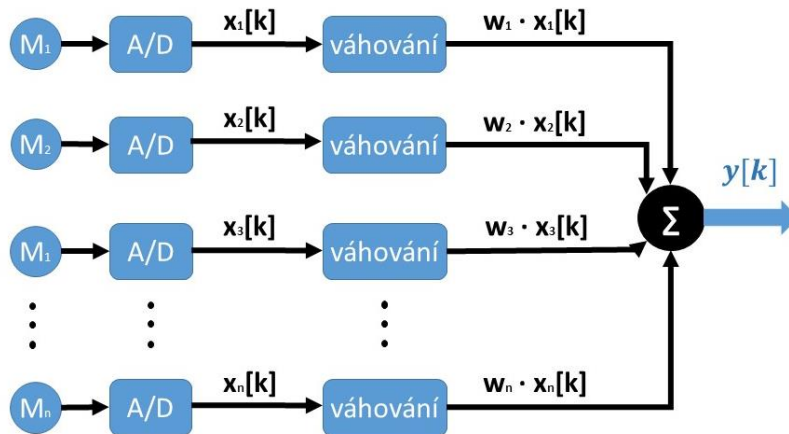
2.2.1 Tvarovač Delay And Sum (DAS)

Tvarovač typu DAS, mnohdy označovaný jako konvenční tvarovač, používá zpožďovací členy za účelem vyrovnání zpoždění signálu, které vzniká dobou šíření zvukového signálu od zdroje k elementárním mikrofonům v poli.

Diskrétní výstup tvarovače DAS se vypočítá dle následující rovnice:

$$y[k] = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i[k] , \quad (2.3)$$

kde n odpovídá počtu elementárních mikrofonů, w_i je váha i -tého elementárního mikrofonu a $x_i[k]$ je výstupní signál z i -tého elementárního mikrofonu.



Obr. 2.1 Schématické uspořádání DAS tvarovače

Časově uspořádané signály z jednotlivých elementárních mikrofonů jsou váhovány a jejich sumace vytváří jeden signál na výstupu. Pro určení polohy akustického zdroje, resp. pro určení jeho směru příchodu – anglicky Direction of Arrival (DOA), musíme nutně vyčíslit výstup tvarovače pro každý úhel. Pro který úhel bude mít výstup z tvarovače delay and sum největší hodnoty, ten značí **DOA** zvukového signálu. Váhy elementárních mikrofonů w_i se mnohdy definují na hodnoty $w_i = 1$ a nebo $w_i = 1/n$. Komplexní váhy w_i se využívají pro víceúhlové vyhledávání směru příchodu zvuku fázovým posunem.

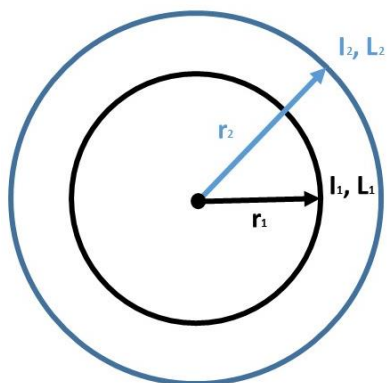
Tvarovač typu delay and sum má velkou závislost na spektru akustického signálu. Pro přesný odhad směru příchodu zvuku by měla být eliminována ozvěna a šum. [7]

2.3 Metoda útlumu zvuku

Základ těchto metod je zřejmý, jak název napovídá. Pro lokalizaci zdroje se používá útlumových vlastností zvuku ve vzduchu. Šířením zvuku a řešením akustických veličin v prostoru se zabývá prostorová akustika. Tyto prostory rozdělujeme na otevřené a uzavřené, resp. exteriéry a interiéry. Akustika exteriérů je velmi složitá vědní disciplína, a proto zde vysvětlím jen několik základních principů.

2.3.1 Šíření zvuku v otevřeném prostoru

Intenzita je u rovinných zvukových vln stálá, u kulových vln se snižuje s druhou mocninou vzdálenosti od akustického zdroje.



Obr. 2.2 Šíření sférické vlny

Z obrázku Obr. 2.2 definujeme intenzitu I_1 a hladinu intenzity L_1 ve vzdálenosti r_1 od bodového zdroje, obdobně ve vzdálenosti r_2 od zdroje je hodnota intenzity I_2 a hodnota hladiny intenzity L_2 . Vztah mezi intenzitami a vlnoplochami udává následující vzorec:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (2.4)$$

Dále definujeme hladinu intenzity L_1 a L_2 vzorce (2.5) a vzorce (2.6):

$$L_1 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} L_2 &= 10 \cdot \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \cdot \frac{r_1^2}{r_2^2} \\ &= 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} + 10 \cdot \log \frac{r_1^2}{r_2^2}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Za předpokladu že $I_1 > I_2$, tedy $r_2 > r_1$ se vypočítá hladina intenzity L_2 dle vzorce:

$$L_2 = L_1 - 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.7)$$

Rovnice (2.7) udává pokles intenzity se vzdáleností od bodového akustického zdroje. Tomuto poklesu intenzity akustického signálu se říká sférický útlum. Při dosazení za $r_2/r_1 = 2$, to odpovídá vzdálení na dvojnásobek původní vzdálenosti, bude hodnota sférického útlumu dle rovnice (2.7) rovna -6dB.

Během šíření akustického signálu ve vzduchu dochází také k absorpci energie. Této absorpci se říká atmosférický útlum. Dle Knesera ve vzduchu ubývá energie akustického signálu dvěma různými způsoby.

Za prvé vlivem vedení a vyzařování tepla, viskozity a difúze – tzv. klasický útlum, jenž je úměrný frekvenci na druhou. U nižších frekvencí je hodnota klasického útlumu zanedbatelná. Pro větší frekvence je tato hodnota znatelnější, např. pro 10 kHz je klasický útlum přibližně 1,5 dB na 100 m.

Za druhé dochází vlivem relaxace pohybu molekul kyslíku k úbytku energie akustického signálu. Tento útlum se nazývá molekulární a je závislý z velké části na objemu vody ve vzduchu, na teplotě a frekvenci. Má široký rozsah hodnot a v extrémních případech může nabývat až 20 dB na 100 m. Při označení poklesu intenzity atmosférickým útlumem ΔL a činitelem útlumu na dráze 1 m α , poté platí:

$$\Delta L'' = -\alpha \cdot (r_2 - r_1). \quad (2.8)$$

Jak molekulární, tak i klasický atmosférický útlum roste lineárně se vzdáleností. Rovnice (2.7) udává pokles intenzity akustického signálu sférickým útlumem. Rovnice (2.10) poté udává hodnotu celkového poklesu hladiny akustického signálu vycházejícího z bodového zdroje. Tato rovnice zahrnuje oba dva útlumy, sférický i atmosférický. [11]

$$\Delta L' = L_2 - L_1 = -20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1} \quad (2.9)$$

$$\Delta L = \Delta L' + \Delta L'' = -20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1} - \alpha(r_2 - r_1) \quad (2.10)$$

2.3.2 Popis systému s měřením útlumu

Jedná se z velké části o teoretický konstrukt. Systém pro lokalizování zdroje zvuku, založený na metodě útlumu zvuku vedeného vzduchem, dokáže určit přesnější pozici akustického zdroje pouze v ideálním případě. A to, že elementární mikrofony jsou všesměrové, aby nedocházelo k útlumu kvůli směrovosti přijímací charakteristiky mikrofonů, citlivost mikrofonů je dostatečně vysoká, že dokážeme rozeznat pokles menší než 1dB. Kmitočet zvuku vycházejícího z akustického zdroje je dostatečně vysoký, aby atmosférický útlum byl detekovatelný, a zároveň musí být intenzita zvuku konstantní a dostatečně velká, aby se celý zvuk neutlumil, než dojde od jednoho elementárního mikrofonu k druhému. Tento systém by musel být výpočetně velmi přesný, protože útlum signálu na malém úseku je minimální. Další problém nastává tím, že by vlhkost vzduchu i teplota musely být rovnoměrně rozloženy v celém měřicím prostoru.

2.4 Metoda časových zpoždění

Základ těchto metod spočívá ve vyhodnocování relativních časových zpoždění TDOA (Time Difference Of Arrival) mezi páry elementárních mikrofonů v jejich poli. Směr příchodu zvuku ze zdroje se spočítá pomocí geometrie a časového zpoždění signálu mezi páry elementárních mikrofonů, ze kterého se dá dopočítat vzdálenost, jakou urazil za dané zpoždění akustický signál.

V první fázi postupu se určí velikost časového zpoždění mezi dvěma mikrofony. Jednou z možností výpočtu časového posunutí signálů je vzájemná korelace (křížová korelace). Velikost časového zpoždění se určí polohou maxima v korelační funkci. Dle vzorkovací frekvence, geometrie mikrofonního pole a rušivých signálů se řídí přesnost určení časového zpoždění signálů. Druhá fáze postupu spočívá ve výpočtu směru příchodu zvuku od zdroje dle předem známého geometrického rozložení mikrofonního pole. Kvalita výpočtu závisí z velké míry na vlastnostech mikrofonů a geometrii mikrofonního pole.

K výpočtu pozice akustického zdroje je možné použít metodu tzv. částicového filtrování PF (Particle Filtering), která se hodí pro snímání pohybu akustického zdroje v místech s velkým množstvím odrazů. U prvního odhadu pozice akustického zdroje dochází k nesprávnému výsledku, který je způsoben falešnými maximy v lokalizační funkci. U následujících odhadů tento jev nenastává, protože se počítá s výsledky minulých odhadů pozice zdroje, tím se zlepšuje odolnost na dozvuky. Částicové filtrování se rozmáhá až v dnešní době, protože je náročné pro výpočetní techniku. Více informací o této metodě je v [13].

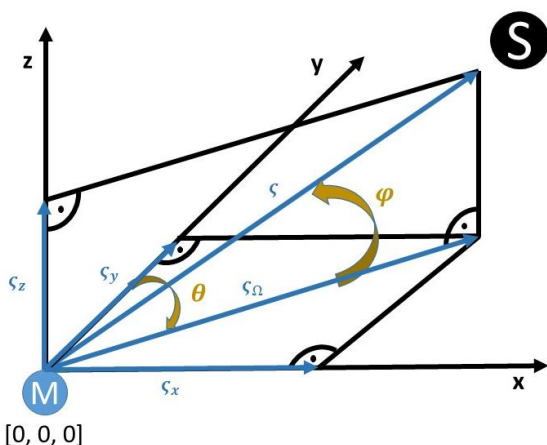
Mezi výhody metod založených na odhadu časových zpoždění patří relativně malé výpočetní nároky a možnost zpracování širokopásmových signálů, proto jsou to v praxi nejrozšířenější metody pro lokalizaci akustického zdroje. Nevýhodou je problematická lokalizace více zdrojů.

Metody FDOA (Frequency Difference Of Arrival) jsou velmi podobné metodám TDOA. FDOA jsou známé také jako metody DD (Differential Doppler). Využívají se ke sledování rychlosti, akceleraci a směru pohybujícího

se zdroje akustického signálu. Na rozdíl od metod založených na časovém zpoždění zde dochází k relativnímu pohybu senzorů. Pozice akustického zdroje se odhaduje ze znalosti přesné pozice elementárních mikrofonů, z vektorů rychlostí akustického zdroje i mikrofonů a z pozorovaných Dopplerových posunů mezi páry elementárních mikrofonů. Více informací o této metodě je v [14]. [7]

2.4.1 Teorie výpočtu zpoždění signálu mezi dvojicí mikrofonů

Teorie výpočtu zpoždění akustického signálu mezi mikrofony vychází z [10], v tomto zdroji byla pro 3D pole odvozena metoda nejmenších čtverců.



Obr. 2.3 Azimut a elevace směru příchodu zvuku

Jednotlivé polohy elementárních mikrofonů se vypisují do sloupcových vektorů. Každý vektor odpovídá souřadnicím x , y a z , na kterých se elementární mikrophon nachází ve třídímenzionálním prostoru: $M_i = [x_i; y_i; z_i]^T$. Spojením těchto sloupcových vektorů vznikne matice M o velikosti 3 x počet mikrofonů. Jednotlivé sloupce v této matici poté reprezentují pozici jednotlivých elementárních mikrofonů v prostoru:

$$M = \begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_i & \dots & x_n \\ y_1 & \dots & y_i & \dots & y_n \\ z_1 & \dots & z_i & \dots & z_n \end{pmatrix}, \quad (2.11)$$

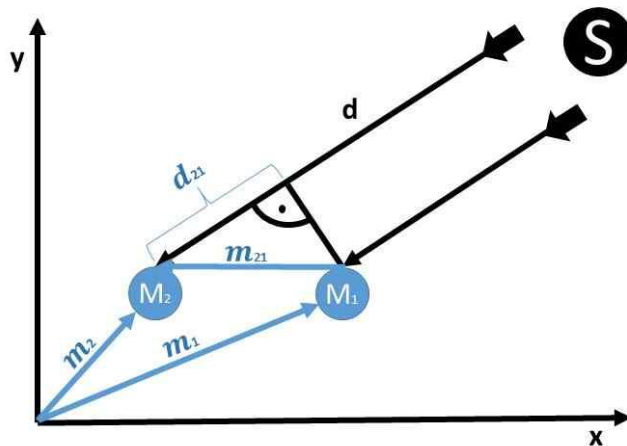
kde $[x_1, y_1, z_1]$ značí souřadnice prvního mikrofonu, $[x_i, y_i, z_i]$ souřadnice i-tého mikrofonu a $[x_n, y_n, z_n]$ souřadnice posledního mikrofonu. Pro odhad směru příchodu zvuku je zapotřebí určení dvou neznámých. První neznámá je azimut θ a druhá je elevace φ . Azimutem se rozumí velikost úhlu, který svírá osa y a jednotkový vektor ζ_Ω . Elevací se poté rozumí velikost úhlu svírajícího se mezi jednotkovým vektorem ζ_Ω a jednotkovým vektorem ζ . Grafické znázornění vektorů a celkový rozbor situace lze vidět na obrázku *Obr. 2.3*.

Ve třídímním pravoúhlém prostoru je možné definovat souřadnice jednotkového vektoru pomocí goniometrických funkcí následujícím způsobem:

$$\zeta = -[\cos \varphi \sin \theta, \cos \varphi \cos \theta, \sin \varphi]^T. \quad (2.12)$$

Vzhledem k tomu, že směr šíření zvuku od zdroje má opačnou orientaci vůči jednotkovému vektoru ζ , lze jej vyjádřit vektorem \mathbf{d} dle následujícího vzorce:

$$\mathbf{d} = [\cos \varphi \sin \theta, \cos \varphi \cos \theta, \sin \varphi]^T. \quad (2.13)$$



Obr. 2.4 Akustický signál dopadající na dva elementární mikrofony

Ve vzorci (2.13) je možné vektor směru příchodu zvuku k mikrofonům \mathbf{d} , pro zjednodušení, promítnout do dvoudímního prostoru dosazením

$\varphi = 0$. Zobrazení této situace je na obrázku *Obr. 2.4*. Ve vzorci (2.14) jsou zjednodušené souřadnice pro dvoudimenzionální prostor:

$$d = [\sin \theta, \cos \theta]^T. \quad (2.14)$$

Prostorové souřadnice elementárního mikrofonu \mathbf{M}_1 jsou vyjádřeny vektorem \mathbf{m}_1 a prostorové souřadnice elementárního mikrofonu \mathbf{M}_2 jsou vyjádřeny vektorem \mathbf{m}_2 . Vektor reprezentující spojnicí těchto dvou elementárních mikrofonů je \mathbf{m}_{21} . Vzdálenost \mathbf{d}_{21} lze vypočítat skalárním součinem vektoru \mathbf{m}_{21} s vektorem \mathbf{d} :

$$d_{21} = (\mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1)^T \mathbf{d}. \quad (2.15)$$

Velikost časového zpoždění mezi příchodem zvukového signálu na elementární mikrofon \mathbf{M}_1 a na elementární mikrofon \mathbf{M}_2 se vypočítá pomocí následujícího vzorce:

$$\tau_{21} = \frac{1}{c} [(\mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1)^T \mathbf{d}], \quad (2.16)$$

kde c odpovídá rychlosti šíření zvuku ve vzduchu. Z logiky věci poté vyplývá, že lze vyčíslit velikost časového zpoždění τ_{21} , za předpokladu znalosti směru příchodu zvuku od zdroje \mathbf{d} a souřadnic mikrofonů, resp. vektoru spojnice mezi nimi \mathbf{m}_{21} . U lokalizátorů zvuku se jedná o opačný problém: známé proměnné jsou doba zpoždění příchodu zvuku mezi mikrofony τ_{21} čili vzdálenost \mathbf{d}_{21} a souřadnice mikrofonů, resp. vektor spojnice mezi nimi \mathbf{m}_{21} . Pro třídimenzionální prostor je výpočet o jednu souřadnici a jeden úhel složitější.[7]

2.4.2 Křížová korelační funkce

Křížová korelační funkce je standardní metoda, která obecně vyjadřuje vztah mezi dvěma veličinami. Korelace je původem latinské slovo znamenající

vzájemný vztah, souvislost. Pokud se jedna z veličin mění, pak se mění korelativně i druhá veličina a naopak. Díky tomuto faktu lze usoudit, že pokud dvě veličiny vykazují korelaci, tak jsou na sobě závislé.

