

Sestava algoritmu pro lokalizaci zvuku naprogramovaných v Matlabu

Set of sound localization algorithms programmed in Matlab

Bc. Martin Papež

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je shromáždění teoretických informací o lokalizačních algoritmech. V úvodu čtenáře seznamuje se zákonitostmi šíření zvuku v prostředí, které jsou nezbytným předpokladem pro pochopení principů lokalizačních metod. Dále jsou podrobně popsány hardwarové požadavky pro zpracování akustického signálu. V další části této práce jsou postupně uvedeny metody lokalizace akustických zdrojů. V praktické části jsou zhodnoceny vlastnosti algoritmů založené na metodách odhadu časových zpoždění a tvarování přijímací charakteristiky. V poslední části této diplomové práce je připravena laboratorní úloha, která má za úkol seznámit studenty s danou problematikou.

Klíčová slova: akustický signál, zvuk, šíření zvuku, lokalizace, mikrofonní pole, Beamforming, Fourierova transformace

ABSTRACT

The aim of my work summarizes theoretical information concerning localisation algorithms. In the beginning, my work introduces principles of sound propagation in a media, principles necessary for localisation methods comprehension. Next, I describe hardware requirements of acoustic signal processing in detail. Following part of my work deals with localisation methods of acoustic sources. The practical part evaluates algorithm features based on time delay estimation methods and reception characteristics modifications. The last part describes a laboratory experiment that is to acquaint students with the topic.

Keywords: acoustic signal, sound propagation, localization, array of microphones, Beamforming, Fourier transform

Tímto děkuji panu Ing. Martinu Pospíšilíkovi za poskytnutí užitečných rad a objektivních postřehů během tvorby této diplomové práce. Hlavní dík patří rodičům, kteří mě po celou dobu mého studia podporovali.

„Think rich, look poor.“- A Warhol

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně dne

podpis diplomanta

OBSAH

1	ZVUK	12
2	PRINCIPY ŠÍŘENÍ ZVUKU V PROSTORU	14
2.1	HUYGENSŮV-FRESNELŮV PRINCIP	17
2.1.1	ODRAZ A OHYB AKUSTICKÉ VLNY.....	18
2.2	INTERFERENCE VLNĚNÍ	19
2.3	DOPPLERŮV EFEKT	21
3	LOKALIZACE ZDROJE ZVUKU U ČLOVĚKA	22
3.1	FYZIOLOGIE LIDSKÉHO UCHA	22
3.2	PROSTOROVÉ VNÍMÁNÍ ZVUKU	23
3.2.1	PSYCHOAKUSTIKA	26
3.3	HLASITOST ZVUKU	26
4	METODY PRO LOKALIZACI ZDROJE ZVUKU	28
4.1	MIKROFONNÍ POLE	29
4.1.1	METODA ODHADU ČASOVÝCH ZPOŽDĚNÍ (TDOA)	31
4.1.2	PROSTOROVÝ ALIASING.....	34
4.1.3	TYPY MIKROFONNÍCH POLÍ	34
4.2	BEAMFORMING	37
4.2.1	TVAROVAČ TYPU DELAY AND SUM (DAS).....	38
4.2.2	VÁHOVÁNÍ	40
4.2.3	METODA TVAROVÁNÍ PŘÍJÍMACÍ CHARAKTERISTIKY	41
4.3	SPEKTRÁLNÍ ODHAD VYSOKÉHO ROZLIŠENÍ	41
5	POŽADAVKY NA HARDWAROVÉ ZPRACOVÁNÍ ZVUKU	43
5.1	MIKROFONY	45
5.1.1	ROZDĚLENÍ PODLE TYPU MIKROFONU	45
5.1.2	CITLIVOST MIKROFONU	47
5.1.3	SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA MIKROFONU	47
5.1.4	FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MIKROFONU.....	49
5.2	ZVUKOVÁ KARTA	51
5.2.1	AD PŘEVOD	52
5.3	MATLAB	56
5.4	FOURIEROVA TRANSFORMACE	57

5.4.1	FOURIEROVA TRANSFORMACE VE SPOJITÉ OBLASTI	58
5.4.2	DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE.....	58
5.4.3	KRÁTKODOBÁ FOURIEROVA TRANSFORMACE V ČASE	59
6	ZHODNOCENÍ METOD LOKALIZACE ZDROJE ZVUKU	63
6.1	METODA ODHADU ČASOVÉHO ZPOŽDĚNÍ.....	64
6.1.1	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	66
6.2	METODY ZALOŽENÉ NA BEAMFORMINGU	67
6.2.1	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	69
7	PŘÍPRAVA LABORATORNÍ ÚLOHY	70
7.1	TEORETICKÝ RÁMEC.....	70
7.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJE.....	71
7.3	PRACOVNÍ POSTUP.....	71
7.4	ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY	71

ÚVOD

Lokalizace akustických zdrojů je významné téma patřící do oblasti zpracování signálů. Nachází široké uplatnění v mnoha vědních oborech, například v radiolokaci, zdravotnictví či v rozpoznání lidské řeči. Cílem lokalizace akustických zdrojů je podat co nejpřesnější informaci o rozmístění zvukových zdrojů v podobě jejich prostorových charakteristik.

První část této diplomové práce je zaměřena na principy šíření zvuku v prostředí. Porozumění těmto principům je nutnou podmínkou pro další práci se zvukovými signály.

Pro lepší pochopení metod lokalizace zdroje zvuku je v práci zařazena kapitola zabývající se fyziologií lidského ucha. V této části práce jsou zmíněny podmínky pro prostorové vnímání zvuku, ze kterých mnohé lokalizační metody vycházejí.

Dalším bodem v této práci je seznámení se metodami lokalizace zdroje zvuku. Jsou zde zmíněny nejdůležitější poznatky pro metody založené na teorii mikrofonních polí a Beamformingu. Pro některé z těchto metod jsou pak sestaveny algoritmy v prostředí MATLAB.

Pro zpracování zvukových signálů je třeba uvažovat, že kvalita výsledného signálu je závislá na použitých hardwarových prvcích elektroakustického řetězce. V této kapitole jsou popsány jednotlivé procesy diskretizace zvukového signálu pro potřeby lokalizačních algoritmů.

V praktické části jsou zhodnoceny navržené algoritmy TDOA a Beamforming. Jsou zde zmíněny jejich vlastnosti, kritéria pro správný výpočetní aparát. Praktickým výstupem této diplomové práce je připravená laboratorní úloha, která může být zařazena do výuky některého z předmětů vyučovaného na FAI UTB. V úloze je kladen důraz na domácí přípravu studenta, který si tak doplní znalosti o této problematice formou samostudia. Výstupem této laboratorní úlohy je protokol, ve kterém student zodpoví řadu otázek a prokáže, zda danému tématu rozumí. Součástí výstupu je prezentace poznatků, jež může být představena na cvičení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

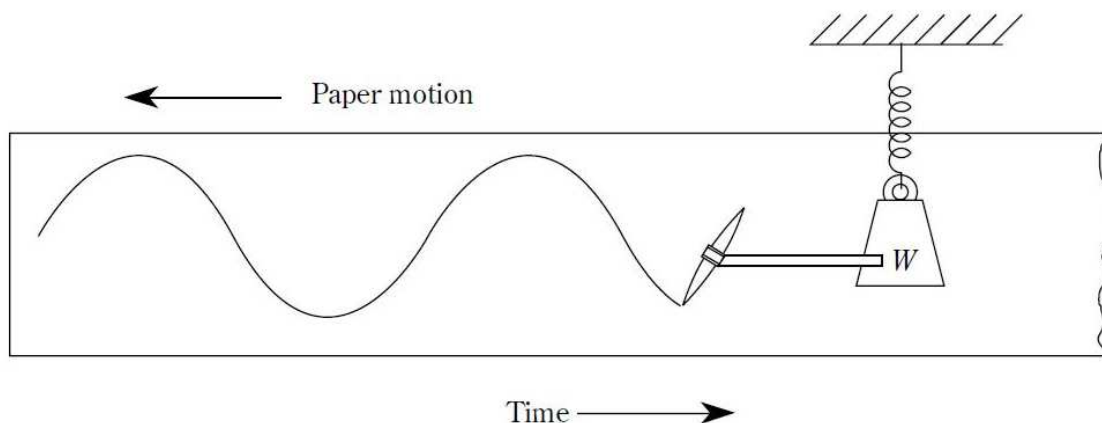
1 ZVUK

Věda, jež se zabývá zkoumáním zvuku, se nazývá akustika (z řeckého "akustikos"-vztahující se ke slyšení). Tento vědní obor je velice široký, zahrnuje velké množství disciplín, zabývá se vznikem zvuku, jeho šířením v prostředí i působením na lidské smysly.

- Šíření zvuku, fyzikální základy hudby
- Hudba/hudební nástroje a prostory
- Prostorová akustika, stavební akustika
- Akustika v otevřeném/uzavřeném prostoru

Zvuk můžeme obecně definovat jako podélné mechanické vlnění v látkovém prostoru, které je charakterizováno parametry pohybu částic pružného prostředí, nebo u vlnového pohybu parametry zvukového pole. Část zvuků se projevuje jako slyšitelný zvuk - což je akustické kmitání pružného prostředí v pásmu frekvencí od 16 Hz do 20 kHz , schopné vyvolat zvukový vjem. Mechanické vlnění mimo tento frekvenční rozsah sluchový vjem nevyvolává, přesto se někdy také označuje jako zvuk. [19]

Zvuky v kmitočtovém pásmu s frekvencemi vyššími než 20000 Hz se nazývají ultrazvuk. Jsou pro člověka neslyšitelné, nicméně někteří živočichové slyší i vyšší frekvence (např. pes do 35 kHz , kočka do 50 kHz , netopýr do 98 kHz). Tuto schopnost bohatě využívají při lovu - lokalizují zdroje zvuku - kořist. Horní kmitočtovou hranicí ultrazvuku je 1 GHz , dále pak hovoříme o hyperzvuku. Vlnění o kmitočtu menším než 16 Hz označujeme jako infrazvuk. Spodní hranice se udává v rozmezí mezi $0,001$ a $0,2\text{ Hz}$. Je známo, že velryby, sloni, hroši, nosorožci a aligátoři používají infrazvuk k dorozumívání.



Obr. 1 Kmitavý pohyb zavěšeného tělíska na pružině

Zvuk vzniká kmitáním bodů a bodových soustav. Kmitavý pohyb je fyzikální děj, u něhož se v závislosti na čase periodicky mění charakteristické veličiny (např. poloha, rozměr, tlak, rychlost). Nejjednodušší je periodický pohyb sinusového průběhu, který si lze jednoduše představit jako kmitavý pohyb zavěšeného tělíska na pružině. (Obr. 1) [9],[19]

Tento harmonický průběh lze popsat vzorcem (1)

$$a = A \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (1)$$

Kde T (perioda) je časem, za který soustava provede jeden kmit. V akustice se místo periody častěji používá počet period za jednotku času (sekundu) - $1/T$ a označuje se f - frekvence. Její jednotkou je 1 Hz - počet kmitů za sekundu. Maximální výchylka A je největší vzdáleností, o kterou se soustava vychýlí z rovnovážné polohy = poloměru kružnice, po které obíhá koncový bod vektoru. Okamžitá amplituda (a) je dána vzdáleností soustavy od rovnovážné polohy ve sledovaném okamžiku t .

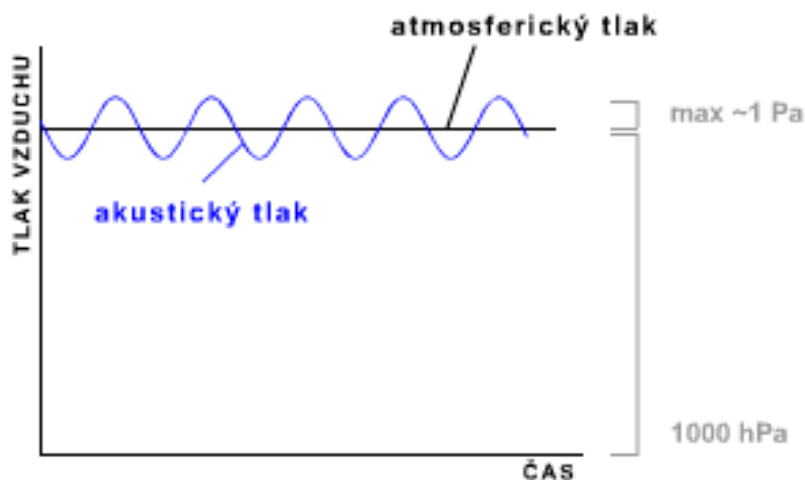
2 PRINCIPY ŠÍŘENÍ ZVUKU V PROSTORU

Ze zdroje zvuku se šíří zvukové vlnění do okolního prostředí. V kapalinách a plynech se šíří jako postupné vlnění podélné, v pevných látkách jako postupné vlnění podélné i příčné. Nutnou podmínkou pro šíření zvuku je pružné prostředí. V nepružném prostředí (vlna, korek, plst' apod.) se zvuk šíří špatně. Takové látky používáme jako zvukové izolátory. Ve vzduchoprázdnu se zvuk nešíří.[19]

V předešlé kapitole jsou probrány základní vlastnosti vlnění, jako je frekvence (f), perioda (T) a amplituda (a). Vlnění je jev, který probíhá nejenom v čase, ale také v prostoru. Pro popis vlny zavádíme tzv. vlnovou délku, která představuje vzdálenost dvou sousedních vlnoploch. Jako vlnoplochu označujeme množinu bodů prostoru, která při vlnění kmitá se stejnou fází. Vlnová délka je tedy vzdálenost, kterou vlna urazí během jedné periody. Můžeme ji popsat vztahem (2)

$$\lambda = v \cdot t = \frac{v}{f} \quad (2)$$

Zvuková vlna je rozruch v hmotném prostředí, který se projevuje zředováním a zhušťováním tohoto prostředí. V místech s vyšší hustotou je vyšší tlak, v místech se zředěným prostředím je nižší tlak.



Obr. 2 Akustický vs. atmosférický tlak

Kdybychom měřili tento tlak vzduchu velmi citlivým manometrem, zjistili bychom, že tlak obsahuje dvě složky, velkou a na čase téměř nezávislou složku představující barometrický tlak $p_0 \approx 10^5 \text{ Pa}$, a malou, zato však velmi rychle se měnící složku představující akustický tlak p_a . Velikostí akustického tlaku se rozumí jeho efektivní hodnota a uvádí se v pascálech $[Pa]$. Akustický tlak je proto superponován na statickém barometrickém tlaku. Pro bodový zdroj klesá akustický tlak lineárně úměrně se vzdáleností od zdroje. Vzhledem k tomu, že pro akustický tlak nelze určit směr, jedná se o skalární veličinu.[15],[22],[25]

Rychlost, kterou se vlnění šíří v prostoru, závisí na fyzikálních vlastnostech prostředí, např. na pružnosti a hustotě prostředí. Jsou-li fyzikální vlastnosti prostředí ve všech směrech stejné, je také ve všech směrech stejná velikost rychlosti vlnění. Takové prostředí nazýváme izotropní prostředí. Rychlost šíření zvuku v plynech můžeme popsat následujícími vztahy (3),(4)