Pro spojité signály se počítá vzájemná korelační funkce vztahem:

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{t_b - t_a} \int_{t_a}^{t_b} s_1(t) s_2(t + \tau) dt, \quad (2.17)$$

kde t_a a t_b jsou hranice intervalu, na kterém se vzájemná korelační funkce počítá, $s_1(t)$ je hodnota prvního signálu v čase t a $s_2(t+\tau)$ je hodnota druhého signálu posunutého v čase o hodnotu τ .

Pokud délka intervalu $\langle t_a, t_b \rangle$ roste nad všechny meze, tak se definuje vzájemná korelační funkce signálů $s_1(t)$ a $s_2(t)$ jako:

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} s_1(t) s_2(t + \tau) dt. \quad (2.18)$$

Vztah pro vzájemnou korelační funkci (vzorec 2.18) má smysl u výkonových signálů. Výkonové signály jsou ty, u kterých roste energie nad všechny meze, ale výkon mají konečný.

Pro signály energetické, tedy signály finitní, které mají nenulovou konečnou energii ale nulový výkon, platí následující vztah pro vzájemnou korelační funkci:

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t) s_2(t + \tau) dt. \quad (2.19)$$

Podrobnější odvození vzorců a celkový detailní přehled základních charakteristik signálů lze nalézt v [15].

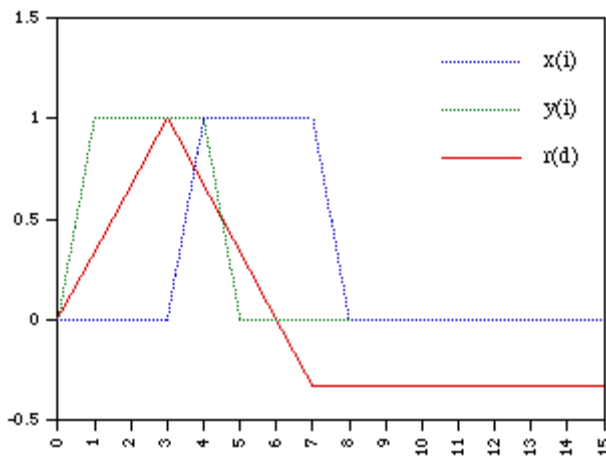
Diskrétní podoba vzorců pro vzájemnou korelační funkci signálů nekonečné délky vypadá následovně:

$$R_{12}[n] = \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{m=-N}^N s_1[m] s_2[m+n]. \quad (2.20)$$

Pro diskrétní signály konečné délky vypadá takto:

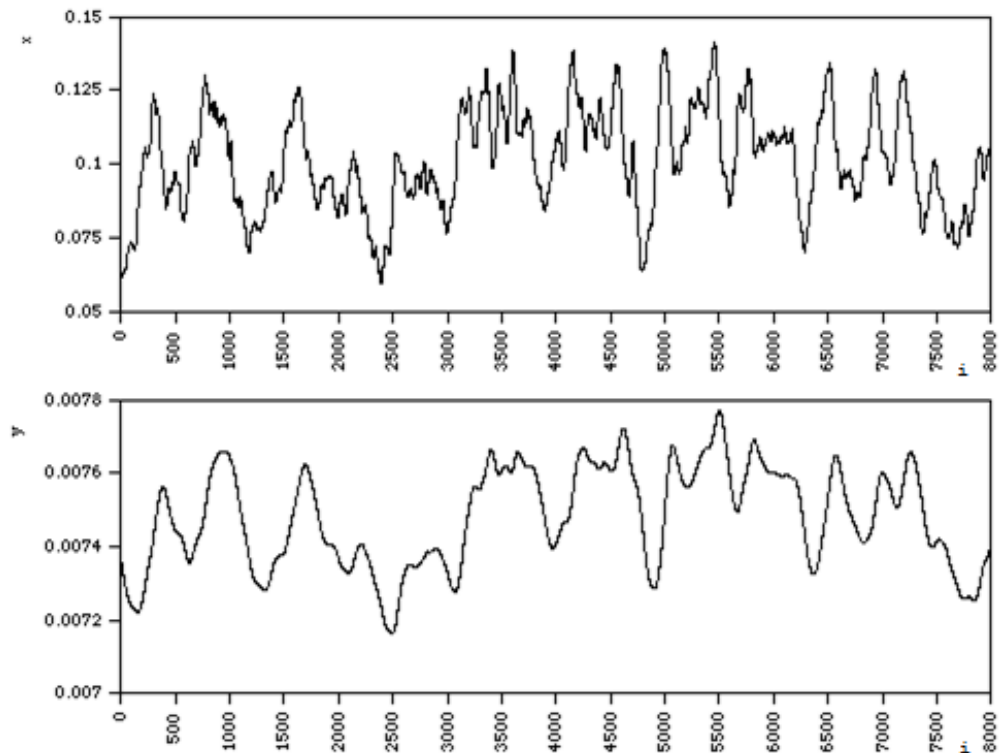
$$R_{12}[n] = \sum_{m=-N}^N s_1[m]s_2[m + n]. \quad (2.21)$$

Jednoduchý příklad vzájemné korelační funkce (křížové korelační funkce) je zde prezentován dvojicí obdélníkových pulzů (*Obr. 2.5*). První pulz představuje zelený signál $\mathbf{y(i)}$, tento signál odpovídá, ve vzorcích pro vzájemnou korelaci diskrétních signálů, signálu $\mathbf{s_2[n]}$. Druhý pulz představuje modrý signál $\mathbf{x(i)}$ odpovídající signálu $\mathbf{s_1[n]}$. Výslednou křížovou korelační funkci reprezentuje červený signál $\mathbf{r(d)}$ odpovídající členu $\mathbf{R_{12}[n]}$.

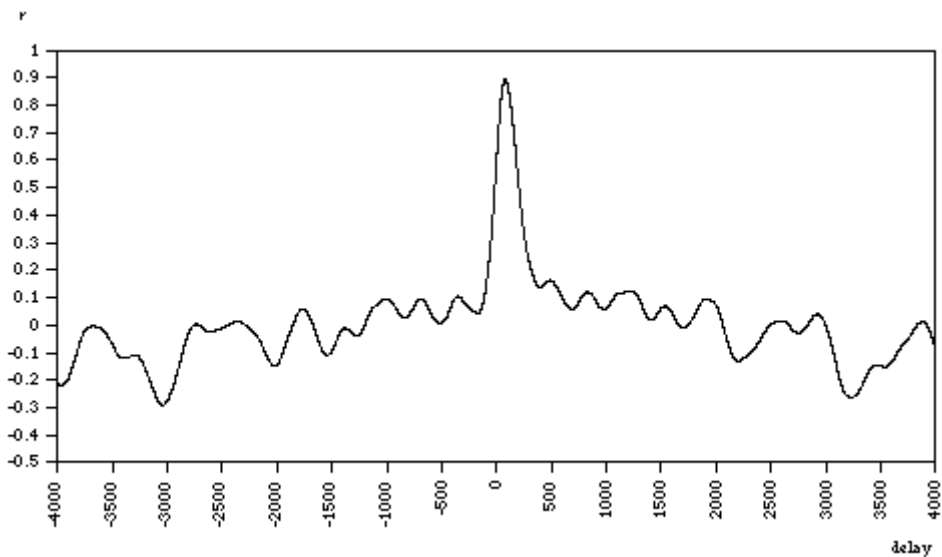


Obr. 2.5 Vzájemná křížová korelace - převzato z [16]

Komplexnější ukázka průběhu vzájemné korelační funkce diskrétních signálů je zobrazena na obrázku *Obr. 2.6* a obrázku *Obr. 2.7*. Kvůli větší přehlednosti jsou grafy jednotlivých diskrétních signálů a též graf výsledné křížové korelační funkce zobrazeny samostatně. Značení odpovídá předchozímu příkladu.



Obr. 2.6 Diskrétní signály x a y - převzato z [16]



Obr. 2.7 Výsledek korelační funkce signálů z Obr. 6 - převzato z [16]

U obou příkladů vzájemné korelační funkce jsou výsledné hodnoty v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. V prvním příkladu nabývá vzájemná korelační funkce hodnoty až $+1$, protože signál x i y jsou totožné, pouze posunuté. Avšak ve druhém příkladu již

ani jedna z výsledných hodnot nedosahuje +1. Tento jev je způsobený tím, že signály nejsou totožné. Nejen, že je rozdílná jejich amplituda, jsou také různě zašuměné.

2.4.3 Výpočet DOA pomocí křížové korelace

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4.1 inverzním výpočtem je možno dopočítat směr příchodu zvuku z akustického zdroje **DOA**. Je zapotřebí znát časové zpoždění (τ_{21}), vzdálenost (d_{21}) a pozice mikrofonů. Vzdálenost mikrofonů i jejich pozice jsou známy, časové zpoždění se získá ze vzájemné korelační funkce. Maximum ve funkci vzájemné korelace se vyskytne na určité pozici. Tato pozice je definována indexem. Pokud se index vynásobí známou hodnotou periody vzorkovací frekvence, dostane se přesná hodnota časového zpoždění signálu jednoho elementárního mikrofonu od signálu druhého elementárního mikrofonu. Díky takto získanému zpoždění je již možné určit **DOA**.

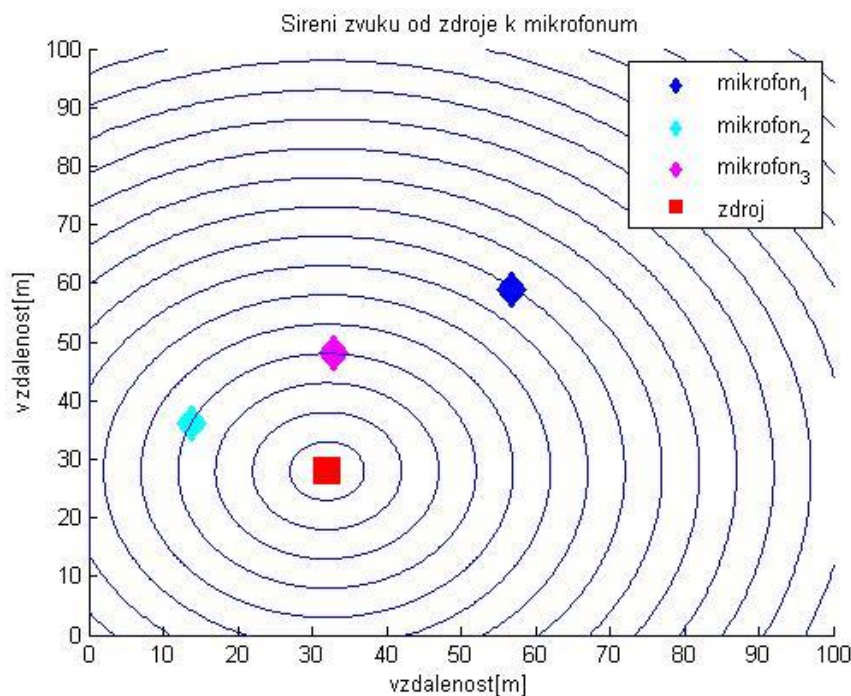
3. Simulace vybraných metod lokalizace zvuku

Pro ověření vlastností některých metod zmíněných v kapitole 2 jsem použil program Matlab R2014b. Matlab je interaktivní vývojové prostředí s vysoce vyvinutým jazykem pro programování. V tomto vývojovém prostředí je možné naprogramovat a nasimulovat téměř cokoli. Vzhledem k nesčetnému počtu uživatelů jsou jeho novější verze vždy něčím obohaceny. Díky tomu je možné simulovat i některé úlohy ze signálového zpracování. [17] Pro simulace byly vybrány metody lokalizace akustického zdroje na základě časových zpoždění a metoda lokalizace zvukového zdroje na základě útlumu zvuku. Metody založené na spektrálním odhadu vysokého rozlišení nebyly simulovány, protože nejsou vhodné pro budoucí implementaci systému, který má pracovat jako asistenční pomůcka pro neslyšící. Stejně tak nebyly simulovány metody založené na tvarování přijímací charakteristiky. Všechny simulační soubory jsou na přiloženém CD.

3.1 Simulace lokalizace pomocí útlumu

Simulace lokalizace zvukového zdroje založená na metodě určení rozdílných útlumů signálu, který dorazí na jednotlivé elementární senzory v poli mikrofonů. V praxi nejsou systémy tohoto typu realizovány, protože jsou velmi obtížně konfigurovatelné a lokalizace zdroje je teoreticky možná pouze za ideálních podmínek, proto tato simulace obsahuje pouze nastínění problematiky. Teorii pokrývající tuto simulaci lze nalézt v kapitole 2.3.

Tato simulace se skládá z náhodně vygenerované pozice zdroje a tří elementárních mikrofonů do rovinného mikrofonního pole. Velikost plochy, do které se náhodně generují pozice mikrofonů a zdroje, je 75 x 75 metrů.



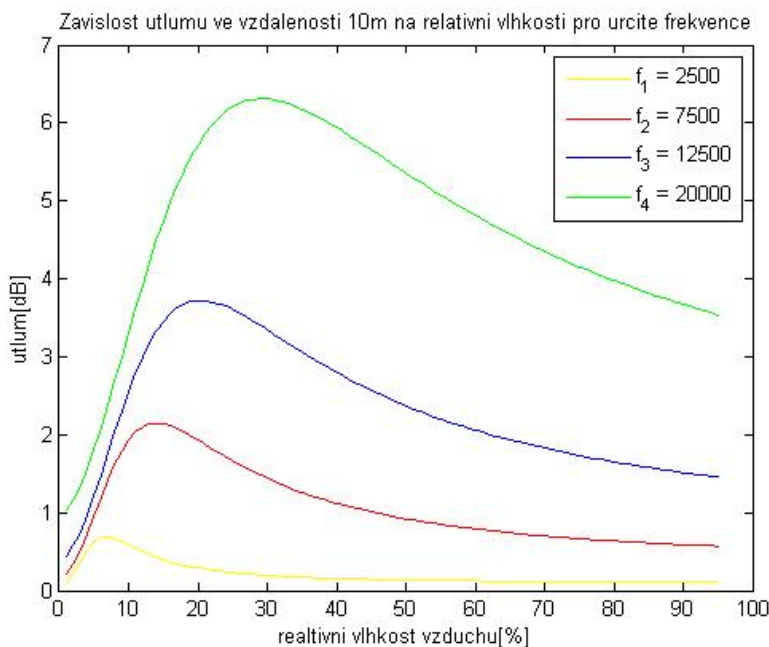
Obr. 3.1 Zobrazení náhodného rozložení pozic zdroje a mikrofonů

Po vygenerování pozic se dopočítává vzdálenost elementárních mikrofonů od akustického zdroje. Dále si na začátku simulace definuji hodnoty fyzikálních veličin ovlivňujících atmosférický útlum při šíření zvuku. Tyto veličiny jsou:

- teplota ve stupních Celsia
- statický tlak ve „rtuťových palcích“
- relativní vlhkost vzduchu v procentech
- vzdálenost bodů, mezi kterými se počítá útlum, vyjádřená v metrech
- frekvence zvuku akustického zdroje v hertzech.

V dalším kroku simulace si vypočítávám velikost atmosférického útlumu za pomoci funkce **atmAtten**. Tato funkce byla vytvořena Nathanem Burnsidem z firmy AerospaceComputing Inc. [18] Pro vypočtení celkového útlumu si musím určit velikost útlumu způsobeného sférickým šířením zvuku od bodového akustického zdroje. Celkový útlum poté spočítám součtem těchto dílčích útlumů. Pro zpětnou lokalizaci zvukového zdroje by se dala použít metoda založená na triangulaci.

Simulaci jsem doplnil o vykreslení grafu závislosti útlumu na relativní vlhkosti vzduchu. Na výsledném grafu (*Obr. 3.2*) jsem danou závislost vykreslil pro několik frekvencí. Konkrétně pro 2,5 kHz; 7,5 kHz; 12,5 kHz a 20kHz.



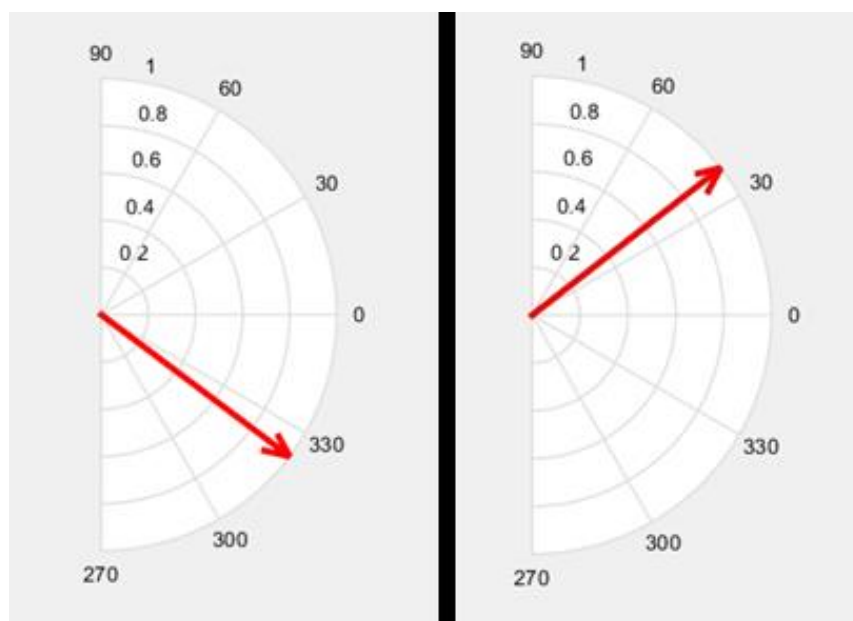
Obr. 3.2 Závislost útlumu na relativní vlhkosti

3.2 Simulace lokalizace pomocí TDOA č. 1

Jako základní stavební kámen této simulace jsem použil jeden z příkladů, které jsou defaultně obsaženy v instalačním souboru vývojového prostředí Matlab R2014b. Jedná se o toolbox systému s DSP (Digitální Signálový Procesor), přesněji o soubor příkladů systému s DSP a podsoubor příkladů zpracování zvuku. Překlad názvu příkladu zní: Odhad směru příchodu v reálném čase pomocí lineárního pole mikrofونů. Celkové znění anglických názvů v cestě k příkladu je: DSP System Toolbox → DSP System Toolbox Examples → Audio Processing → Live Direction Of Arrival Estimation with a Linear Microphone Array. Tento příklad jsem poupravil tak, aby co nejvěrněji simuloval systém, který by mohl napomáhat jako asistenční pomůcka pro sluchově postižené lidi. Přestože jsem modifikoval uživatelská práva, aby bylo možné vnitřní „matlabovský“ příklad měnit dle libosti, nastal problém v používání tzv. p-file souboru. Protected Function File (p-file), je chráněný soubor

vytvořený vývojářským týmem programového prostředí Matlab, který nejde upravovat, a ani není možné zobrazit zdrojový kód. Tento fakt zapříčinil, že rozsah mých úprav, jenž jsem provedl v příkladu, není příliš velký, avšak i přesto mohu pro simulační účely příklad úspěšně využít.