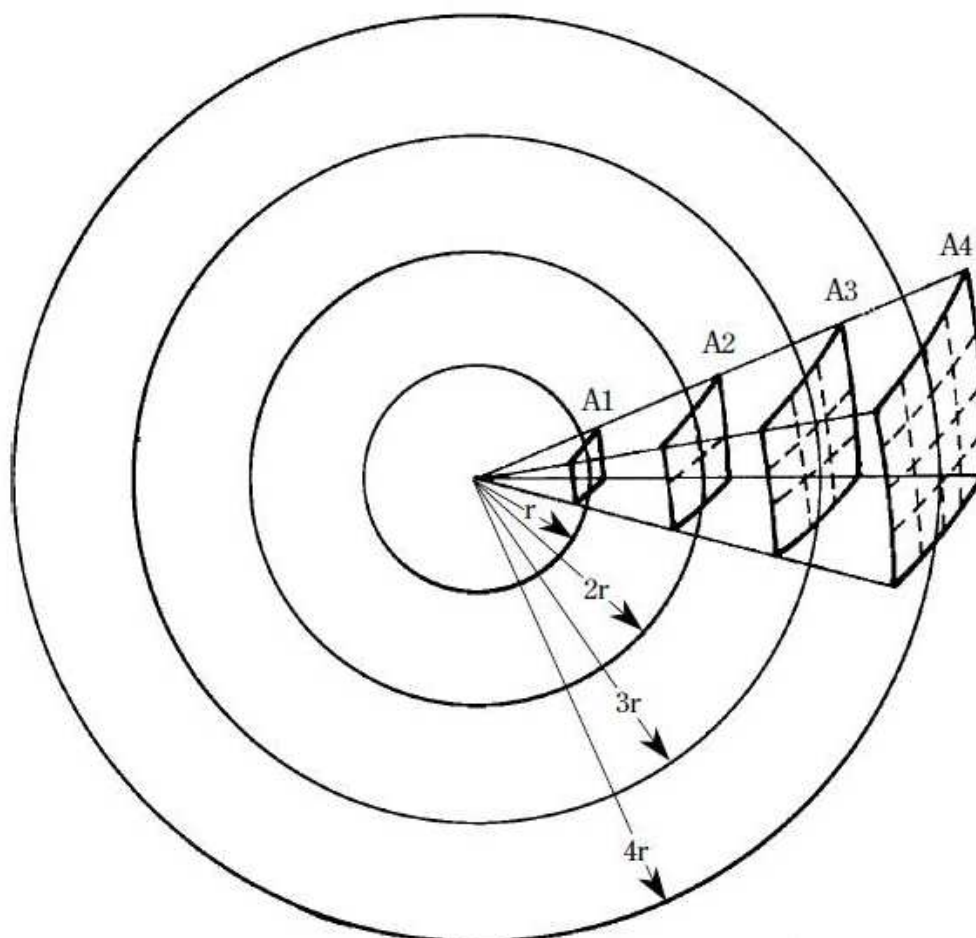
$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \gamma \cdot t\right)} \quad (3)$$

Pro rychlost zvuku ve vzduchu vycházíme ze zjednodušeného vzorce, kde t určuje vzduchu, platí tedy

$$c = (331,57 + 0,607 \cdot t) \quad (4)$$

Intenzita zvuku I udává tok zvukové energie jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření za jednotku času. Závisí na efektivních hodnotách akustického tlaku p_{ef} a akustické rychlosti v_{ef} a na jejich fázovém posunu $\cos \varphi$. Pro rovinnou vlnu je tento posuv nulový a platí zde vzorec (5) [25]

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} \quad (5)$$



Obr. 3 Závislost intenzity zvuku na vzdálenosti

Víme-li, že akustický tlak ubývá lineárně se vzdáleností od zdroje, pak z uvedeného vztahu vidíme, že intenzita zvuku ubývá se čtvercem vzdálenosti. (Obr. 3)[9] Stoupá-li intenzita zvuku lineárně, pak výsledný vjem lidského sluchu stoupá logaritmičtě.[25],[27]

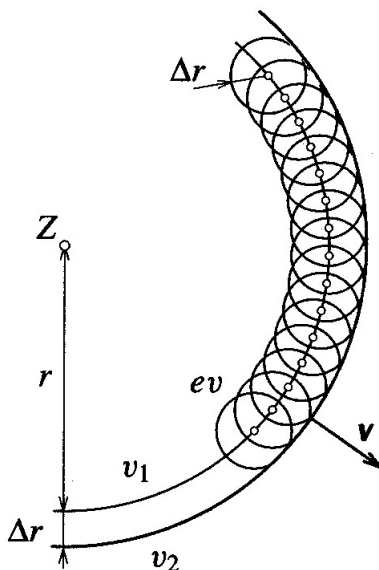
$$B = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{ef}}{P_{oef}} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{P_{ef}}{P_{oef}} \quad (6)$$

Pro vyjádření intenzity se tedy používá poměrná jednotka intenzity zvuku 1dB (decibel).

2.1 Huygensův-Fresnelův princip

Pro šíření vlnění v libovolném pružném prostředí obecně platí tzv. Huygensův princip, který objevil Christian Huygens v roce 1690. Předpokládá, že v každém okamžiku lze každý bod na čele šířící se vlny chápat jako nový zdroj vlnění (sekundárních vln). Nový tvar „čela vlny“ v čase o malý okamžik pozdějším lze pak určit jako vnější obálku vln, šířících se z těchto zdrojů. Lze jej popsat následujícím vztahem (7), který je uveden spíše pro úplnost. Lépe si jej můžete představit na obrázku č. 4.

$$\psi(s, v) = -\frac{i}{\lambda} K(v)\psi_0(M) \frac{\exp(iks)}{s} = \frac{k}{2\pi} K(v)\psi_0(M) \frac{\exp[i(ks - \pi/2)]}{s} \quad (7)$$



Obr. 4 Huygensův princip šíření vlnění

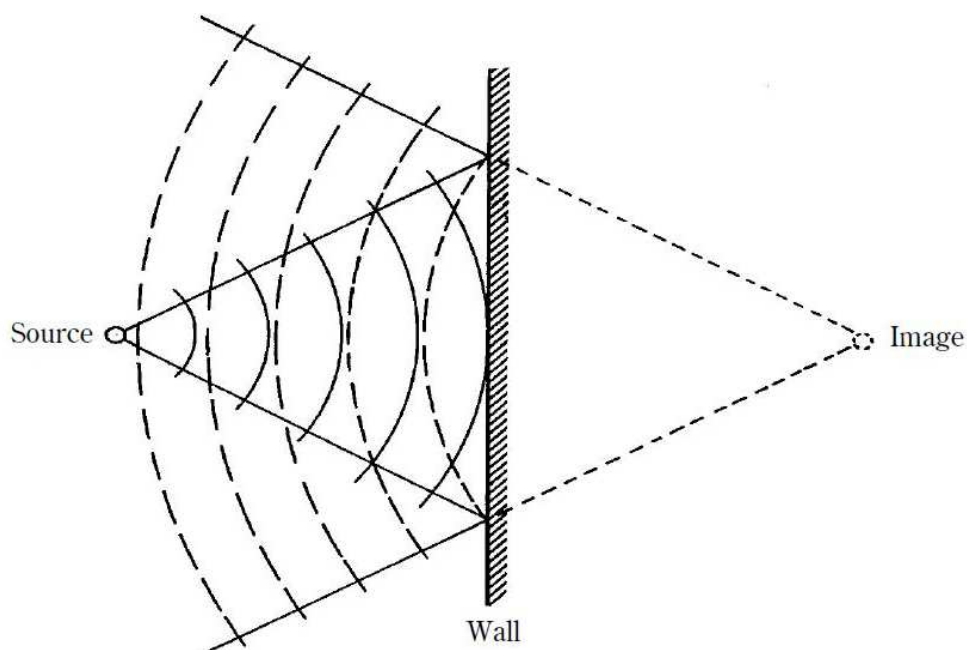
Každý bod vlnoplochy, do něhož postupně vlnění izotropního prostředí, v němž existuje vazba, dospělo v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Celková vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obálka všech elementárních vlnoploch a kolmice na ni jednoznačně určuje směr šíření.[17],[18]

2.1.1 Odraz a ohyb akustické vlny

Jestliže vložíme vlnění do cesty překážku, mohou nastat dva základní případy dalšího šíření vlnění:

- Odraz
- Ohyb

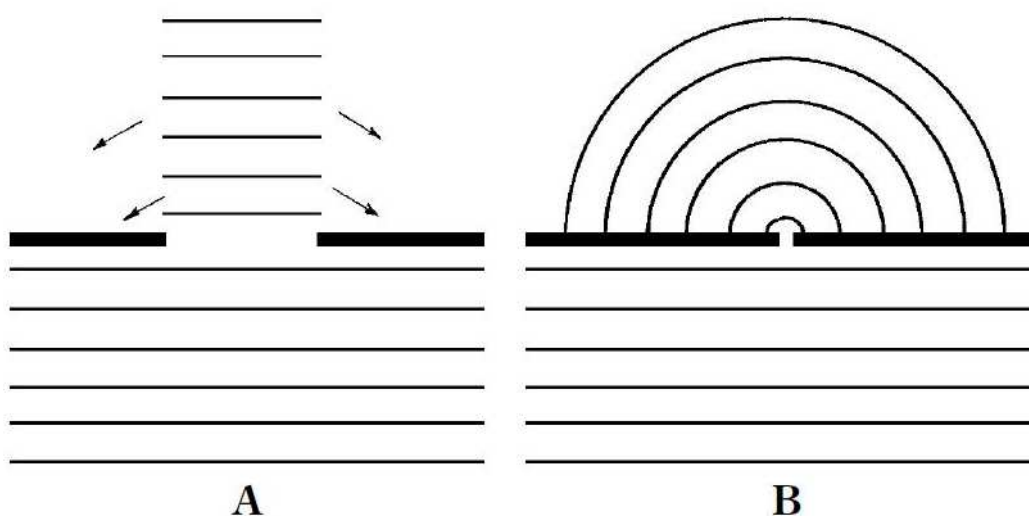
Jestliže je překážka větší oproti vlnové délce vlny, dochází k odrazu vlnění. Princip odrazu vlnění můžeme vysvětlit pomocí Huygensova principu. Sledujeme vlnoplochu, která postupuje ze zdroje k rovinné překážce. (Obr. 5) [9]



Obr. 5 Odraz zvukové vlny od překážky

Jestliže vytvoříme vnější obálku všech těchto elementárních vlnoploch, dostaneme tvar vlnoplochy po odrazu od překážky. Odražená vlnoplocha má takový tvar, jako by vlnění vycházelo ze zdánlivého obrazu zdroje – image za překážkou.[17],[19]

Jestliže je překážka menší oproti vlnové délce, dochází k ohybu vlnění. Princip ohybu vlnění můžeme také vysvětlit na obrázku 6.[9] Okraje překážky, k nimž vlnění dospěje, se stávají zdrojem elementárních vlnění, která se v případě blízkých okrajů, tj. malých rozměrů překážky, za překážkou spojují, čímž vytvoří souvislou výslednou vlnoplochu.



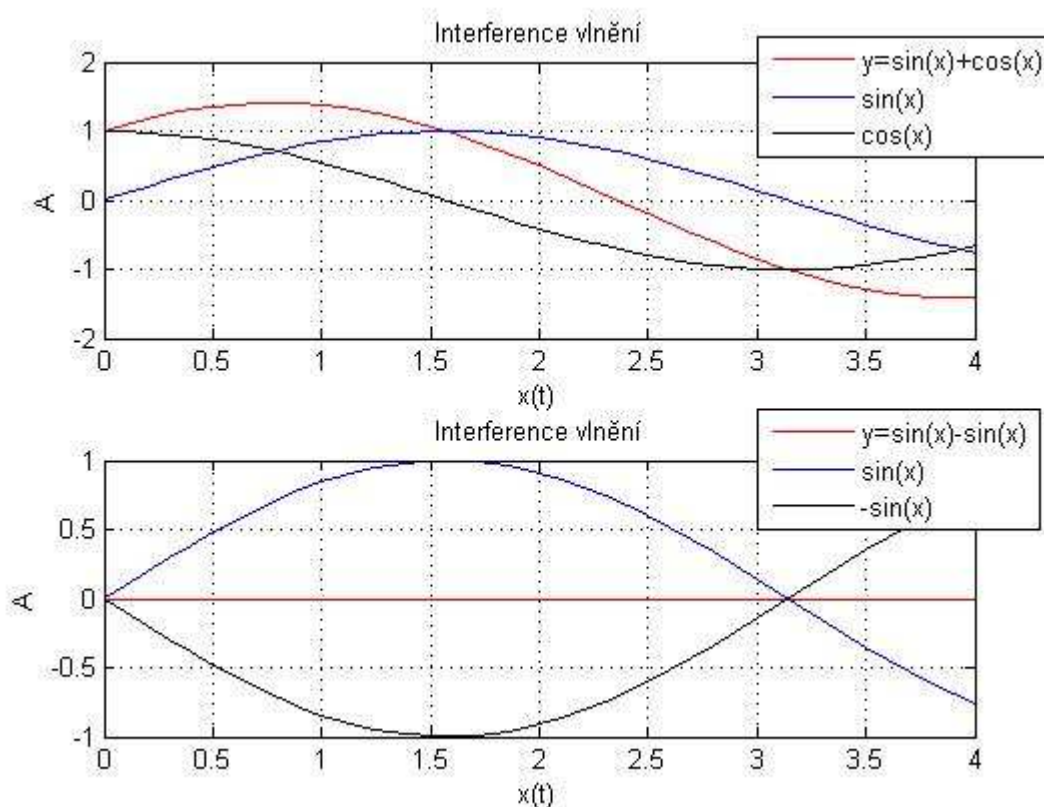
Obr. 6 Ohyb vlnění na štěrbině

Podobný jev nastává, je-li v překážce velkých rozměrů malý otvor. Pozorujeme, že za překážkou se vlnění šíří všemi směry, ačkoliv bychom očekávali, že po průchodu otvorem bude vlnění postupovat jen původním směrem, kterým se šířila rovinná vlna. Pokus je důkazem, že nastal ohyb vlnění. Oba jevy mají velký význam v oblasti šíření světla, zvuku a rozhlasových vln.[17],[19]

2.2 Interference vlnění

Děj, při kterém dochází ke skládání dvou nebo více vlnění, nazýváme interference vlnění. Co se stane, jsou-li v prostředí dva zdroje zvuku? Vzniknou dvě vlnoplochy, které se navzájem překrývají. Při svém pohybu se však neovlivňují a šíří se navzájem nezávisle. V místech, kde se vlny překrývají, je možné zpozorovat, že amplituda jednotlivých vln má

různou velikost. Je to způsobeno tím, že obě vlnění se při vzájemném setkání skládají v jediné vlnění výsledné. Pro lepší představu je tento příklad demonstrován na obrázku 7.