Samotná simulace ukazuje, jak získat a zpracovat vícekanálový zvuk, dále prezentuje jednoduchý algoritmus pro odhad **DOA** zvukového zdroje použitím mikrofonních párů z lineárního pole. Na začátku si zvolím mezi snímáním zvuku v reálném čase a předem nahráním zvukem. Po zvolení předem nahrání zvuku se načte do skriptu 20 sekundový záznam 4 audio kanálů. Tento předem nahrání záznam obsahuje zvuk pohybujícího se zdroje od -40° do $+40^\circ$ a nazpátek do původní pozice. V dalším kroku si definuji geometrii lineárního mikrofonního pole. Po tomto kroku následně definuji páry elementárních mikrofónů, mezi kterými se má zvuk porovnávat, a inicializuje se vizualizace směru příchodu. Poté se v preprocesoru seskupí signály definovaných dvojic mikrofónů a sestaví se stavební bloky pro křížovou korelaci. Pro zpřesnění odhadu **DOA** se využívá interpolátor. V hlavní smyčce skriptu se opakovaně načítají data o příslušné délce, vyhodnotí se směr jejich příchodu a tento směr se vizualizuje v polovině polárního grafu. Způsob vizualizace je vidět na obrázku *Obr. 3.3*.



Obr. 3.3 Vizualizace DOA pro zvuk přicházející z -40° (vlevo) a z $+40^\circ$ (vpravo)

3.3 Simulace lokalizace pomocí TDOA č. 2

Rozdíl od simulace v kapitole 3.2 spočívá nejen v odlišném zpracování signálu a pozdějším určení polohy akustického zdroje, ale simulace obsahuje i rozpoznání čtyř zvuků na základě jejich rozdílných spekter.

Na začátku simulačního souboru si deklaruji globální proměnné, které se předávají v průběhu simulace mezi jednotlivými funkcemi, dále si definuji grafické rozložení GUI, jenž se otevře po spuštění simulace. Poté si načítám čtveřici zvukových souborů pro další zpracování. Již zmíněná čtveřice zvuků je složena ze zvuku automobilu, záchranného vozidla, vlaku a sinusového signálu o frekvenci 15 kHz. Po startu simulace je možné vybrat vzdálenost elementárních mikrofonů od sebe a směr příchodu zvuku. Směr příchodu je možné určit zprava nebo zleva. Po výběru vzdálenosti mikrofonů a směru příchodu zvuku od akustického zdroje lze kliknout na tlačítko s nápisem „Výpočet“ a simulace vypočítá pomocí prvního stěžejního algoritmu předpokládaný **DOA** a dle druhého stěžejního algoritmu určí, o jaký druh zvuku se jedná. Tyto výsledky si posléze zobrazují v tabulce jako matice jedniček a nul. V případě kladného výsledku si pro daný směr či rozpoznaný zvuk vypíší na příslušnou pozici v matici „1“. V opačném případě nechávám na dané pozici „0“.

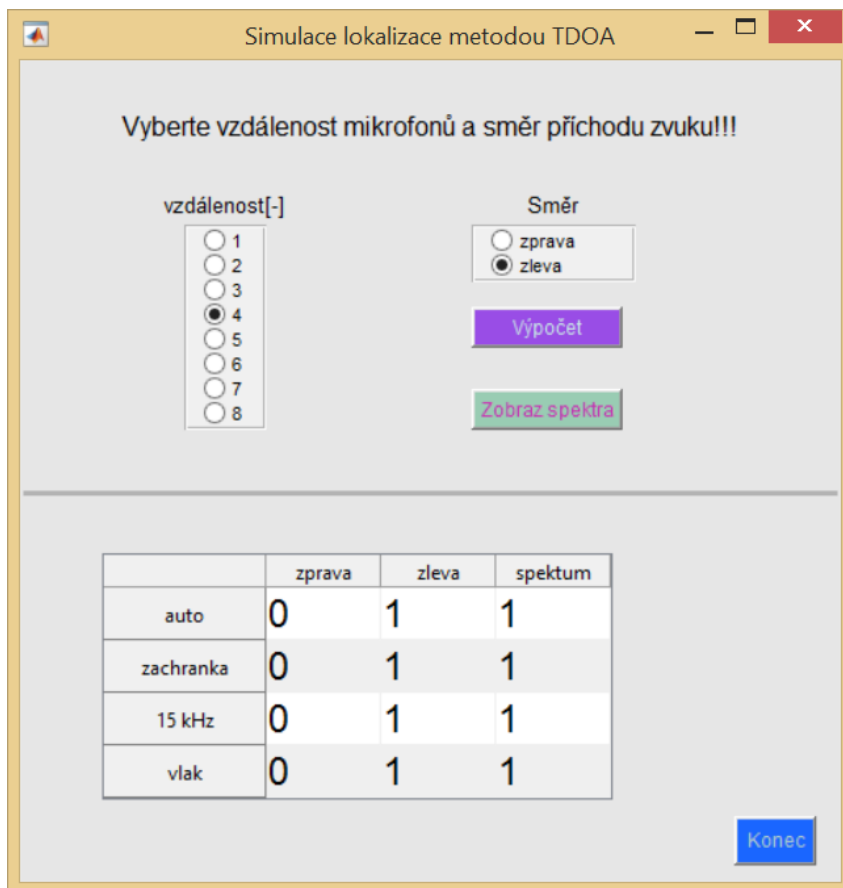
První důležitý algoritmus je pro určení **DOA**. Základ tohoto algoritmu tvoří získání 32 po sobě jdoucích vzorků pro jeden elementární mikrofon z mikrofonního pole a 32 zpožděných po sobě jdoucích vzorků pro druhý elementární mikrofon. Velikost zpoždění načítám dle vzdáleností mikrofonů, jenž byla definována uživatelem. Z uživatelem definovaného směru si získám znaménko pro zpoždění resp. „zrychlení“. Poté si spočítám průměrnou hodnotu ze získaných 32 vzorků pro každý mikrofon zvlášť a touto hodnotou si naplním pole o trojnásobné délce, než je počet uložených vzorků. Doprostřed prvního trojnásobného pole si uložím hodnoty 32 prvních uložených vzorků, do druhého pole trojnásobné délky si uložím druhých uložených 32 vzorků na začátek. Následuje posouvání druhým 32 vzorkovým signálem až na konec trojnásobného pole a v každém kroku tohoto cyklu spočítám vzájemnou euklidovskou vzdálenost trojnásobných polí od sebe. Přitom si prověřuji, pro jaké posunutí druhého signálu je vzdálenost nejmenší. Tato hodnota by následně

měla odpovídat kladnému či zápornému posunutí druhého signálu vůči prvnímu. Ve své podstatě se jedná o křížovou korelační funkci.

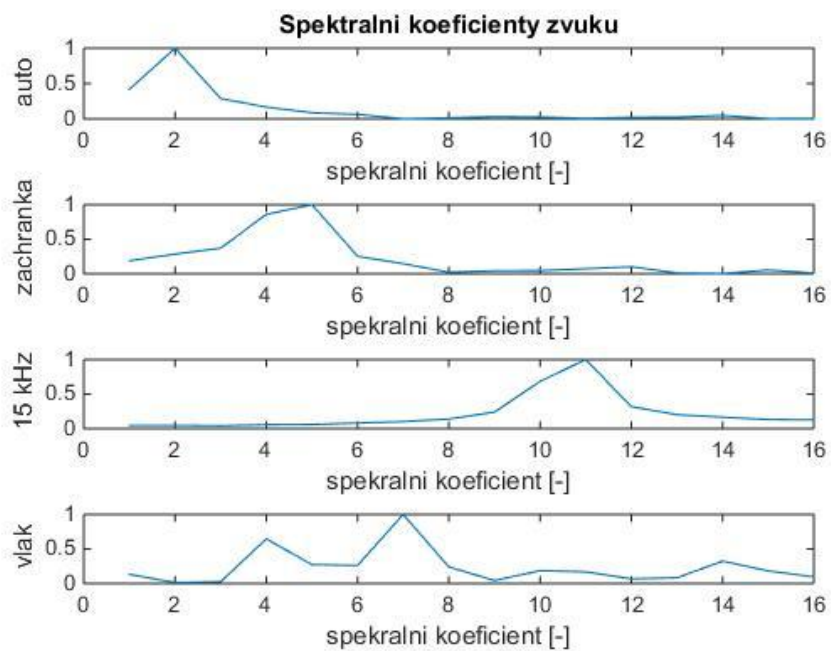
Druhý důležitý algoritmus se skládá ze dvou částí. První je převod signálu z časové oblasti do oblasti frekvenční. Pro tuto transformaci jsem zde zvolil modifikaci DFT – Diskrétní Fourierova Transformace. Po transformaci si nanormuji spektrální koeficienty a ty v druhé části algoritmu porovnávám s předem uloženými spektrálními koeficienty jednotlivých zvuků, jenž chci rozpoznávat.

Další z možností simulačního GUI se skrývá pod tlačítkem s názvem „Zobraz spektra“. Po stisku tohoto tlačítka se uživateli zobrazí nové okno se čtyřmi podgrafy. Na každém podgrafu zobrazují spektrální koeficienty odpovídající příslušným 32 vzorkům daného zvuku.

Tvary spekter a i výsledky simulace pro určení zvuků nejsou konstantní. Tento jev je způsobený tím, že některé zvukové záznamy byly nastříhány a nastaveny za účelem prodloužení záznamu. Další strůjce chybného vyhodnocení je náhodný výběr místa, odkud se ze záznamů čerpá 32 dále zpracovávaných vzorků. Ve velké míře tento náhodný výběr ovlivňuje i výsledky určení směru příchodu zvuku od akustického zdroje.



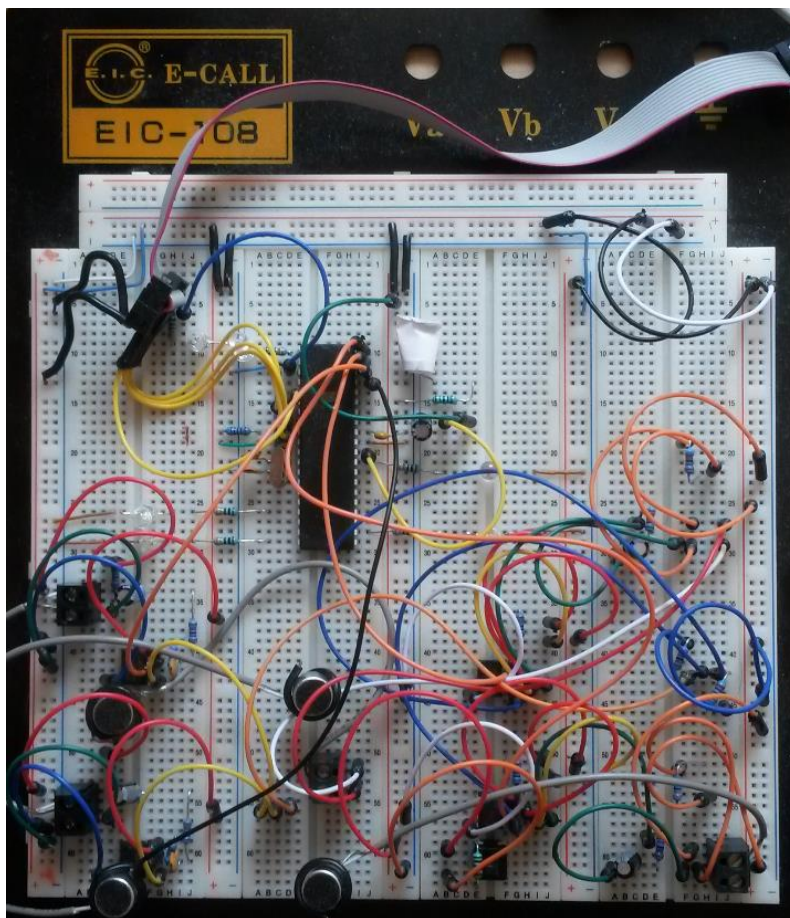
Obr. 3.4 GUI se zobrazením správného výpočtu parametrů



Obr. 3.5 Zobrazení podgrafů jednotlivých spekter

4. Implementace zařízení pro lokalizaci zvuku

Obsahem této kapitoly je popis implementace navrženého systému, který se dá použít jako asistenční pomůcka pro sluchově postižené. Celou realizaci jsem provedl tak, aby byl cílový produkt pokud možno co nejlevnější, a proto lehce rozšiřitelný mezi všechny neslyšící, bez velkých nákladů. Jako základ systému jsem použil procesor ATmega16 od Atmelu. Během celé realizace systému jsem pro měření, testování algoritmů a ověřování zpracování dat používal vývojový kit Arduino Due. V následujících kapitolách popisuji hardware, který jsem během realizace využil. Pro vývoj systému jsem využil nepájivé pole, jehož finální podoba je na obrázku *Obr. 4.1*. Schéma zapojení implementovaného systému je na obrázku *Obr. 7.2*. K programování jsem použil AVR-ISP-MK2 programátor od firmy Olimex. Finální program pro mikroprocesor ATmega16 je na přiloženém CD.



Obr. 4.1 Finální zapojení systému na nepájivém poli

4.1 Arduino Due

Vývojový kit Arduino Due je postavený na mikroprocesoru SAM3X8E ARM Cortex-M3 od firmy Atmel. Tento kit je první od firmy Arduino postavený na 32-bitovém ARM mikroprocesoru. Obsahuje 54 digitálních I/O pinů, 12 analogových vstupních pinů, 2 analogové výstupní piny a 4 hardwarové sériové porty. Procesor má frekvenci 84 MHz. Paměť se skládá z paměťové jednotky SRAM o velikosti 96 KB a z paměti typu flash o velikosti 512 KB. Deska Arduino Due se připojuje do PC pomocí mikro-USB kabelu. A poté se programuje pomocí počítačového programu Arduino 1.6.2. Více informací o vývojovém kitu lze nalézt v [19].

Volba toho vývojového kitu byla ovlivněna tím, že mikroprocesor SAM3X8E má velkou výpočetní kapacitu a velmi krátký čas potřebný k jednomu cyklu A/D převodu. Při testování algoritmů jsem zjistil, že tento fakt neodpovídá reálné době A/D převodu, která byla mnohem delší, než doba A/D převodu u levného mikroprocesoru ATmega16. U vývojového kitu je **ADC** (Analog-to-Digital Converter) – analogově digitální převodník je defaultně nastaven na délku jednoho převodu 40 μ s, tato doba pro konverzi odpovídá vzorkovací frekvenci 25 kHz. Původní nastavení rozlišení analogově-digitálního převodu je 10 bitů, to odpovídá rozsahu hodnot od 0 do 1023. Rychlost **ADC** nebyla pro testovací účely dostatečná, lze ji ale ovlivnit modifikací *ADC Mode Registeru*. Je to možné při doplnění testovacího programu pro Arduino Due o následující část kódu:

```
REG_ADC_MR = (REG_ADC_MR & 0xFFF0FFFF) | 0x00020000;
```

43.7.2 ADC Mode Register

Name: ADC_MR

Address: 0x400C0004

Access: Read-write

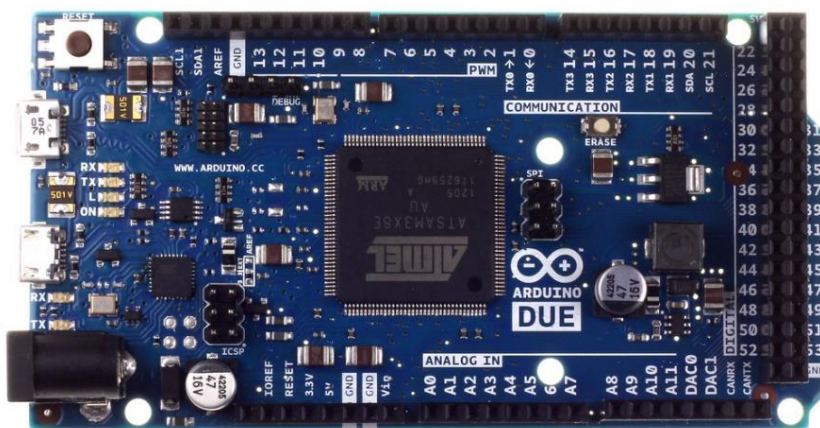
31	30	29	28	27	26	25	24
USEQ	–	TRANSFER		TRACKTIM			
23	22	21	20	19	18	17	16
ANACH	–	SETTLING		STARTUP			
15	14	13	12	11	10	9	8
PRESCAL							
7	6	5	4	3	2	1	0
FREERUN	FWUP	SLEEP	LOWRES	TRGSEL		TRGEN	

• **STARTUP: Start Up Time**

Value	Name	Description
0	SUT0	0 periods of ADCClock
1	SUT8	8 periods of ADCClock
2	SUT16	16 periods of ADCClock

Obr. 4.2 Zobrazení tabulek pro nastavení ADC Mode Registru - převzato z [21]

Poté se přepíše hodnoty v *ADC Mode Registru*. Nejprve se bitově vynásobí registr s hexadecimální hodnotou FFF0FFFF, tím se vynulují bity 16, 17, 18 a 19. Jak je vidět na obrázku *Obr. 4.2*, tyto bity odpovídají sekci STARTUP, ve které se nastavuje hodnota dle požadovaného počtu period hodin **ADC** pro nastartování A/D převodu. V další fázi se *ADC Mode Registr* bitově sčítá s hexadecimální hodnotou 00020000. Tímto krokem se do vynulované sekce STARTUP nastaví šestnáctková hodnota 2. Na obrázku *Obr. 4.2* je vidět, že tato hodnota zastupuje SUT16, čili pro nastartování A/D převodu je třeba 16 period hodin **ADC**. Tato modifikace registru zapříčiní snížení doby analogově digitální konverze až na 3,97 μ s. Existují další možnosti modifikace již zmíněného registru, které umožní snížení doby jednoho převodu až na 3,11 μ s. Pro testování mého systému mi stačí čas jednoho převodu 3,97 μ s s rezervou, proto k dalším úpravám nedošlo.