Obr. 7 Ukázka interference vlnění

Kmitání jednotlivých míst pružného prostředí, v nichž vlnění interferuje, se řídí principem superpozice. Proto se mohou vlnění interferencí zesilovat nebo zeslabovat, či dokonce navzájem zcela rušit. Vznikají tzv. interferenční maxima a minima, jejichž rozmístění v pružném prostředí závisí na vlastnostech skládaných vlnění a na vzdálenostech zdrojů vlnění. Stálé rozmístění interferenčních maxim a minim nastává při skládání dvou vlnění stejné frekvence a s konstantním fázovým rozdílem kmitání jejich zdrojů. Taková dvě vlnění se nazývají vlnění koherentní.[9],[17],[18]

2.3 Dopplerův efekt

V roce 1842 prezentoval Christian Doppler publikaci, ve které zdůvodnil, že měřená vlnová délka či frekvence monochromatického vlnění závisí na pohybovém stavu zdroje a pozorovatele vztahovanému vůči prostředí, které studované vlnění přenáší. Tento princip byl posléze použit pro všechny ostatní typy vlnění, např. elektromagnetické vlnění – (světlo). Lze jej popsat vztahem (8)

$$f' = f_0 \left(\frac{v \pm v_0}{v \pm v_s} \right) \quad (8)$$

Platí, že vnímaná frekvence f' bude závislá na frekvenci vysílané f_0 , rychlosti zdroje zvuku v_s a rychlosti příjemce v_o . To vše za předpokladu, že se zvuk bude šířit pružným prostředím rychlostí v . Ve vzorci (8) jsou uvedena znaménka \pm , protože záleží na směru pohybu zdroje a příjemce. V praxi tedy mohou nastat tři přípustné situace, a to:

- Klidný pozorovatel, pohybující se zdroj
- Klidný zdroj, pohybující se pozorovatel
- Obecný pohyb pozorovatele a zdroje

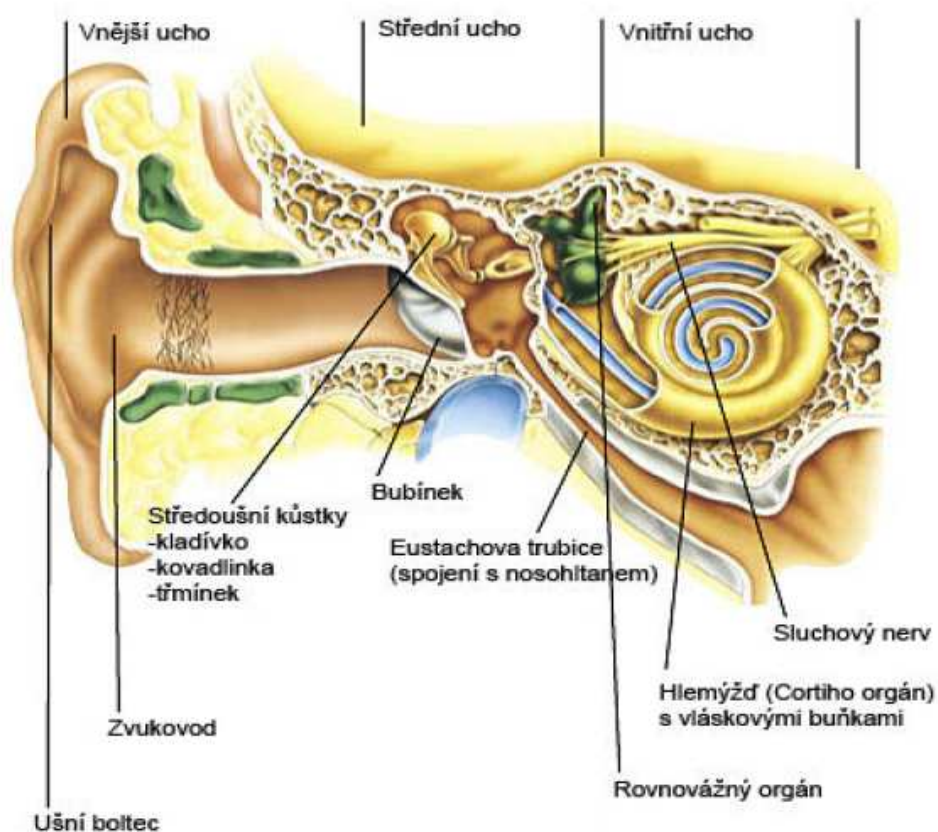
S akustickým Dopplerovým jevem se můžeme setkat v každodenním životě. Například, když kolem nás projíždí automobil, motocykl či houkající lokomotiva - při přibližování objektu slyšíme vyšší tón a po průjezdu během jeho vzdalování tón nižší. Dopplerova jevu využívá řada měřicích přístrojů a zařízení, např. radary pro měření rychlosti vozidel nebo lékařské sonografy. Radar pracuje tak, že vysílá elektromagnetické vlnění určité frekvence směrem k vozidlu a od vozidla přijímá odražené vlnění, jehož frekvence se vlivem Dopplerova jevu poněkud liší. Skládáním vyslaného a přijatého signálu vznikají rázy o slyšitelné frekvenci, která je přímo úměrná rychlosti vozidla. Měření rychlosti se tak převádí na měření frekvence. Dalším významné využití Dopplerova jevu je v astronomii při měření radiálních rychlostí vzdálených těles, např. hvězd a galaxií.[9],[17]

3 LOKALIZACE ZDROJE ZVUKU U ČLOVĚKA

Sluch je jeden z lidských smyslů, bez kterého bychom na svět nahlíželi jinak. Nejvíce podmětů nutných pro přežití obstarává právě tento orgán. V této kapitole jsou popsány základní aspekty lidského slyšení a prostorového vnímání zvuku u člověka.

3.1 Fyziologie lidského ucha

Lidské ucho je komplikovaný orgán, který nám slouží jako detektor přicházejícího mechanického vlnění. Získané informace předává mozku, který zvukové podmínky vyhodnocuje.



Obr. 8 Fyziologie lidského ucha

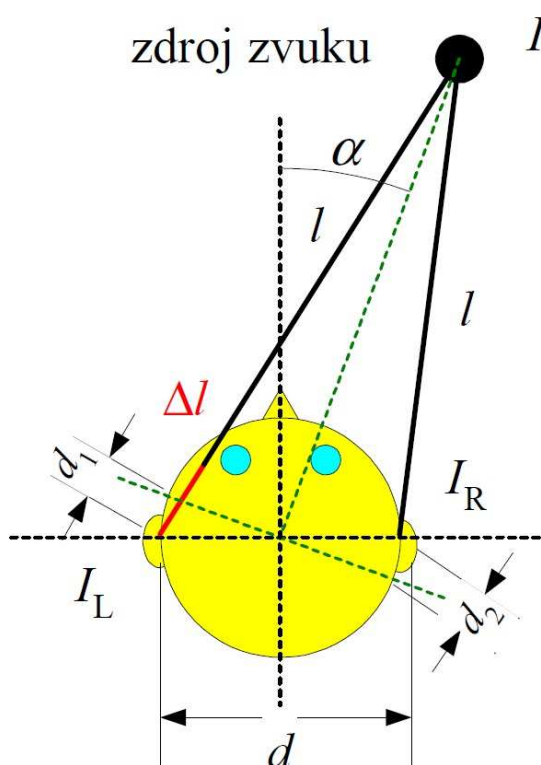
Lidské ucho se dělí na 3 základní části – vnější, střední a vnitřní ucho. (Obr. 8)[1] Vnější ucho se skládá z ušního boltce a zvukovodu. Boltce zachycuje zvukové vlny, které jsou následně převedeny zvukovodem až k bubínku. Střední ucho je uloženo v dutině za bubínkem. Eustachova trubice, která vede z této dutiny do nosohltanu, slouží k vyrovnání atmosférického tlaku na obou stranách bubínku. Bubínek je tedy namáhán změnami akustického tlaku, který jej rozechvívá účinkem zvukových vln přicházejících zvukovodem. Vnitřní strana bubínku je pak propojena prostřednictvím středoušních kůstek - kladívka, kovádliny a třmínku - s vnitřním uchem. Tyto kůstky provádějí impedanční přizpůsobení mezi velkou plochou bubínku a malou plochu oválného okénka. [25]

Vnitřní ucho je vyplněno tekutinou s vlnovým odporem asi 20krát větším, než je vlnový odpor vzduchu. Středoušní kůstky převádějí s velkou účinností část mechanické energie do energie kapaliny hlemýždě. Ten je rozdělen do dalších 3 dutin, oddělených od sebe membránami. Důležitou je hlavně basální membrána, která slouží jako opora Cortiho orgánu, který obsahuje přibližně 15000 tenkých vláskových buněk. Tyto buňky reagují na změnu tlaku v kapalině hlemýždě a vyvolávají nervové impulsy přenášené sluchovým nervem do mozku. Ve vlastním uchu dochází pouze k hrubé analýze zachyceného zvuku. Sluchový podmět odchází z obou uší do mozku, kde dochází k jeho detailnímu zpracování a vyhodnocení. Jednou z mnoha jeho činností je například vzájemná korelační analýza signálů zachycených levým a pravým uchem, významná pro prostorové slyšení.[1],[9],[18]