Obr. 4.3 Arduino Due - svrchní strana – převzato z [19]

```

porovnaní_spekter4 $
int maxfuxr[8000];
int maxfuyr[8000];
int pozmaxx[8000];
int pozmaxy[8000];
void setup()
{
  REG_ADC_MR = (REG_ADC_MR & 0xFFFFFFF) | 0x00020000;
  Serial.begin(115200);
}
void loop()
{
  for (int opak = 0; opak<100; opak++){
    for (int i=0; i<n; i++){
      x[i][opak] = analogRead(analogPinx);
      delayMicroseconds(20);
    }
  }
}

```

Obr. 4.4 Arduino IDE - GUI

4.2 Elektretové mikrofony

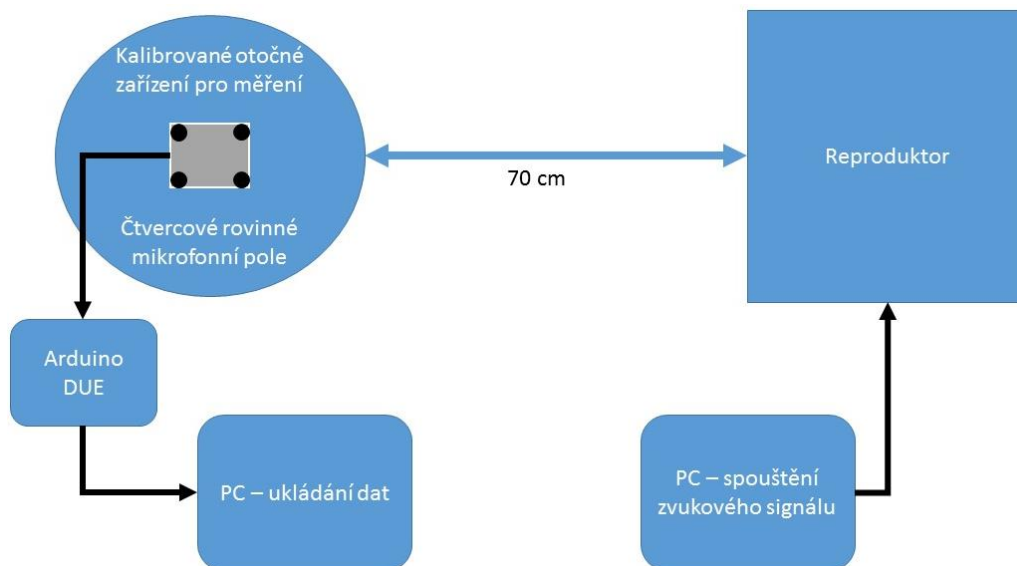
Jako akusticko-elektrický měnič se použil všesměrový elektretový mikrofons s kondenzátorovou výplní MCE101. Součástí mikrofons je krátký cca 10 cm dlouhý kabel. Mikrofons má v průměru 9,7 mm, sensitivitu má přibližně -60 ± 2 dB, frekvenční rozsah od 30 Hz do 16 kHz, SNR větší než 60 dB, napěťový rozsah 1 – 10 V a proudovou spotřebu maximálně 0,3 mA. [22]



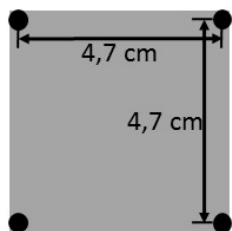
Obr. 4.5 Elektretový mikrofon MCE101

4.2.1 Měření přijímací charakteristiky

Pro ověření všesměrovosti přijímací charakteristiky elektretového mikrofonu jsem změřil jeho přijímací charakteristiku. Stejné měření jsem poté opakoval i pro finální rozložení čtyř mikrofonů v použitém rovinném čtvercovém mikrofonním poli. Fotodokumentaci z měření přikládám v příloze. Samotné měření bylo složeno z kalibrovaného otočného zařízení, desky s měřenými mikrofony, dvou notebooků a reproduktoru. Schéma zapojení pro měření přijímací charakteristiky čtvercového mikrofonního rovinného pole se 4 mikrofony je zobrazeno na obrázku Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Schéma zapojení pro měření přijímací charakteristiky pole



Obr. 4.7 Detailní pohled na mikrofonní pole

Průběh měření byl následující: na PC připojeném k reproduktoru jsem spustil zvuk, přesněji řečeno signál sinusového tvaru o frekvenci 1 kHz, ve vzdálenosti 70 cm od reproduktoru jsem umístil desku s mikrofonním polem na kalibrované otočné zařízení pro měření. Krok měření je možné volit libovolně, v tomto případě jsem krok měření zvolil 10° . Pro jednotlivé kroky měření jsem vzorkoval signál z každého ze 4 elementárních mikrofonů pomocí **ADC** na Arduinu Due. Jak bylo zmíněno v kapitole 4.1, dobu analogově-digitálního převodu pro vývojový kit Arduino Due jsem nastavil na $3,97 \mu\text{s}$. Touto rychlostí jsem tedy vzorkoval analogový signál z mikrofonů, rozlišení jsem ponechal na defaultní hodnotě 10 bitů (hodnoty 0-1023). Po vzorkování jsem uložil 5 000 vzorků z každého elementárního mikrofonu. Tyto hodnoty jsem posléze vypsal na sériový port počítače, kde jsem je uložil. Další zpracování dat probíhalo po naměření všech hodnot. Tvar přijímací charakteristiky (Obr. 4.8) jsem vypočítal z přijatého napětí na vstupu A/D převodníku, které jsem po převodu do digitální podoby posunul směrem k nule odečtením průměrné hodnoty uložené posloupnosti 5 000 vzorků od každého vzorku viz vzorec (4.1). Z takto posunutého signálu jsem efektivní hodnotu vypočítal z průměru lokálních maxim sinusového signálu (4.2). Pro můj systém, který má sloužit jako asistenční pomůcka pro sluchově postižené lidi, stačilo měřit přijímací charakteristiku mikrofonu pouze v horizontální rovině. Analogicky jsem postupoval i pro měření přijímací charakteristiky mikrofonního rovinného pole.

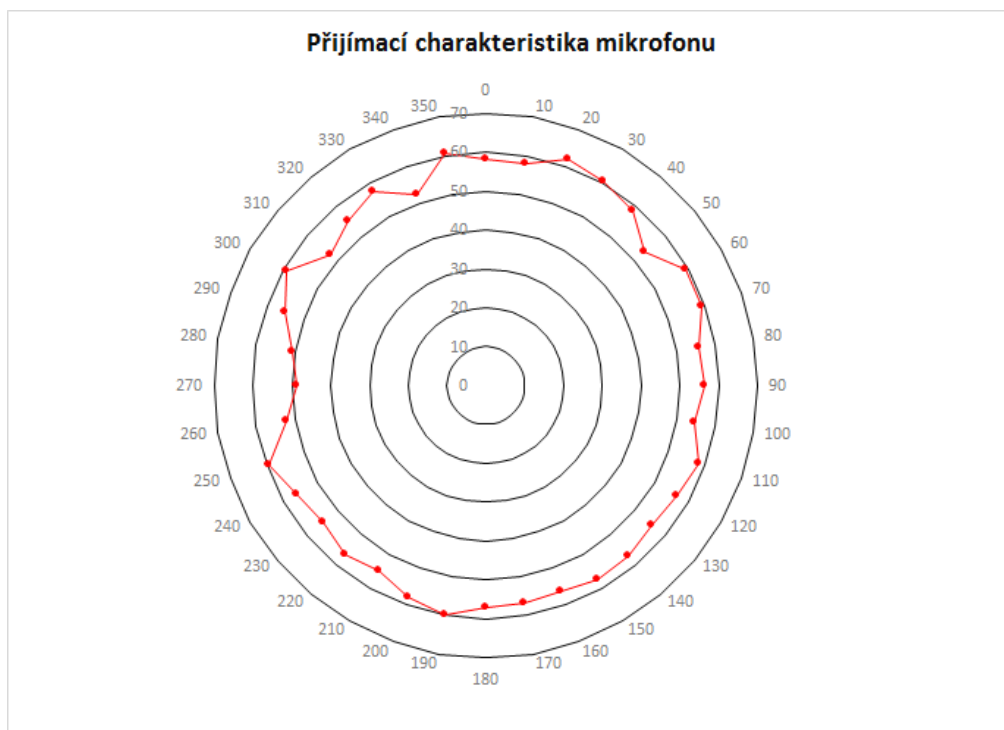
$$U_{\text{posunuté}}[i] = U_{\text{přijaté}}[i] - \frac{\sum_{m=1}^n U_{\text{přijaté}}[m]}{n} \quad (4.1)$$

$$U_{\text{ef_posunuté}} = \frac{\frac{\sum_{j=1}^{\text{počet maxim}} U_{\text{lokální_max}}[j]}{\text{počet maxim}}}{\sqrt{2}} \quad (4.2)$$

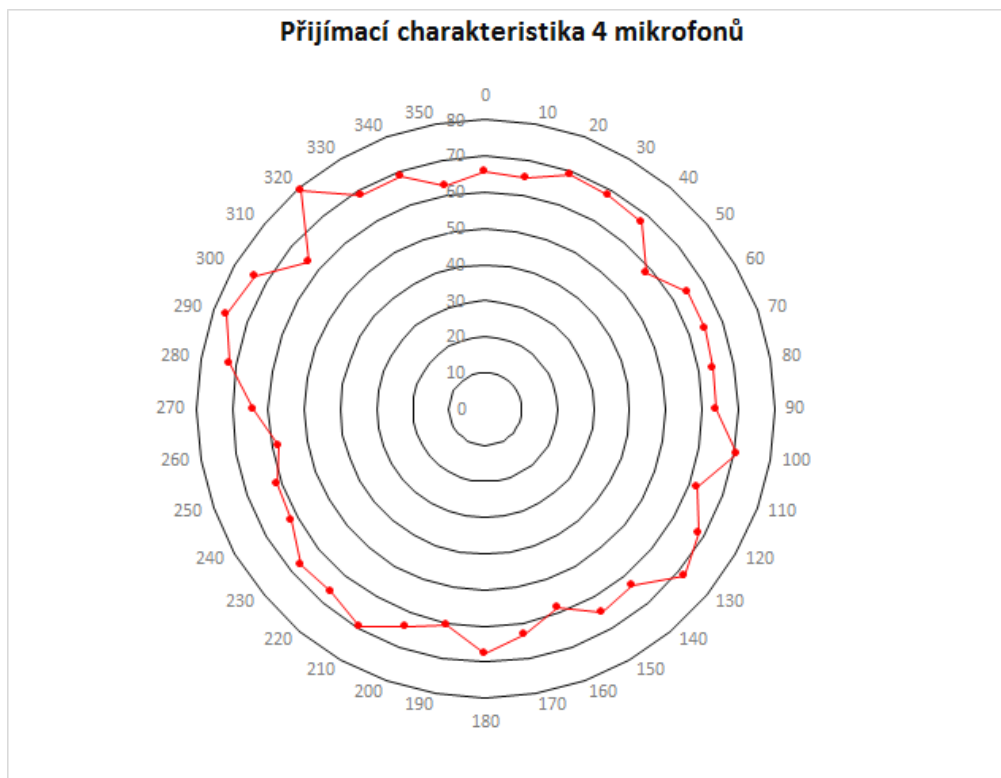
Příklad výpočtu efektivní hodnoty posunutého přijatého signálu pro jeden elementární mikrofon zde uvádím pro naměřená data z úhlu 0°. Data jsou dosazena do vzorců (4.1) a (4.2).

$$U_{posunut\acute{e}}[1] = 346 - \frac{2\,144\,082}{5\,000} = \underline{\underline{-82,816\,4}}$$

$$U_{ef_posunut\acute{e}} = \frac{\frac{1480,3}{18}}{\sqrt{2}} = \underline{\underline{58,151\,9}}$$



Obr. 4.8 Přijímací charakteristika elementárního mikrofonu



Obr. 4.9 Přijímací charakteristika čtvercového pole 4 mikrofonů

4.3 Předzesilovací obvod

Předzesilovací obvod jsem postavil na bipolárním **OZ** – operační zesilovač, pro navrhovaný systém používám operační zesilovač LM358 od firmy ST Microelectronics. Na jedné součástce jsou dva nezávislé bipolární operační zesilovače. Napájecí napětí je +/- 16 nebo 32 V, vstupní napětí od -0,3 do +32 V a vstupní proud 50 mA. LM358 má velký zisk pro stejnosměrné napětí – až 100 dB. Vstupní napěťový offset je 2 mV a proudový offset 2 nA. [23] Zbytek předzesilovacího obvodu je tvořen odpory a kondenzátory o určitých hodnotách.

4.3.1 Návrh frekvenčních filtrů

Předzesilovací obvod obsahuje dva RC články, což jsou prakticky nejprimitivnější lineární filtry. Tyto články jsou zde z důvodu potlačení nežádoucích frekvencí na výstupu předzesilovacího obvodu elementárního mikrofonu. Jeden RC článek

slouží k potlačení nízkých frekvencí, tudíž se jedná o tzv. horní propust. Naproti tomu druhý RC článek je zde k potlačení vysokých frekvencí tzv. dolní propust.

Pro horní i dolní propust se vypočítá mezní frekvence pomocí stejného vzorce:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (4.3)$$

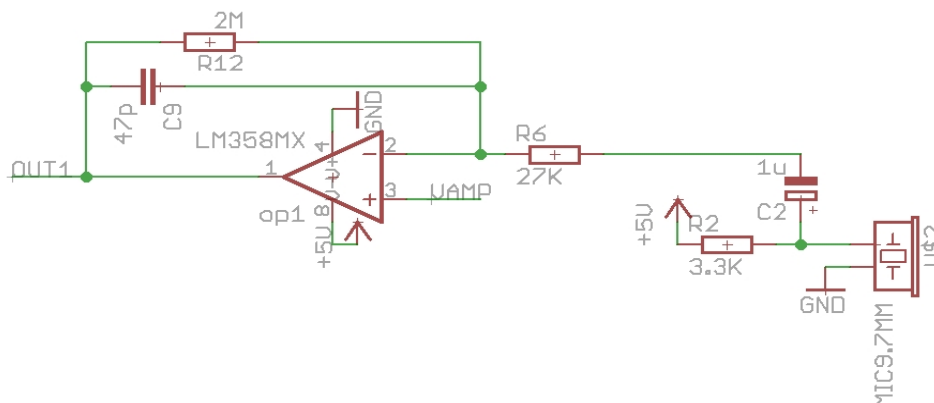
Pro potlačení nízkých frekvencí je velikost odporu v RC článku 27 k Ω a velikost kondenzátoru 1 μ F. Tato kombinace hodnot po dosazení do vzorce (4.3) určí mezní frekvenci horní propusti.

$$f_{0min} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 27 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{5,894\ 6\ Hz}}$$

Analogicky se spočítá mezní frekvence pro dolní propust, kde velikost odporu v RC článku je 2 M Ω a velikost kondenzátoru 47 pF.

$$f_{0max} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 47 \cdot 10^{-12}} = \underline{\underline{1\ 693,137\ 7\ Hz}}$$

Hodnoty rezistorů a kapacitorů jsem zvolil vzhledem k frekvenčním vlastnostem zvuků, které mám detekovat systémem, jenž má sloužit jako pomůcka pro neslyšící osoby. Zvuk motoru auta se pohybuje v rozmezí 65 – 100 Hz, zvuk projíždějícího auta v rozmezí od 700 – 2000 Hz. Zvuk záchranky se liší dle státu a místních zvyklostí, ale hojně užívané frekvence jsou 750, 770 a 960 Hz. To je důvod mé volby mezních frekvencí přibližně 6 Hz a 1,7 kHz.



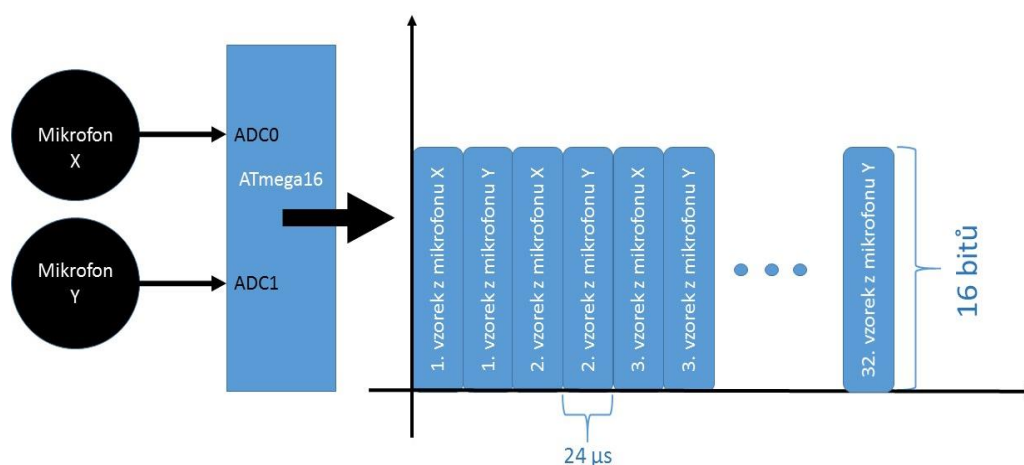
Obr. 4.10 Schéma předzesilovacího obvodu

4.4 ATmega16

Mikroprocesor ATmega16 patří do skupiny 8 bitových AVR mikrokontrolerů. Většina lidí si myslí, že AVR je zkratka pro Advanced Virtual RISC – „zdokonalený“ virtuální RISC. Samotná zkratka RISC - Reduced Instruction Set Computer znamená v překladu počítač s redukováným instrukčním setem. Avšak firma Atmel tvrdí, že AVR není zkratka pro nic konkrétního a nic neznamená.

Architektura procesoru ATmega16 je vylepšená RISC, instrukční set obsahuje 131 instrukcí, většina z nich trvá pouze jeden hodinový cyklus. Procesor může mít frekvenci až 16 MHz, programová paměť je 16 Kbytu typu flash, dále obsahuje 512 bytu EEPROM paměti a 1 Kbyte interní paměti SRAM. Operační napětí procesoru je 4,5 – 5,5 V. Procesor podporuje rozhraní JTAG i ISP. Obsahuje 32 I/O pinů, které je možno využít k obecným účelům. Jako součást jeho periférií jsou 4 kanály PWM, 8 kanálů ADC s rozlišením 10 bitů, USART, SPI rozhraní. Rychlost jednoho ADC převodu se pohybuje v rozmezí 13 – 260 μ s, závisí na frekvenci ADC hodin od 50 kHz do 1 MHz. [25] ATmega16 neumí synchronně převádět dva ADC kanály najednou, tím pádem je nutné mezi kanály přepínat nastavením registru ADMUX – ADC Multiplexer Selection Register. Po přepnutí na druhý kanál je nutné vložení zpoždění čili není možné přepnout jednou instrukcí kanál ADC a rovnou převádět daný signál do digitální podoby. Empirickým výzkumem jsem zjistil délku vloženého zpoždění 10 μ s. Celková doba

jednoho ADC cyklu je tedy přibližně 24 μ s. Schéma ukládání dat z dvojice elementárních mikrofonů je na obrázku *Obr. 4.11*.



Obr. 4.11 Schéma průběhu ukládání jednotlivých vzorků

4.5 Výstupní signalizace

Systém je navržen s ohledem na jeho cenu, jak bylo zmíněno v úvodu 4. kapitoly. Z tohoto důvodu jsem jako výstupní signalizace použil 7 LED diod. Jedná se o standardní vývodové LED diody různých barev. Průměr diod je 5 mm a jejich svítivost je rozdílná dle druhu a barvy. To samé platí i pro vyzařovací úhel. Pro navržený systém není důležitá barva ani svítivost či vyzařovací úhel, podstatné je, jestli LED diody svítí nebo nesvítí. První LED dioda je připojena přímo na napájení, tudíž signalizuje, když je deska napájena. Další 4 diody signalizují směr příchodu zvuku **DOA** od akustického zdroje. Poslední dvě diody jsou připraveny pro rozpoznávání zvuku záchranky od zvuků běžné dopravy. Nebo mohou signalizovat sílu přijímaného akustického signálu.

5. Testování pro finální návrh

Testy používaných algoritmů probíhaly na vývojovém kitu Arduino Due, z důvodu jednoduché kontroly vnitřního stavu procesoru a paměti. Program Arduino 1.6.2 obsahuje možnost zobrazení terminálu sériového portu, na kterém je Arduino Due připojeno k počítači. Po spuštění programu lze tedy vypisovat aktuální hodnoty proměnných na sériový port, tyto hodnoty se dají dále ukládat do PC, kde je možnost jejich další analýzy. Akustický zdroj pro všechny testy používal zvuk záchranky, který je třeba detekovat, aby byl systém použitelný pro asistenční účely sluchově postiženým lidem. Programy použité pro testování jsou na přiloženém CD.

5.1 Testování závislosti počtu vzorků na určení DOA

Pro testování závislosti počtu vzorků signálu na určení směru příchodu zvuku od akustického zdroje jsem použil program, který v 5 000 cyklech nasbírá z dvou elementárních mikrofonů předem definovaný počet vzorků zvukového signálu. Tyto posloupnosti vzorků poté projdou funkcí křížové korelace a zjistí se zpoždění akustických signálů. Dle zpoždění se rozhodne, zdali přichází signál od prvního mikrofonu k druhému nebo naopak. Cílem testu je zjistit, kolik proběhne správných vyhodnocení směru příchodu zvuku, a z těchto správných vyhodnocení určit procentuální úspěšnost detekce směru pro daný počet vzorků a zpoždění. Pro použitou vzájemnou korelační funkci je důležité správně definovat maximální délku zpoždění mezi signály. Měření se skládá ze dvou průběhů. Každý z nich je pro jiné definované maximální zpoždění.

Následující tabulka *Tab. 5.1* udává naměřené a vypočítané hodnoty pro maximální zpoždění signálu o 8 vzorků.

počet vzorků	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	64
měření č.1	3299	3548	3799	3921	4007	4226	4303	4384	4502	4564	4600	4687
měření č.2	3276	3567	3602	3942	4033	4233	4361	4399	4479	4526	4652	4651
měření č.3	3258	3588	3710	3896	4002	4257	4319	4415	4494	4581	4611	4652
měření č.4	3293	3549	3804	3927	4046	4258	4307	4409	4476	4573	4608	4669
průměr	3281,50	3563,00	3728,75	3921,50	4022,00	4243,50	4322,50	4401,75	4487,75	4561,00	4617,75	4664,75
úspěšnost[%]	65,63	71,26	74,58	78,43	80,44	84,87	86,45	88,04	89,76	91,22	92,36	93,30

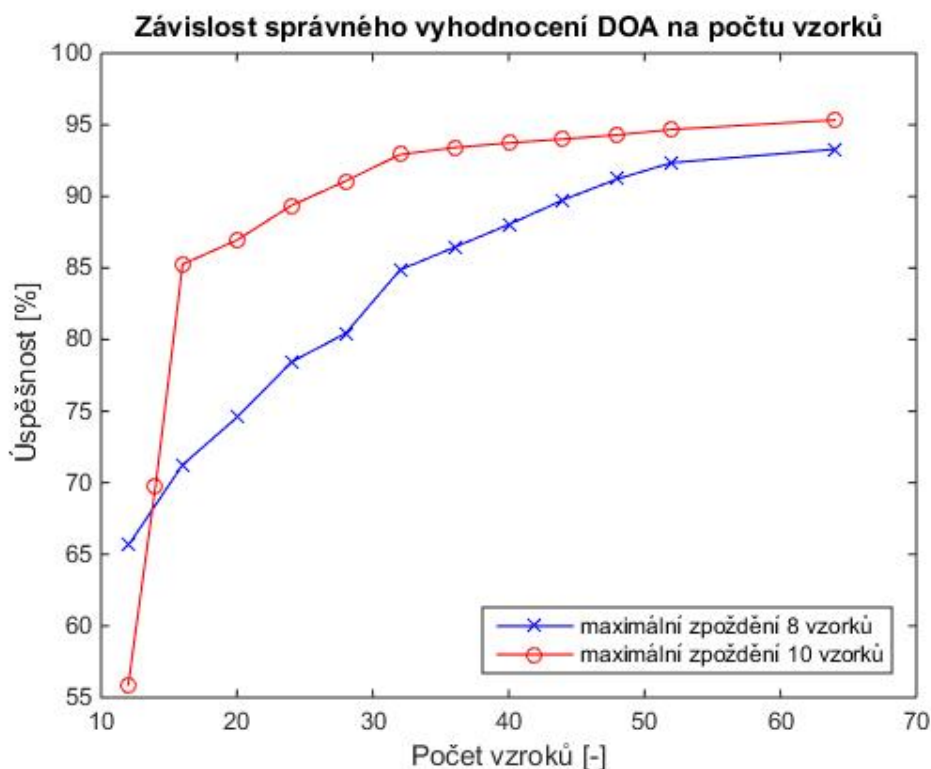
Tab. 5.1 Naměřené hodnoty pro maximální zpoždění o 8 vzorků

Druhá tabulka Tab. 5.2 udává naměřené a vypočítané hodnoty pro maximální zpoždění signálu o 10 vzorků.

počet vzorků	12	14	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	64
měření č.1	2791	3460	4198	4317	4442	4578	4480	4695	4715	4734	4688	4721	4789
měření č.2	2783	3457	4323	4329	4459	4557	4545	4657	4657	4709	4696	4716	4825
měření č.3	2793	3504	4278	4357	4487	4541	4812	4652	4678	4675	4747	4736	4757
měření č.4	2813	3524	4255	4387	4485	4539	4747	4678	4697	4682	4728	4762	4695
průměr	2795,00	3486,25	4263,50	4347,50	4468,25	4553,75	4646,00	4670,50	4686,75	4700,00	4714,75	4733,75	4766,50
úspěšnost[%]	55,90	69,73	85,27	86,95	89,37	91,08	92,92	93,41	93,74	94,00	94,30	94,68	95,33

Tab. 5.2 Naměřené hodnoty pro maximální zpoždění o 10 vzorků

Grafické znázornění výsledků z testování můžete vidět na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Závislost správného vyhodnocení DOA na počtu vzorků

Z naměřených a dopočítaných hodnot je patrné, že čím delší je posloupnost a čím větší je maximální povolené zpoždění mezi signály, tím větší je procentuální úspěšnost detekce správného směru příchodu zvuku od akustického zdroje. Výjimku tvoří první dva body červeného průběhu na obrázku *Obr. 5.1*, ze kterých je zřejmé, že pro úspěšnou detekci směru **DOA** musí být délka maximálního zpoždění nanejvýš o třetinu kratší, než délka posloupnosti vzorků. Pro implementaci v cílovém systému jsem se rozhodl používat 32 vzorků dlouhou posloupnost a maximální povolené zpoždění signálů o 8 vzorků, jenž má procentuální úspěšnost detekce správného směru **DOA** cca. 85%. Chybných 15% určení směru příchodu jsem schopen úspěšně odfiltrout jednoduchým cyklem, který mění výstupní signalizaci až po třech stejných určeních **DOA**. Tímto způsobem „filtrace“ se mi správnost určení směru příchodu markantně zvýší.

5.2 Testování vzdáleností mezi mikrofony

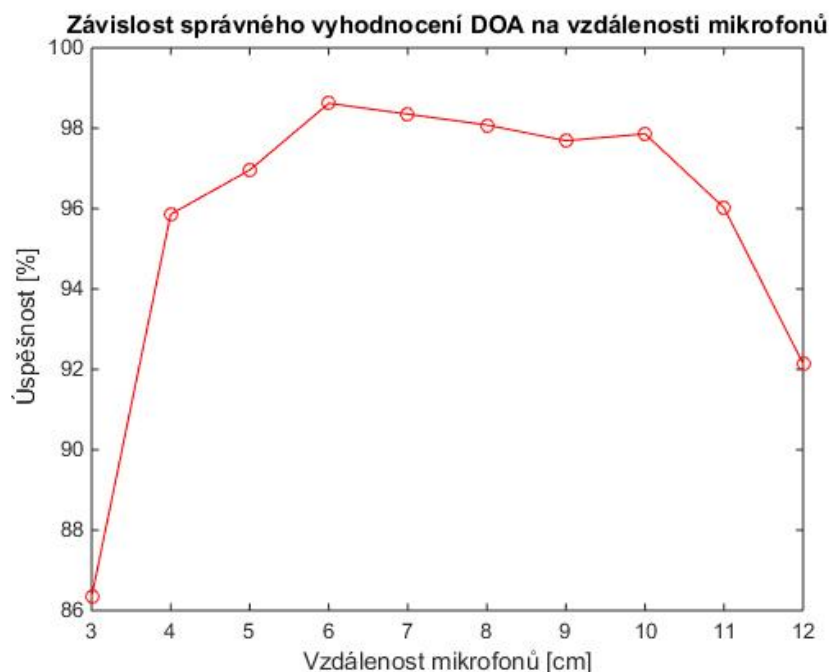
Testování vzdálenosti mezi dvěma elementárními mikrofony je omezeno rychlostí šíření zvuku ve vzduchu, rychlostí vzorkování signálu, resp. rychlostí **ADC**, a maximálním povoleným zpožděním signálů. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu o teplotě 20 °C je přibližně 340 m/s. Rychlost **ADC** převodu je přibližně 24 μs, viz kapitola 4.4. Definované maximální povolené zpoždění je 8 vzorků, viz kapitola 5.1. Pro test vzdáleností mezi elementárními mikrofony vzniknou z těchto vstupních podmínek hranice pro testování. Minimální vzdálenost mezi mikrofony musí být dostatečně velká, aby mikroprocesor stihl převést nejméně 3 vzorky do digitální podoby, než dorazí zvuk od prvního elementárního mikrofonu k druhému. Pokud bude přicházet zvuk od druhého mikrofonu k prvnímu, musí procesor stihnout převést alespoň 2 vzorky. Díky tomuto faktu musím počítat minimální vzdálenost pro převedení alespoň 3 vzorků, to odpovídá času 3 x 24 μs. Minimální vzdálenost dvou elementárních akustických senzorů poté dostanu vynásobením 72 μs a rychlosti zvuku ve vzduchu při 20 °C (340 m/s). Výsledek je 0,024 48 m, to odpovídá 2,448 cm. Naproti tomu maximální vzdálenost pro testování je dána maximálním povoleným zpožděním mezi signály. Pro detekci maxima v korelační funkci pro zpoždění signálu o 8 vzorků musí stihnout mikroprocesor

15 ADC převodů, resp. 14. Opět zde záleží na směru příchodu zvuku. Maximální vzdálenost mikrofonů se tedy rovná $15 \times 24 \mu\text{s} \times 340 \text{ m/s}$, výsledek tohoto výpočtu je 12,24 cm.

Testování vzdáleností mezi elementárními akustickými senzory jsem uskutečnil posouváním jednoho senzoru od druhého. Krok měření jsem zvolil 1 cm. Vzdálenost, pro kterou mělo měření smysl, je definována v předchozím odstavci. Stačilo proměřit vzdálenost od 3 cm do 12 cm. V každém z těchto 10 bodů jsem poté odečítal správnost určení směru příchodu zvuku **DOA**. Jedno měření obsahuje 2 500 opakování pro jeden vzdálenostní krok. Numerické hodnoty testování je možné vidět v tabulce *Tab. 5.3*. Grafické znázornění těchto výsledků je na obrázku *Obr. 5.2*.

vzdálenost [cm]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
měření č.1	2331	2399	2453	2483	2484	2461	2455	2463	2379	2260
měření č.2	1973	2347	2464	2441	2430	2434	2416	2459	2381	2297
měření č.3	2165	2379	2415	2449	2444	2464	2460	2446	2407	2332
měření č.4	2165	2461	2364	2489	2477	2449	2438	2418	2435	2325
průměr	2158,50	2396,50	2424,00	2465,50	2458,75	2452,00	2442,25	2446,50	2400,50	2303,50
úspěšnost [%]	86,34	95,86	96,96	98,62	98,35	98,08	97,69	97,86	96,02	92,14

Tab. 5.3 Hodnoty měření pro testování vzdálenosti



Obr. 5.2 Závislost správného vyhodnocení DOA na vzdálenosti mikrofonů

Z obrázku *Obr. 5.2* je možné vyzorovat ideální vzdálenost mezi elementárními senzory v rovinném mikrofonním poli. Pro vzdálenost od 6 cm do 10 cm se procentuální úspěšnost správného vyhodnocení liší v rozmezí do jednoho procenta. U systému sloužícího jako asistenční pomůcka pro neslyšící je dobré, aby jeho rozměry byly pokud možno co nejmenší, proto jsem zvolil u mého systému vzdálenost mezi dvěma elementárními mikrofony 6,647 cm (úspěšnost detekce správného **DOA** pro 6,647cm je přes 98 %). Vzdálenost mikrofonů 6,647 cm u čtvercového rovinného mikrofonního pole odpovídá délce hrany 4,7 cm, pokud porovnávám signály z dvojice mikrofonů spojené průsečíky čtverce, jehož hrany jsou tvořeny elementárními mikrofony.