3.2 Prostorové vnímání zvuku

Člověk si musí uvědomit, že zvukové stereo systémy jsou relativně novou záležitostí. Lidé si dříve mysleli, že párové orgány má člověk pro případ, kdyby mu jeden z nich vypověděl funkci. Prostorové vnímání zvuku je umožněno na základě lokalizace zvuku pomocí tzv. binaurálního slyšení – tedy posloucháním oběma ušima. Jedná se o proces vycházející z analýzy intenzity a časového zpoždění zvukových vln přicházejících do sluchového ústrojí. Rozdíl intenzity zvuků přicházejících do obou uší je významný pouze u velmi

blízkých zdrojů, kdy se vzdálenosti obou uší od zdroje výrazně liší. U vzdálených zdrojů je rozdíl intenzity zvuku tak malý, že jeho vnímání nemá na prostorové slyšení žádný vliv.



Obr. 9 Prostorové vnímání zvuku

Na obrázku 9 je ukázáno, jak funguje lokalizace zvukového signálu u člověka. Ze zdroje zvuku I , který je vychýlen od mediální roviny o úhel α , přichází zvuková vlna, která dopadá posluchači na obě uši (I_L , I_R). Trajektorie, kterou urazí zvuková vlna, se dá popsat vztahem (9) [13]

$$\Delta l = d_1 + d_2 = d \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

Příčinou prostorového vnímání je rozdílný okamžik dopadu zvukových vln na obě uši. Tyto vlny dopadají ve stejném okamžiku s rozdílnou fází

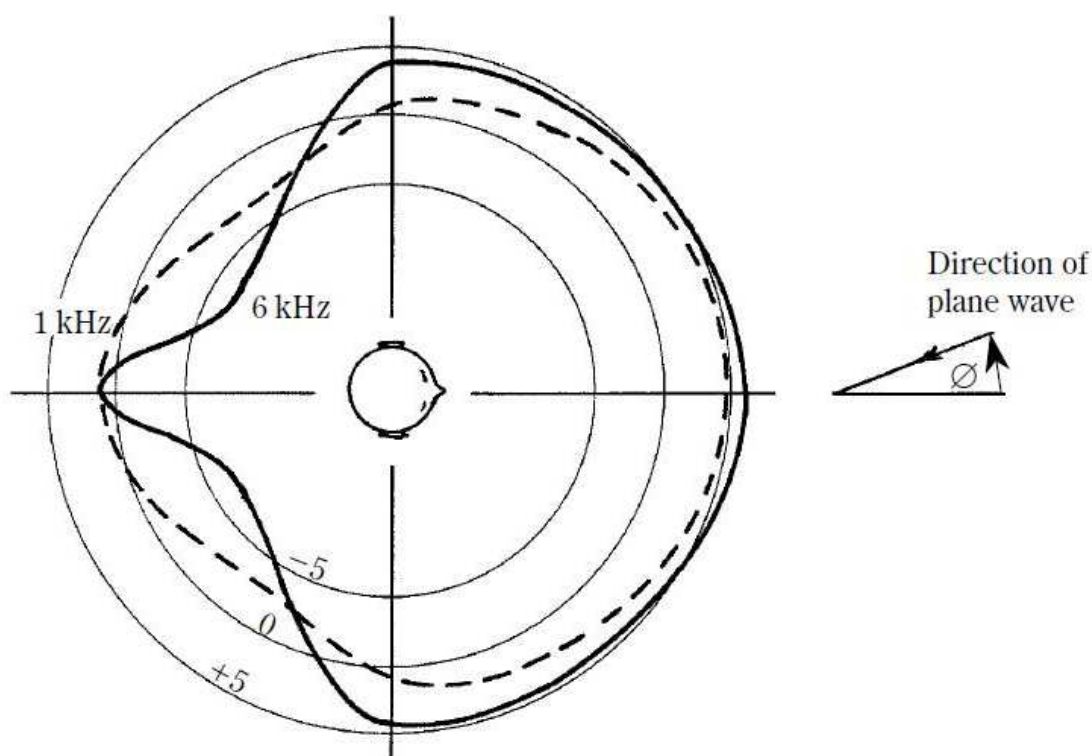
$$\Delta \varphi = f \cdot \frac{\Delta l}{c} \cdot 360 \quad (10)$$

Pro krátce trvající signály je rozhodující u vnímání směru zvuku časový rozdíl Δt příchodu zvuku do obou uší

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{c} \quad (11)$$

Lidský sluch je v těchto případech schopen detekovat časovou diferenci 50 s. Centrální nervová soustava je pak schopna tento fázový rozdíl analyzovat a určit směr přicházejícího zvuku.[1]

Směrový diagram (Obr. 10) poměrné citlivosti lidského ucha je pro nízké frekvence kulový a se zvyšující se frekvencí se postupně zužuje do úzkého laloku ve směru osy ušního boltce. [9]



Obr. 10 Směrový diagram citlivosti lidského ucha (1-6kHz) [9]

Délka zvukové vlny pro frekvence pod 200 Hz je již tak velká, že při jakémkoli natočení hlavy posluchače je fázový rozdíl vln v obou uších velmi malý, a mozek jej nedokáže analyzovat. Pro tyto frekvence ztrácí sluch schopnost prostorového slyšení. Obecně platí,

že čím vyšší je frekvence zvukových vln, tím lidský sluch přesněji lokalizuje zdroj zvuku. Prostorové vnímání zvuku člověkem má svá úskalí, v této části práce jsou zmíněny základní principy jeho vnímání. Jejich další rozbor převyšuje rámec této diplomové práce, proto bych vás dál odkázal na odbornou literaturu. [9]

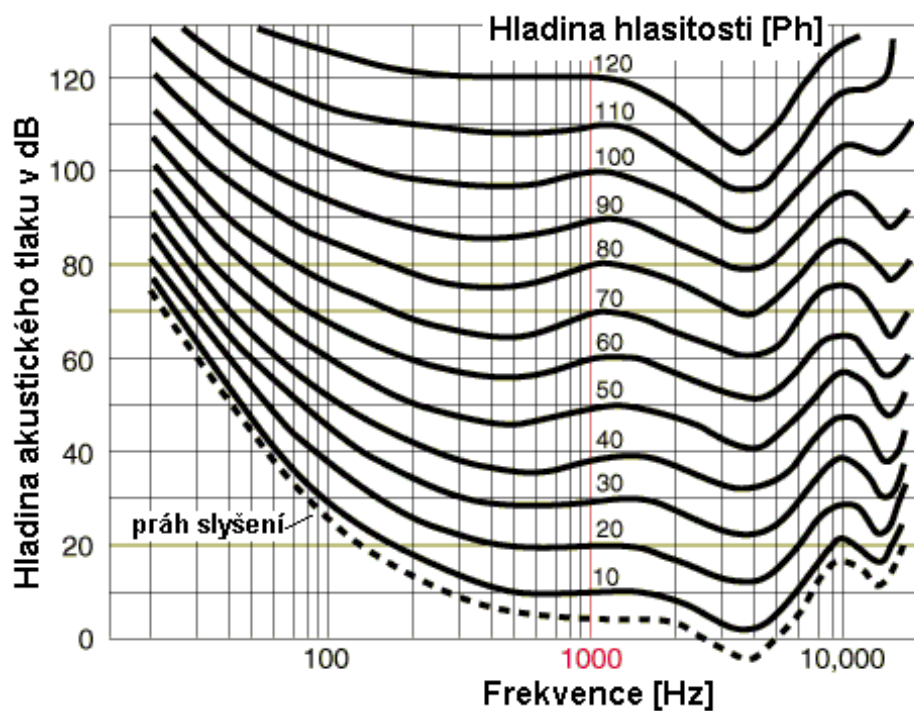
3.2.1 Psychoakustika

Proces slyšení a vnímání zvukového vjemu má svá úskalí. Lidské ucho má problém s malou citlivostí ve vertikálním směru slyšení. Lokalizace zvukových signálů s nižšími frekvencemi může být v tomto směru dost komplikovaná, někdy i nemožná. Významnou roli při lokalizaci zdroje zvuku představují psychologické aspekty, které vnímání provázejí. Představme si například, že prolétá kolem nás vrtulník. Bez jakékoliv složité lokalizace, za účasti zraku a sluchu, se v podstatě okamžitě ohlédneme směrem vzhůru. Je to dáno zkušeností, podvědomě zvuk podobný zvuku vrtulníku očekáváme shora. Tímto se významně urychluje proces lokalizace zdroje zvuku. [1],[10]