5.3 Testování identifikace zdroje zvuku

Návrh a implementace systému, který identifikuje zdroj zvuku, není obsahem této práce, avšak je to přímá možnost rozšíření současného systému, proto jsem jeden z testů na vývojovém kitu Arduino Due věnoval převodu signálů do jejich frekvenční podoby a posléze porovnání spekter převedených signálů.

Test funguje na základě Fourierovy transformace, resp. její diskrétní podoby. Tato transformace je známa pod zkratkou DFT – Diskrétní Fourierova Transformace. Jak již bylo zmíněno, jedná se o látku přesahující zadání této diplomové práce, proto zde nenajdete podrobný výklad, ani pevný teoretický základ Fourierovi transformace. Detailní odvození a bohatý teoretický základ této transformace lze nalézt v [15].

Zpracování signálu vychází z délky posloupnosti vzorků, které se převádějí do digitální podoby pro křížovou korelační funkci. Pro výpočet spektrálních koeficientů tím pádem používám 32 vzorků. Výsledek transformace je symetrický, takže postačuje pracovat pouze s první polovinou výsledných hodnot. Pro signál z jednoho elementárního mikrofonu platí, že jednotlivé vzorky jsou od sebe časově vzdáleny $2 \times 24 \mu\text{s}$, to odpovídá vzorkovací frekvenci 20,8 kHz. Rozlišení DFT se poté rovná $20,8 \text{ kHz} / 16 = 1,3 \text{ kHz}$ s tím, že díky RC článku v předzesilovacím obvodu jsou potlačeny frekvence vyšší než horní mezní frekvence mající hodnotu přibližně 1,7 kHz. Oba tyto fakty rapidně ovlivňují kvalitu identifikace zdroje zvuku,

protože všechny zachycené zvuky mají výrazné maximálně první 3 spektrální koeficienty. Další problém nastává z toho důvodu, že automobil i záchranka nevytvářejí konstantní akustický zvuk, tudíž záleží na okamžiku, kdy začneme daný signál vzorkovat.

Celkové zpracování signálu během tohoto testu vypadá následovně:

- převod 32 vzorků do digitální podoby
- spočítání průměrné hodnoty ze všech těchto vzorků
- odečet průměrné hodnoty od každého vzorku pro „usazení“ zesíleného signálu na nulu
- DFT počítaná pomocí tabulek s hodnotami úhlů a vygenerovanými průběhy sinu a kosinu převzatých z [28] kvůli zrychlení výpočetního algoritmu
- normování výsledných koeficientů na jedno sto
- porovnání výsledného spektra s tabulkou předem definovaných spekter zvuků požadovaných k identifikaci
- inkrementace proměnné reprezentující celkový počet zastoupení daného spektra.

Toto zpracování signálu probíhá v 500 opakováních v jednom cyklu tak, abych na konci cyklu mohl z poměrných hodnot proměnných, zastupujících jednotlivá spektra, identifikovat akustický zdroj, jehož signál byl po dobu cyklu zachytáván elementárním mikrofonem.

Rychlost mikroprocesoru vývojové desky Arduino Due je natolik velká, že postačuje i v případě délky cyklu s 500 opakováními. Pro pomalejší mikroprocesory lze úspěšně snížit velikost cyklu až na 100 opakování, to je ovšem hraniční hodnota, kdy lze identifikovat zvuk záchranky od zvuků aut. Pro zajímavost jsem identifikaci rozšířil i o zvuk 1,5 kHz, který je Arduino Due také schopné identifikovat.

6. Zpracování dat

Kapitola s názvem zpracování dat seznamuje čtenáře s průběhem zpracování dat a s algoritmy, které při zpracování používám. Pro ukázkou jsem použil zvuk akustické signalizace záchranného vozidla - sanitky. Použitá data jsou ze systému s finální konfigurací hardwaru i softwaru. Zvukový zdroj při snímání byl na jedné přímce s dvojicí elementárních mikrofonů, vzdálený 1 cm od prvního mikrofonu tzn. 7,647 cm od druhého mikrofonu. Tato kapitola popisuje jednu polovinu cyklu zpracování dat, protože druhá polovina je analogická pro druhou dvojici elementárních mikrofonů. Finální lokalizace tedy vzniká složením výsledku pro obě dvě dvojice elementárních mikrofonů.

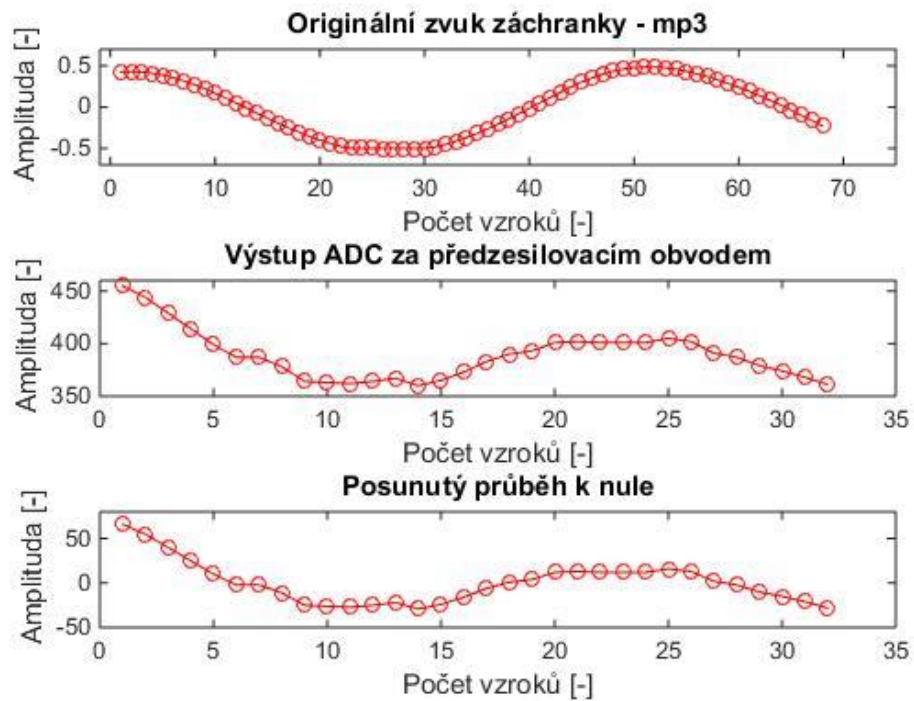
6.1 ADC

Délka jednoho **ADC** převodu je 24 μ s, vzorky se ukládají metodou „zip“. První se ukládá v pořadí první vzorek mikrofonu **x**, druhý se ukládá v pořadí první vzorek mikrofonu **y** (*Obr. 4.11*). Rozlišení **ADC** je 10 bitů, to odpovídá hodnotám od 0 – 1023 ($2^{10} - 1$). Tyto hodnoty poté „škálují“ vstupní signál dle zvolené napěťové reference. V našem případě je napěťová reference rovna napájecímu napětí (5 V). Uložení 32 vzorků pro jeden mikrofon trvá $2 \times 24 \mu\text{s} \times 32 = 1,536$ ms. Tato doba odpovídá přibližně 68 vzorkům akustického signálu ve formátu mp3 se vzorkovací frekvencí 44,1 kHz ($1 / 44100 \times 68 = 1,542$ ms). Předzesilovací obvod přijímaný signál zesílí a signál do určité míry zašumí. Vzhledem k dalšímu zpracování, přesněji pro smysluplnou Fourierovu transformaci, je důležité uloženou posloupnost vzorků posunout k nule. To se zajistí odečtením průměrné hodnoty celé posloupnosti od jednotlivých vzorků. Hodnoty zachyceného zvuku na výstupu **ADC** a posunutého signálu k nule pro mikrofon **x** i pro mikrofon **y** jsou vidět v tabulce *Tab. 6.1*. Grafický průběh zvukového signálu zdroje, zachyceného zvuku na výstupu **ADC** a posunutého signálu k nule pro mikrofon **x**, je zachycen na obrázku *Obr. 6.1*. Stejně tak je možné vidět grafické průběhy signálů pro mikrofon **y** na obrázku *Obr. 6.2*.

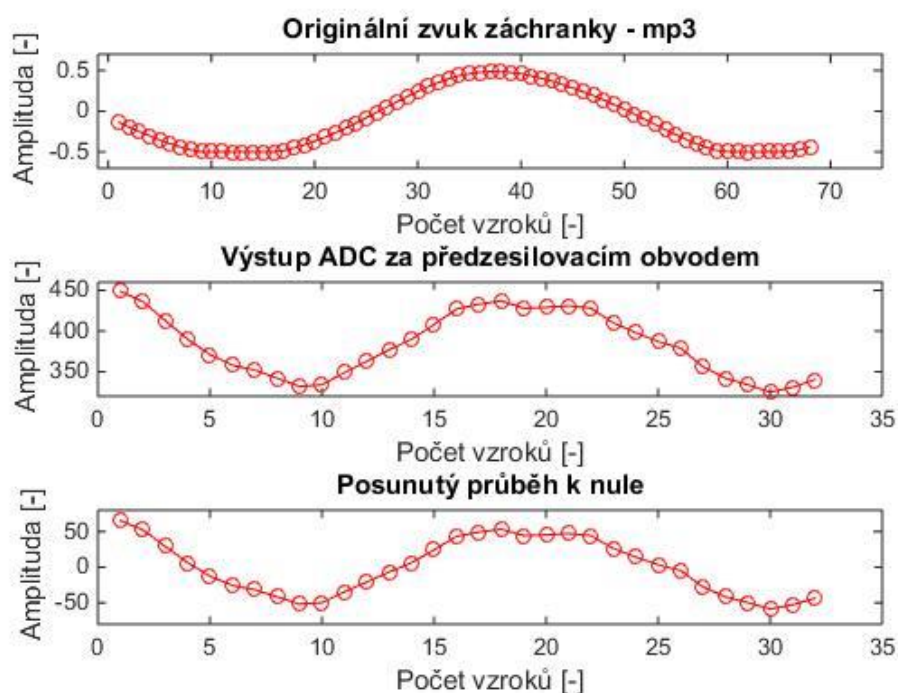
mikrofon x \ pořadí vzorku	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
výstup ADC [-]	455	444	429	414	399	387	387	378	364	363	362	364	367	360
posunutý signál [-]	65,94	54,94	39,94	24,94	9,94	-2,06	-2,06	-11,06	-25,06	-26,06	-27,06	-25,06	-22,06	-29,06
mikrofon y \ pořadí vzorku	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
výstup ADC [-]	449	436	413	390	371	358	352	342	332	334	349	363	377	390
posunutý signál [-]	65,28	52,28	29,28	6,28	-12,72	-25,72	-31,72	-41,72	-51,72	-49,72	-34,72	-20,72	-6,72	6,28

15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	32.
365	373	383	390	393	401	402	401	401	401	405	402	391	387	379	374	368	361
-24,06	-16,06	-6,06	0,94	3,94	11,94	12,94	11,94	11,94	11,94	15,94	12,94	1,94	-2,06	-10,06	-15,06	-21,06	-28,06
15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	32.
408	427	433	437	428	429	431	428	410	398	387	379	356	342	334	325	331	340
24,28	43,28	49,28	53,28	44,28	45,28	47,28	44,28	26,28	14,28	3,28	-4,72	-27,72	-41,72	-49,72	-58,72	-52,72	-43,72

Tab. 6.1 Hodnoty zachycené na výstupu ADC a jejich přepočet



Obr. 6.1 Grafy hodnot pro mikrofon x



Obr. 6.2 Grafy hodnot pro mikrofon y

Z grafů je patrné zpoždění signálu z mikrofonu y od signálu z mikrofonu x, který měl při měření menší vzájemnou vzdálenost k akustickému zdroji oproti mikrofonu y, který měl vzájemnou vzdálenost se zvukovým zdrojem větší. Dále je zřejmá velikost zpoždění. Na první pohled lze určit přibližné zpoždění signálu mikrofonu y. Signál je zpožděn asi o 4 vzorky. Při předběžném výpočtu si mohu přesnost odhadu ověřit. Při zpoždění signálů o 4 vzorky odpovídá dráha, kterou zvukový signál urazí ve vzduchu o teplotě 20 °C, vzdálenosti $2 \times 24 \mu\text{s} \times 4 \times 340 \text{ m/s} = 6,528 \text{ cm}$. Z předchozích kapitol vím, že vzdálenost mezi dvěma elementárními mikrofony je 6,647 cm, což dokazuje přesnost mého odhadu zpoždění.

6.2 Křížová korelace

Výpočet vzájemné neboli křížové korelační funkce probíhá v mikroprocesoru pomocí vzorce (6.1). V reálném kódu se nejdříve v cyklu spočítá průměrná hodnota celkové posloupnosti uložených 32 vzorků pro signály z obou elementárních

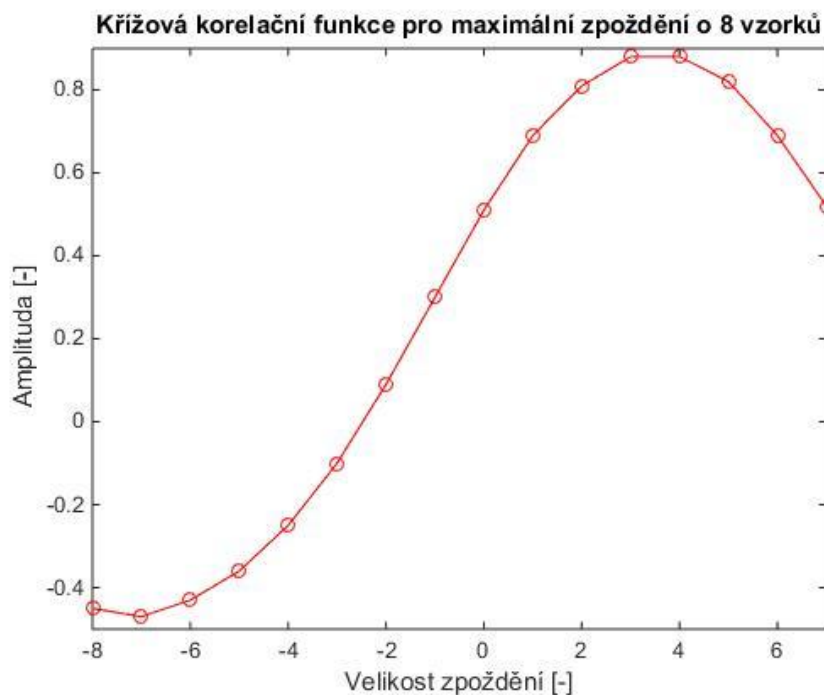
mikrofonů. V dalším cyklu se spočítá jmenovatel vzorce (6.1). V posledním cyklu se kříží signály od záporné hodnoty maximálního definovaného zpoždění do jeho kladné hodnoty a pro každé posunutí se spočítá koeficient korelační funkce udávající míru „podobnosti“ těchto dvou signálů.

$$R_{12}[n] = \frac{\sum_i \{ [x(i) - mx] * [y(i-n) - my] \}}{\sqrt{\sum_i [x(i) - mx]^2} \sqrt{\sum_i [y(i-n) - my]^2}} \quad (6.1)$$

$R_{12}[n]$ je výsledná hodnota korelačního koeficientu pro zpoždění o n vzorků, $x(i)$ je číselná hodnota vzorku signálu z mikrofonu x na pozici i , $y(i-n)$ je číselná hodnota vzorku signálu z mikrofonu y na pozici $i-n$. Členy mx a my zastupují číselné hodnoty průměru celé uložené posloupnosti z mikrofonu x resp. y . [16] V tabulce *Tab. 6.2* jsou vypsány číselné hodnoty křížových korelačních koeficientů pro uložené posloupnosti v kapitole 6.1. Maximální definované zpoždění pro signály je 8 vzorků, to odpovídá konfiguraci finálního systému. Grafický průběh je znázorněn na obrázku *Obr 6.3*.

Velikost zpoždění [-]	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
Amplituda [-]	-0,45	-0,47	-0,43	-0,36	-0,25	-0,1	0,09	0,3	0,51	0,69	0,81	0,88	0,88	0,82	0,69	0,52

Tab. 6.2 Hodnoty koeficientů křížové korelace



Obr. 6.3 Grafické zobrazení koeficientů z Tab. 6.2

Z obrázku Obr 6.3 je možné vyčíst, jakému zpoždění odpovídá který korelační koeficient. Pro tento průběh jsou maxima dvě v křížové korelační funkci na pozici +3 a +4. Tyto hodnoty potvrzují vypočítaný odhad zpoždění z kapitoly 6.1.