3.3 Hlasitost zvuku

Hlasitost zvuku je subjektivně vnímaná intenzita zvuku. Lidský sluch nevnímá pro různé frekvence intenzitu jako stejnou hlasitost. Tato závislost je zobrazena na (Obr. 10) a může být popsána vztahem (12)

$$L_p = 20 \log \frac{P}{\rho_0} \quad (12)$$



Obr. 11 Hladiny stejné hlasitosti

Jednotkou hlasitosti je 1 fón [Ph]. Jeho definice vychází z definice objektivní intenzity zvuku, naměřené v decibelech. Hladina hlasitosti ve fónech je pro frekvenci 1kHz rovna hladině intenzity v decibelech. [9],[25],[26]

4 METODY PRO LOKALIZACI ZDROJE ZVUKU

Vůbec prvním zařízením, které bylo schopno lokalizovat zvukový zdroj, byl Mayerův topofon. Byl sestaven koncem 19. století a sloužil pro zlepšení navigace ve špatném počasí. První přístroje byly konstrukčně velmi jednoduché – byly tvořeny z páru rohů či mušlí, které sloužily k zachycení příchozího zvuku a přenášely ho zvukovodem k navigátorovi. Největšího zájmu se dočkala audio lokace po 1. světové válce, kdy byla používána pro detekci a lokalizaci zvuku motorů letadel. Zjištěné informace byly předávány protiletadlovému dělostřelectvu, a to tak mohlo zamířit ještě před vizuálním kontaktem. Konec rozvoje těchto detekčních systémů přichází s vynálezem radiolokátoru v roce 1934.

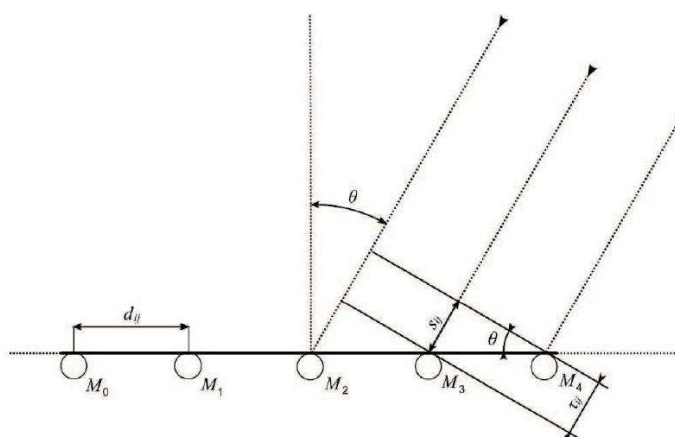


Obr. 12 Jeden z prvních lokalizačních přístrojů

V současné době je audio-lokace opět hojně využívaná metoda. Jedná se zejména o aplikace v bezpečnostních, telekonferenčních, robotických systémech a automobilovém průmyslu. Existuje mnoho metod pro lokalizaci zdroje zvuku, v této kapitole jsou popsány některé z nich. [1],[20]

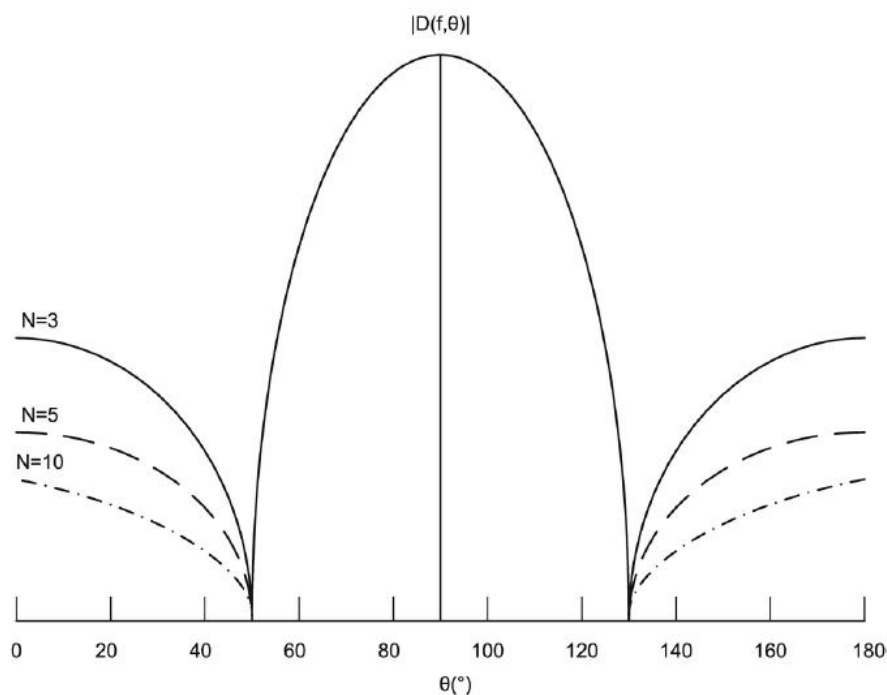
4.1 MIKROFONNÍ POLE

Mikrofonní pole nachází praktické použití ve všech vědních oborech, kde se zkoumají vlastnosti zdrojů vlnění. Nejčastěji se zabývá například prostorovou akustikou, zdravotnickou technikou, ale i seizmologií.



Obr. 13 Rovinné mikrofonní pole s konstantním rozestupem mikrofonů

Nejjednodušší pro představu: budeme uvažovat lineární pole (Obr. 13), které si můžeme představit jako soustavu mikrofonů M , ležících ve stejné rovině a vzdálených od sebe o konstantní rozdíl d . V mikrofonních polích se nejčastěji používají všesměrové mikrofony, a to z důvodu stejné citlivosti na signály. Nevýhodou je, že při stejné citlivosti se uplatňují ozvěny i nežádoucí šumy. Tuto nevýhodu lze redukovat zvýšením detekční schopnosti systému použitím více mikrofonů.