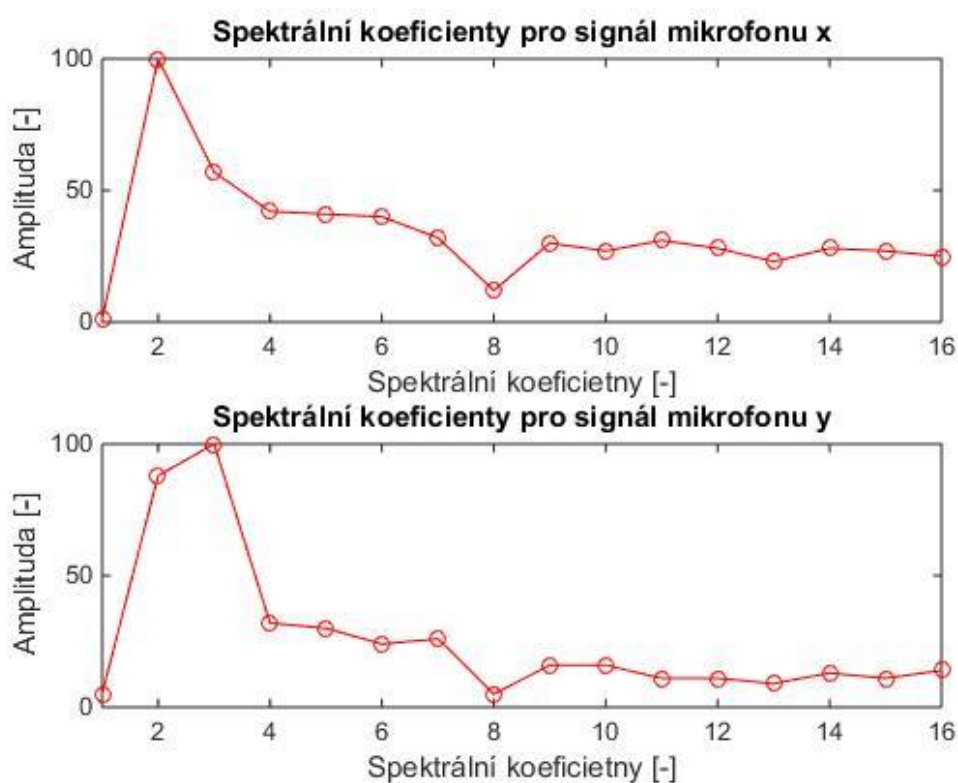
6.3 Diskrétní Fourierova transformace - DFT

Problematika týkající se Fourierovy transformace je probrána v kapitole 5.3. Je to téma přesahující zadání této práce, ale přesto jsou data zpracovávána DFT pro další využití, například pro identifikaci zvukového zdroje. DFT je početně velmi náročná transformace, v mikroprocesorových aplikacích se často nahrazuje FFT – Fast Fourier Transformation (česky: rychlá Fourierova transformace). FFT je komplikovanější metoda na pochopení, avšak méně výpočetně náročná. Pro navržený systém s mikroprocesorem ATmega16 stačí DFT, ale pro urychlení algoritmu se používají již zmíněné tabulky s vygenerovanými průběhy sinu, kosinu a úhlu. Bez použitých tabulek by musel mikroprocesor pro 32 bodovou DFT hledat $32^2 / 2 = 512$ hodnot sinu a kosinu [28].

Samotný výpočet probíhá pomocí několika cyklů, hlavní tělo algoritmu tvoří dva vnořené for cykly. Vnější for cyklus jde od nuly do poloviny délky vstupní posloupnosti proto, že druhá polovina by byla symetrická. Vnitřní for cyklus poté násobí postupně každý prvek uložené posloupnosti s danou hodnotou tabulkového kosinu získanou pomocí příslušného úhlu z tabulky. Poté se každý získaný spektrální koeficient vydělí délkou uložené posloupnosti. V druhém přidruženém cyklu se prochází spektrální koeficienty a ukládá se jejich absolutní hodnota. Tímto způsobem se vypočítá reálná část spektrálních koeficientů, která je dostatečně přesná pro cílový systém. Číselné hodnoty spektrálních koeficientů pro uložené posloupnosti z kapitoly 6.1 jsou v tabulce *Tab. 6.3*. Hodnoty pro jednoduchost dalšího číselnicového zpracování normují na jedno sto. Jejich grafické znázornění je zobrazeno na obrázku *Obr. 6.4*.

spektrální koeficienty pro signál x [-]	1	100	57	42	41	40	32	12	30	27	31	28	23	28	27	25
spektrální koeficienty pro signál y [-]	5	88	100	32	30	24	26	5	16	16	11	11	9	13	11	14

Tab. 6.3 Hodnoty spektrálních koeficientů



Obr. 6.4 Grafické zobrazení hodnot z *Tab. 6.3*

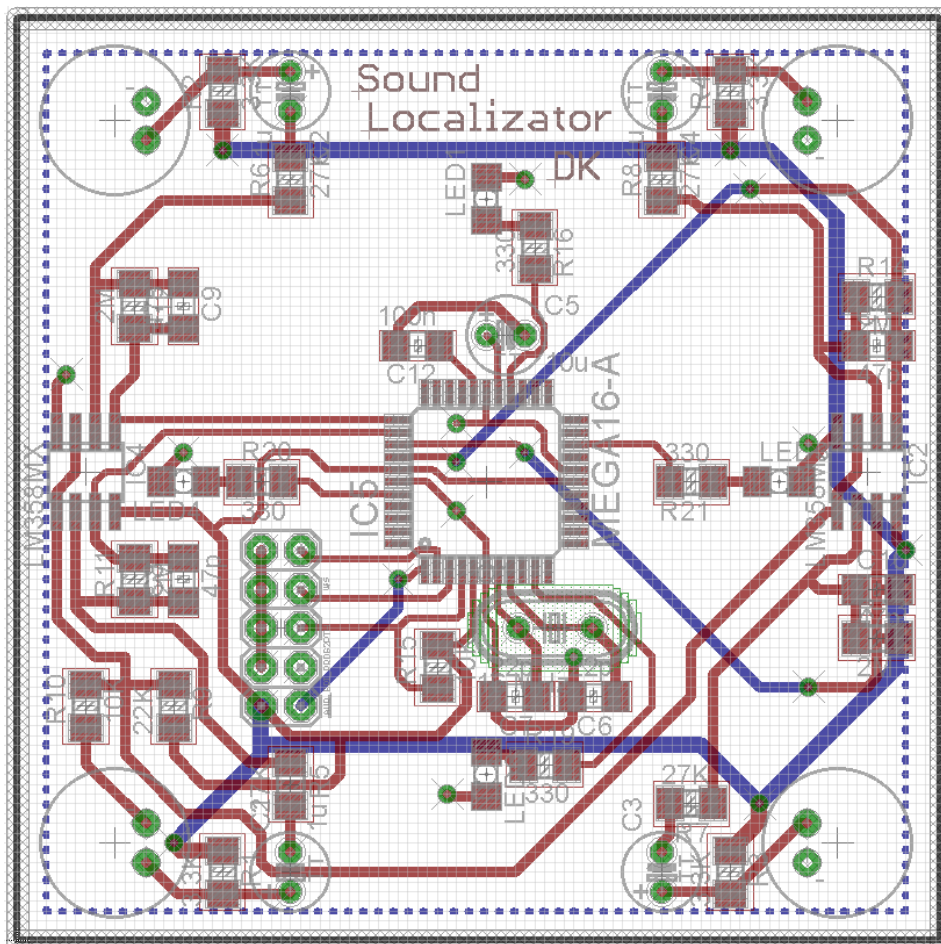
	Fa	Fz	Fh
druhá mocnina vzdálenosti signálu z mikrofonu x [-]	16604	11379	17384
druhá mocnina vzdálenosti signálu z mikrofonu y [-]	5991	7876	6891

Tab. 6.4 Hodnoty vzdáleností spekter

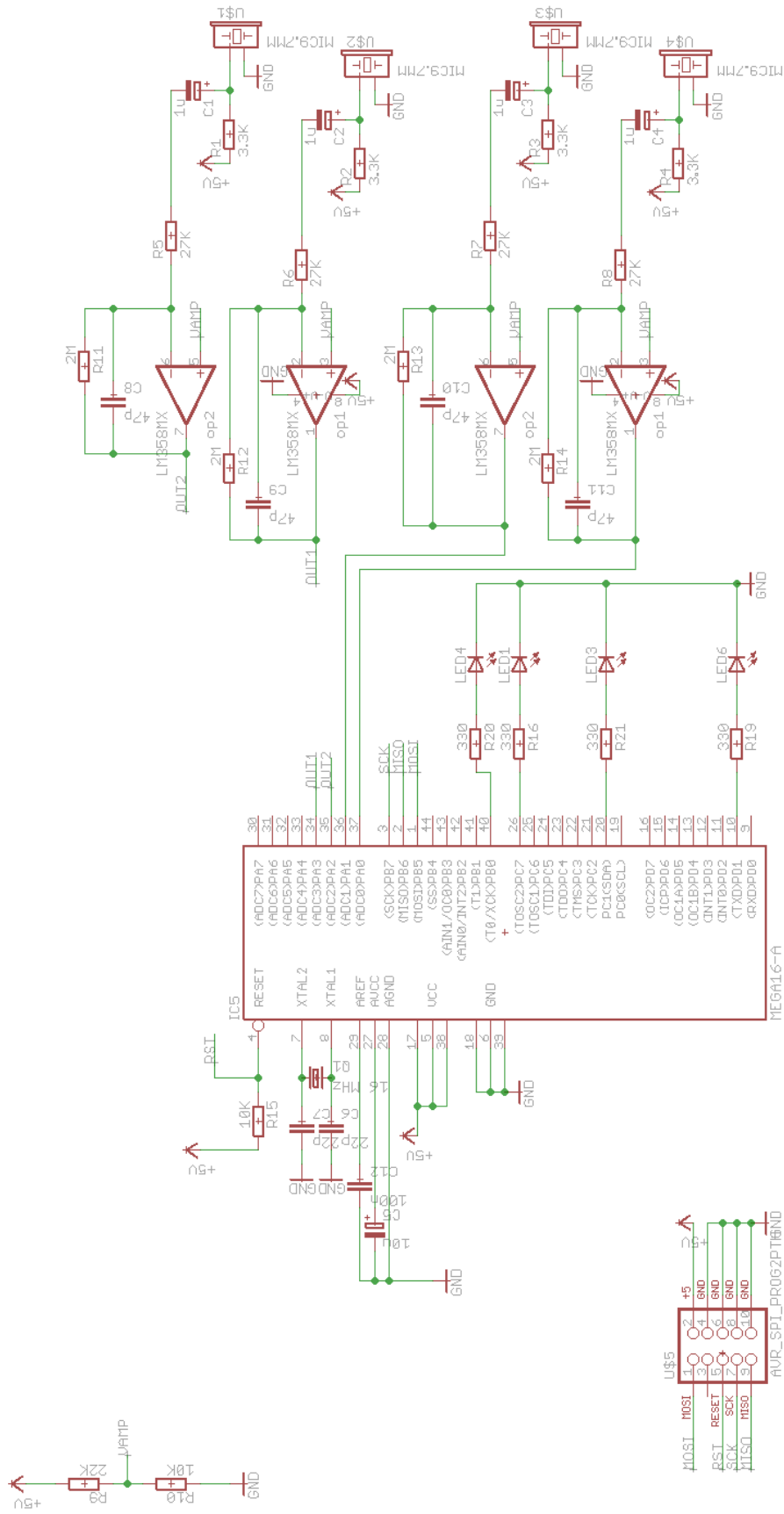
Z tabulky *Tab. 6.4* je možno vyčíst, že nejmenší euklidovská vzdálenost pro signál z mikrofonu **x** je při porovnání se spektrem záchranného vozidla. Což je správné vyhodnocení. Naproti tomu totožný zvuk o 4 vzorky zpožděný pro mikrofon **y** byl vyhodnocen jako zvuk automobilu. Příčiny vzniku těchto chyb jsou popsány na začátku této kapitoly.

7. Návrh plošného spoje

Vzhledem k implementaci systému na nepájivém poli jsem navrhl desku plošného spoje, kterou by bylo možné sériově vyrábět. Návrh jsem tvořil v programu EAGLE 6.4.0. Desku jsem navrhl s ohledem na cenu, použité součástky jsou běžně k zakoupení ve většině obchodů s elektronickými součástkami. Rozměry desky jsem navrhl tak, aby se zachovalo stejné geometrické rozložení mikrofonního pole jako u implementovaného systému na nepájivém poli. Díky tomu jsem nemusel volit SMD (Surface Mount Device) součástky menších rozměrů, než má standardní pouzdro typu 1206 (3,2 x 1,6 x 0,55 – d x š x v). Celkové schéma zapojení je na obrázku *Obr. 7.2*. Finální vzhled desky je na obrázku *Obr. 7.1*, detailněji se lze seznámit s návrhem desky plošného spoje v příloze.



Obr. 7.1 Vzhled navržené desky



Obr. 7.2 Schéma zapojení pro návrh desky

8. Náklady na výrobu lokalizátoru zvuku

Ekonomická stránka je jednou z nejpodstatnějších při návrhu jakéhokoli systému, nebo obecně jakéhokoli výrobku, který chce mít potenciál být v budoucnosti v hojně míře prodáván, a tím i snadno rozšiřitelný. Cena vždy hraje roli při návrhu systému. Tak je tomu i v mém případě. Jak již bylo zmíněno, tento systém jsem navrhoval tak, aby se dal pořídit za pokud možno minimální cenu. Proto jsem tuto kapitolu věnoval ekonomickému shrnutí nákladů potřebných k tvorbě systému pro lokalizaci zvukového zdroje. Soupis součástek s jejich nákupní cenou je uveden v tabulce *Tab. 8.1*.

Součástka	Pouzdro	Hodnota	Počet	Cena 1 ks [Kč]	Cena celkem [Kč]
LED - červená	1206	-----	4	2,40	9,60
Kondenzátor	1206	100nF	1	0,80	0,80
Rezistor	1206	10kΩ	2	0,96	1,92
Kondenzátor	TT2D5	10uF	1	1,10	1,10
Krystal	HC49U	16 MHz	1	8,00	8,00
Kondenzátor	TT2D5	1uF	4	1,00	4,00
Rezistor	1206	22kΩ	1	0,96	0,96
Kondenzátor	1206	22pF	2	1,20	2,40
Rezistor	1206	27kΩ	4	0,96	3,84
Rezistor	1206	2MΩ	4	0,96	3,84
Rezistor	1206	3.3kΩ	4	0,96	3,84
Rezistor	1206	330Ω	4	0,96	3,84
Kondenzátor	1206	47pF	4	1,20	4,80
Konektor MLW10G	-----	-----	1	4,30	4,30
LM358DT	SO8	-----	2	5,50	11,00
ATmega16-16AU	TQFP44	-----	1	63,00	63,00
Mikrofon MCE101	MIC-9.7mm	-----	4	14,00	56,00
Celková pořizovací cena všech součástek:					183,24

Tab. 8.1 Soupis součástek a jejich cena

Ceny uvedené v tabulce *Tab. 8.1* jsou z webového portálu www.gme.cz aktuální k datu 29. 4. 2015. Všechny součástky jsou skladem.

Celková pořizovací cena součástek při nákupu přesného množství pro výrobu jedné desky zvukového lokalizátoru je 183,24 Kč. Tato cena by se rapidně zmenšila při nákupu součástek pro výrobu většího množství desek. U většiny součástek se cena skokově mění u nákupu nad 10 kusů, nad 100 kusů a nad 1000 kusů. Při masové výrobě by bylo možné zvukový lokalizátor prodávat odhadem za 200 Kč.

9. Závěr

Seznámil jsem se s metodami vhodnými pro lokalizaci zvukového zdroje pomocí pole mikrofonů a vypracoval přehled těchto metod. Simulacemi v programovém prostředí Matlab jsem si ověřil pravdivost teoretických základů několika metod popsaných v druhé kapitole, zároveň jsem si ověřil správnost myšlenek, které jsem poté aplikoval v praktické části své diplomové práce.

Praktická část práce spočívala v návrhu systému s mikrofonním polem o 4 mikrofonech pro lokalizaci akustického zdroje. Dalším úkolem bylo poté navržený systém implementovat tak, aby se dal použít jako asistenční pomůcka pro neslyšící. Vzhledem k požadovanému účelu použití mého zařízení jsem navrhl systém na základě metody časových zpoždění signálů. Tato metoda patří k početně jednodušším metodám, avšak pro implementaci byla ideální. Hlavní výhodou je možnost lokalizace pohyblivého zdroje zvuku, dále pak odolnost systému k různým frekvencím zvuků zdroje. Díky těmto vlastnostem se v dnešní době jedná o velmi používanou metodu pro lokalizaci zdroje zvuku.

Implementaci jsem podřídil tomuto účelu takovým způsobem, aby byla co nejlevnější, součástky dobře dostupné a rozměry systému vyhovovaly požadavkům na denní nošení. Pro zpracování signálu byl použit AVR procesor od firmy Atmel, přesněji se jednalo o mikroprocesor ATmega16, protože je to levný, relativně výkonný procesor, který existuje i v pouzdře DIP, které se dá použít do nepájivého pole. Jako akusticko-elektrické měniče byly použity elektretové mikrofony. Jejich cena je nízká a charakteristiky jsou dostatečné pro implementovaný systém. Během implementace jsem používal vývojový kit Arduino Due, který mi pomáhal s ověřováním používaných algoritmů.

Jako další možnost rozšíření implementovaného systému se jeví identifikace zvukového zdroje. Na vývojovém kitu Arduino Due se mi podařilo rozpoznávat zvuk záchranného vozidla a sinusový zvuk o frekvenci 1,5 kHz díky vyšší rychlosti mikroprocesoru, který tvoří základ desky Arduino Due. ATmega16 je bohužel pro implementovaný způsob identifikace zvukového zdroje na základě DFT příliš pomalý. Nicméně jsem připravil funkční algoritmus v jazyce C, který je schopen

identifikovat zvukový zdroj porovnáním spekter s předem definovanými spektry zvuků, které požadujeme identifikovat.

Další možnosti rozšíření systému vidím v první řadě v miniaturizaci systému. Použití výkonnějšího mikroprocesoru a MEMS mikrofonů by zajistilo možnost radikálního zmenšení systému. V navrhovaném systému by se mohl vylepšit způsob signalizace. Signalizace by mohla do budoucna být v podobě displeje, nebo jiného zobrazovacího zařízení. Signalizace nemusí být vizuální, systém by mohl obsahovat i mechanickou signalizaci v podobě vibračních prvků, které by identifikovaly směr příchodu zvuku. V neposlední řadě by se systém mohl rozšířit o Bluetooth modul. Tímto způsobem by mohl systém komunikovat s „chytrými telefony“ nebo případně s „moderními hodinkami“, které v sobě komunikační modul Bluetooth mají.

Seznam použité literatury

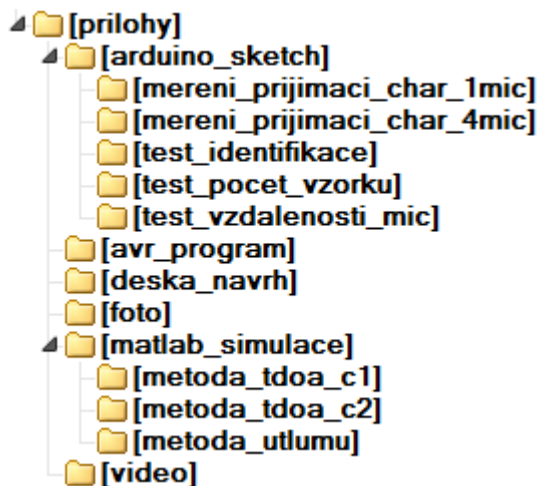
- [1] SIPKEMA, Marcus Karel a Jacob VAN DER ZWAN. Hearing aid glasses using one omni microphone per temple [patent]. US, 8139801. Uděleno 20. 8. 2012. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US8139801>
- [2] HALLECK, Thomas. Google Glass Could Help The Deaf Visualize Nearby Sounds. In: International business times [online]. 2013 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.ibtimes.com/google-glass-could-help-deaf-visualize-nearby-sounds-1314639>
- [3] Microphone arrays: signal processing techniques and applications. Editor Michael Brandstein, Darren Ward. Berlin: Springer, c2001, xviii, 398 s. Digital signal processing. ISBN 35-404-1953-5.
- [4] BENESTY, Jacob a Jingdong CHEN. Study and design of differential microphone arrays. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2013, viii, 182 pages. Springer topics in signal processing, v. 6. ISBN 978-3-642-33752-9.
- [5] MALEPATI, Hazarathaiiah. Digital media processing: DSP algorithms using C. Burlington, MA: Newnes/Elsevier, c2010, x, 758 p. ISBN 18-561-7678-9.
- [6] NAIDU, Prabhakar S. Sensor array signal processing. Boca Raton: CRC Press, 2001, 458 s. ISBN 08-493-1195-0.
- [7] BEZDÍČEK, Martin. Lokalizace pohyblivých akustických zdrojů. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ivan Míča.
- [8] TKADLEC, Josef. Lokalizace vzdáleného zdroje zvuku polem mikrofonů. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.
- [9] GRÉNAR, Milan. Tvarování přijímací charakteristiky mikrofonového pole. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ivan Míča.
- [10] EKSLER, V. Prostorová lokalizace a separace naslepo zdrojů akustických signálů polem mikrofonů. Brno, 2006. Doktorská disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] SCHAUER, Pavel. Vybrané statě z akustiky. Doplnkové texty DB01. Brno, 2008 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf
- [12] Pohlcování zvuku, šíření hluku ve volném a uzavřeném prostoru. 2010 [cit. 2015-05-03], 10 s. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_04.pdf

- [13] WARD, D.B., E.A. LEHMANN a R.C. WILLIAMSON. Particle filtering algorithms for tracking an acoustic source in a reverberant environment. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing [online]. 2003, vol. 11, issue 6, s. 826-836 [cit. 2015-05-03]. DOI: 10.1109/TSA.2003.818112. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1255469>
- [14] NIKIAS, C.L. Estimation of frequency-delay of arrival (FDOA) using fourth-order statistics in unknown correlated Gaussian noise sources. IEEE Transactions on Signal Processing [online]. 1994, vol. 42, issue 10, s. 2771-2780 [cit. 2015-05-03]. DOI: 10.1109/78.324742. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=324742>
- [15] VEJRAŽKA, František. Signály a soustavy: Určeno pro studenty fakulty elektrotechnické 3. vyd. Praha: ČVUT, 1991, 243 s. ISBN 80-010-0450-3.
- [16] Cross Correlation: AutoCorrelation -- 2D Pattern Identification. BOURKE, Paul. Paul Bourke [online]. 1996 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://paulbourke.net/miscellaneous/correlate/>
- [17] MATLAB: The Language of Technical Computing. THE MATHWORKS, Inc. MathWorks: Accelerating the pace of engineering and science [online]. 1994, 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [18] BURNSIDE, Nathan. Atmospheric Attenuation of Sound. THE MATHWORKS, Inc. MATLAB CENTRAL [online]. 1994, 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6000-atmospheric-attenuation-of-sound/content/tmAtten.m>
- [19] Arduino Due. ARDUINO. ARDUINO [online]. 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>
- [20] KAPEL, Franci. Fast analogRead with Arduino Due. FRENKI.NET: Hacking gadgets and having fun with Arduino/Attiny DIY projects [online]. 2013 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://frenki.net/2013/10/fast-analogread-with-arduino-due/>
- [21] ATMEL CORPORATION. Atmel-11057C-ATARM-SAM3X-SAM3A-Datasheet_23-Mar-15. 1600 Technology Drive, San Jose, CA 95110 USA, 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf
- [22] Omnidirectional Electret Condenser Microphone Cartridge. 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/643/002/mce101-datasheet-1.pdf>
- [23] ST MICROELECTRONICS. LM158-LM258-LM358 LM158A-LM258A-LM358A: Low Power Dual Operational Amplifiers. 2005 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/310/014/lm358-datasheet-1.pdf>

- [24] Simple Electret Microphone and Band-Pass Amplifier Circuit. FIZ-IX. Fiz-ix [online]. 2013 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.fiz-ix.com/2013/04/simple-electret-microphone-and-band-pass-amplifier-circuit/>
- [25] ATmega16. ATMEL CORPORATION. Atmel [online]. 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/devices/atmega16.aspx>
- [26] HUADONG WU, M. SIEGEL a P. KHOSLA. Vehicle sound signature recognition by frequency vector principal component analysis. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement [online]. 1999, vol. 48, issue 5, s. 1005-1009 [cit. 2015-05-03]. DOI: 10.1109/19.799662. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=799662>
- [27] MIYAZAKI, Takuya, Yuhki KITAZONO a Manabu SHIMAKAWA. Ambulance Siren Detector using FFT on dsPIC. Proceedings of the 1st IEEE/IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2013 [online]. The Institute of Industrial Applications Engineers, 2013-09-26, č. 1, s. 266-269 [cit. 2015-05-03]. DOI: 10.12792/icisip2013.052. Dostupné z: <https://www2.ia-engineers.org/conference/index.php/icisip/icisip2013/paper/view/247>
- [28] Implementing Discrete Fourier Transform in Atmega32 to make an audio spectrum analyzer. BLOGGER. ELECTRONICS THE KING OF HOBBIES [online]. 2012 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://blog.vinu.co.in/2012/05/implementing-discrete-fourier-transform.html>
- [29] EKSLER, Václav. Lokalizace zdroje vlnění polem mikrofónů v troj-rozměrném prostoru. Elektrověst 2004/51 [online]. 2004 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.elektrověst.cz/clanky/04051/index.html>

Přílohy

A. Obsah přiloženého CD



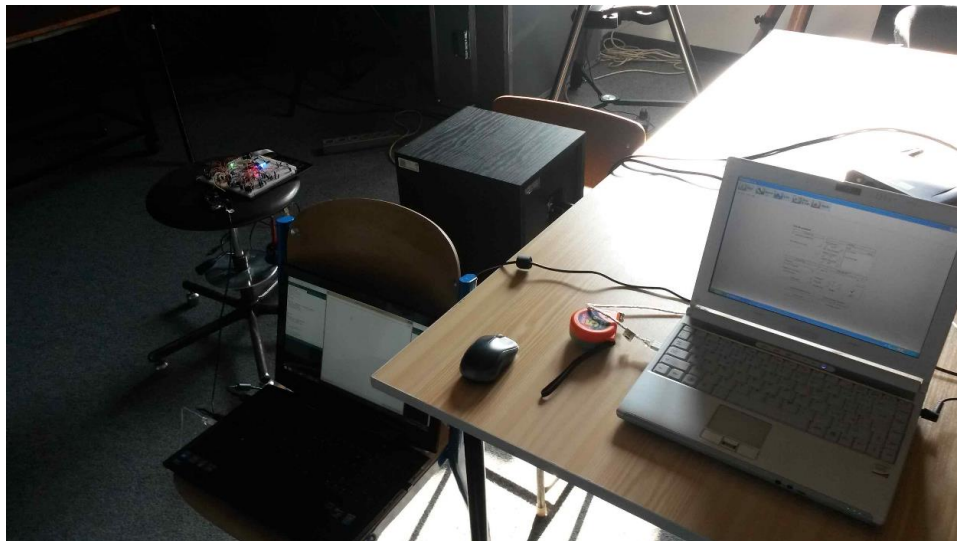
Obr. i Strom složek příloh na CD

Na obrázku Obr. i je zobrazena hierarchie souboru *prilohy*, který je na přiloženém CD.

- složka **arduino_sketch** obsahuje pět podsložek:
 - *podložka mereni_prijimaci_char_1mic* obsahuje sketch spustitelný v programu Arduino 1.6.2, pomocí kterého jsem měřil přijímací charakteristiku jednoho elementárního mikrofonu (kapitola 4.2.1)
 - *podložka mereni_prijimaci_char_4mic* obsahuje sketch spustitelný v programu Arduino 1.6.2, pomocí kterého jsem měřil přijímací charakteristiku čtvercového mikrofonního pole (kapitola 4.2.1)
 - *podložka test_identifikace* obsahuje sketch spustitelný v programu Arduino 1.6.2, pomocí kterého jsem testoval identifikaci zvukového zdroje (kapitola 5.3)
 - *podložka test_pocet_vzorku* obsahuje sketch spustitelný v programu Arduino 1.6.2, pomocí kterého jsem testoval závislost správného vyhodnocení DOA na počtu uložených vzorků (kapitola 5.1)
 - *podložka test_vzdalenosti_mic* obsahuje sketch spustitelný v programu Arduino 1.6.2, pomocí kterého jsem testoval závislost správného vyhodnocení DOA na vzdálenosti mikrofonů (kapitola 5.2)

- složka **avr_program** obsahuje finální podobu programu pro ATmega16
- složka **deska_navrh** obsahuje návrh desky plošných spojů v programu EAGLE 6.4.0
- složka **foto** obsahuje fotodokumentaci k měření přijímacích charakteristik mikrofonů a fotky implementovaného systému
- složka **matlab_simulace** obsahuje tři podsložky:
 - *podložka metoda_tdoa_c1* obsahuje simulační soubor lokalizace pomocí metody TDOA č. 1 (kapitola 3.2)
 - *podložka metoda_tdoa_c2* obsahuje simulační soubor lokalizace pomocí metody TDOA č. 2 (kapitola 3.3)
 - *podložka metoda_utlumu* obsahuje simulační soubor lokalizace pomocí metody útlumu (kapitola 3.1)
- složka **video** obsahuje videozáznam funkčnosti implementovaného systému

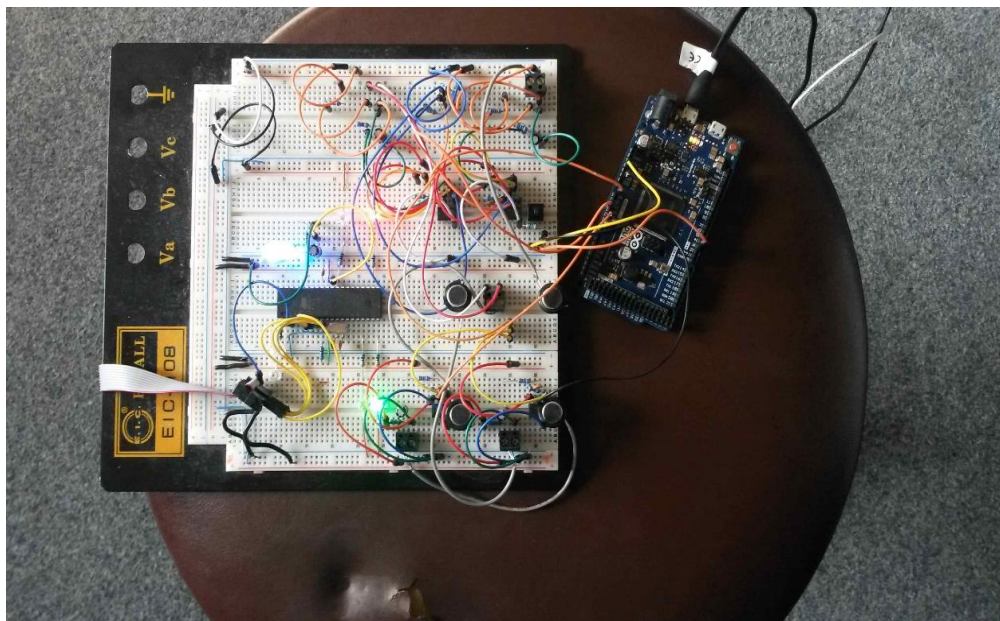
B. Fotodokumentace z měření přijímacích charakteristik mikrofonů



Obr. ii Foto měřícího pracoviště

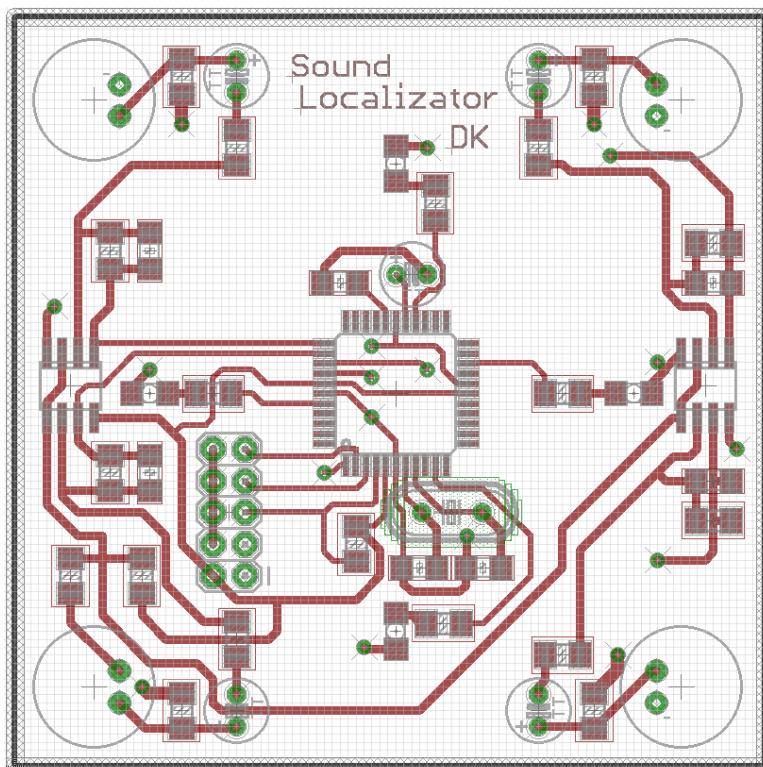


Obr. iii Foto měřící aparatury a reproduktoru

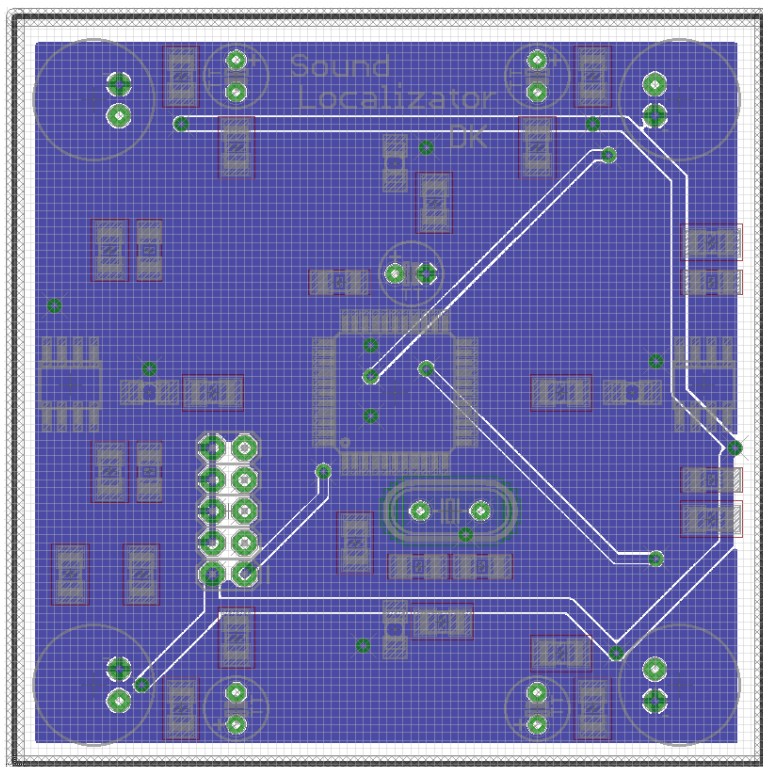


Obr. iv Foto systému s vývojovým kitem Arduino Due na otočném měřicím zařízení

C. Obrázková dokumentace návrhu plošného spoje



Obr. v Obrázek svrchní vrstvy plošného spoje



Obr. vi Obrázek spodní vrstvy plošného spoje