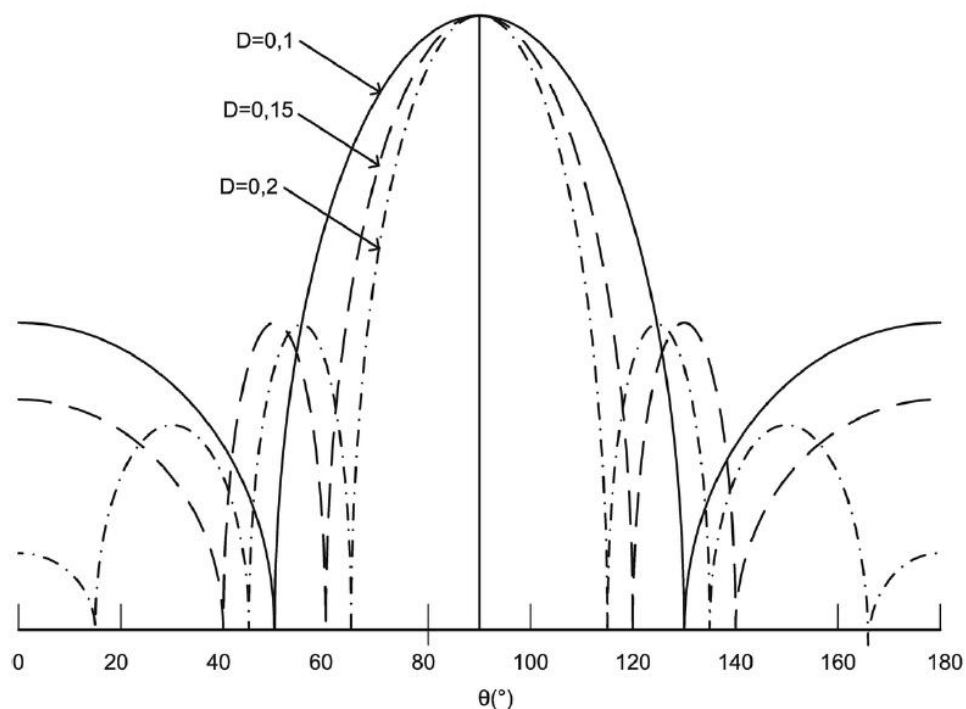


Obr. 14 Směrová přijímací charakteristika mikrofonního pole[12]

Na (Obr. 14 a 15) je znázorněna směrová přijímací charakteristika mikrofonního pole. Je zde jasně ukázáno, že pole s větším počtem mikrofonů bude lépe filtrovat dopadající zvukové vlny ze stran, a tím bude mít lepší schopnost směrové lokalizace. Volba počtu senzorů se jeví jako stěžejní, protože s rostoucím počtem mikrofonů narůstají nároky na výpočetní techniku. Vzdálenost mezi mikrofony d je dalším kritériem úspěchu lokalizačních schopností mikrofonního pole. Je jí třeba určit podle spektra přicházejícího zvukového signálu [1],[5],[6]

$$f_{\min} = \frac{c}{M \cdot d} \quad (13) \quad f_{\max} = \frac{c}{2 \cdot d} \quad (14)$$

Ze vztahů (13) a (14) vyplývají mezní frekvence měřitelné mikrofonním polem. S rostoucí vzdáleností d mezi mikrofony dochází k potlačování rušivých zvuků z bočních směrů.

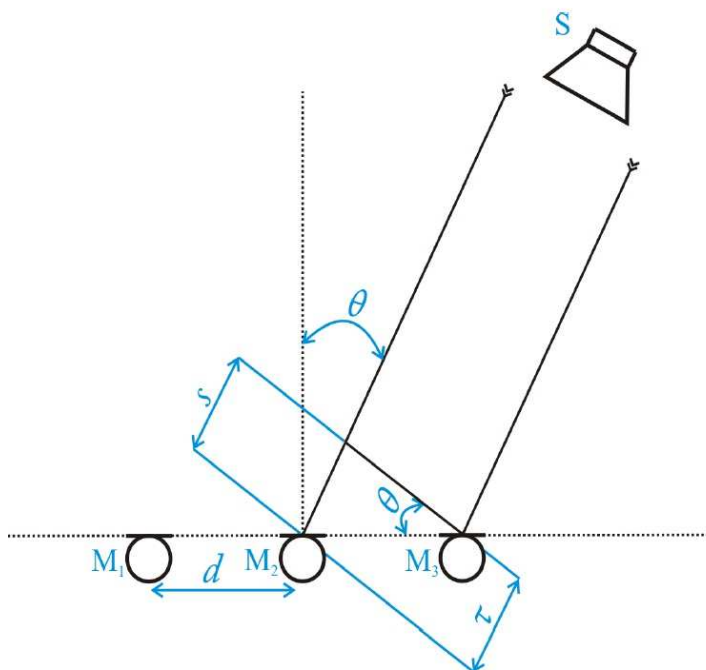


Obr. 15 Směrová přijímací charakteristika mikrofonního pole pro různé vzdálenosti d

4.1.1 Metoda odhadu časových zpoždění (TDOA)

Metoda je také označována zkratkou TDOA (Time Difference of Arrivals). Je používána především v lokalizačních systémech s mikrofonními sensorickými poli pro její jednoduchou implementovatelnost. Je založena na sběru vzorků dat z jednotlivých mikrofonů v poli a jejich následné analýze. Ta většinou probíhá ve dvou krocích:

- Určením vzájemných časových zpoždění naměřených vzorků TDE (Time Delay Estimate)
- Výpočtem polohy zvukového zdroje na základě znalosti geometrického uspořádání mikrofonního pole



Obr. 16 Lineární mikrofonní pole

Úhel dopadu (θ) zvukové vlny na pole mikrofonů můžeme popsat vztahem, kde τ nám udává časové zpoždění příchodu vlny k vzdálenějšímu mikrofonu.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{s}{d}\right) = \left(\frac{\tau \cdot c}{d}\right) \quad (15)$$

Pro odhad časového zpoždění τ z naměřených vzorků lze s výhodou využít vzájemné křížové korelace, která udává informaci o tom, jak moc jsou si dva signály podobné. Pokud označíme signál z prvního mikrofonu jako $x_1[n]$, z druhého $x_2[n]$ a počet vzorků N , jejich vzájemnou korelaci R_{12} vypočítáme pomocí vztahu (16) [2]

$$R_{12}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n] * x_2[n+k] \quad (16)$$

Při vlastním výpočtu vystupuje signál $x_1[n]$ jako referenční, $x_2[n]$ jako porovnávaný. Časové zpoždění je možné vypočítat pouze za předpokladu, že budeme znát vzorkovací frekvenci f_{vz} , při které byly dané signály zaznamenány.

$$\tau = \frac{1}{f_{vz}} \arg \max(R[k]) \quad (17)$$

Zpoždění mezi dvěma mikrofony se vypočítá pomocí indexu posloupnosti, ve kterém se ve funkci vzájemné korelace vyskytne maximum. Přesnost určování TDE se odvíjí od hodnoty vzorkovací frekvence, geometrie mikrofonního pole, úrovně šumu a doby dozvuku.

Výpočet křížové korelace N vzorků je velice časově náročný, protože počítač musí vykonat velké množství zbytečných operací. Místo křížové korelace můžeme použít rychlou Fourierovu transformaci, která může s výhodou provádět veškeré výpočetní operace se signály ve frekvenční oblasti. To zjednoduší výpočetní náročnost celého algoritmu. Signály $x_1[n]$ a $x_2[n]$ jsou vyjádřeny pomocí FFT jako $X_1(f)$ a $X_2(f)$. [1],[12]

$$r_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_1(f) \cdot X_2^*(f) \cdot e^{2\pi f t} df \quad (18)$$

kde uvažujeme $\psi(f)$ jako filtr vstupních signálů

$$\psi(f) = |X_1(f) * (X_2(f))|^{-1} \quad (19)$$

Vzájemná korelace signálů $x_1[n]$ a $x_2[n]$ je potom dána inverzní Fourierovou transformací ze vztahu (20)

$$R_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(f) |X_1(f) * (X_2(f))| \cdot e^{2\pi f t} df \quad (20)$$

tedy

$$R_{12}[n] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} X[j] \cdot e^{\frac{2\pi j n i}{N}} \quad (21)$$

Výhodou tohoto postupu je několikanásobné zrychlení výpočtu v případě použití algoritmu rychlé Fourierovy transformace. [13]

4.1.2 Prostorový aliasing

Mikrofonní pole v podstatě provádí prostorové vzorkování, které je analogií vzorkování v čase. V případě, že nebude dodržen vzorkovací teorém, dojde k prostorovému aliasingu.

$$f_s \geq 2 \cdot f_{vz} \quad (22)$$

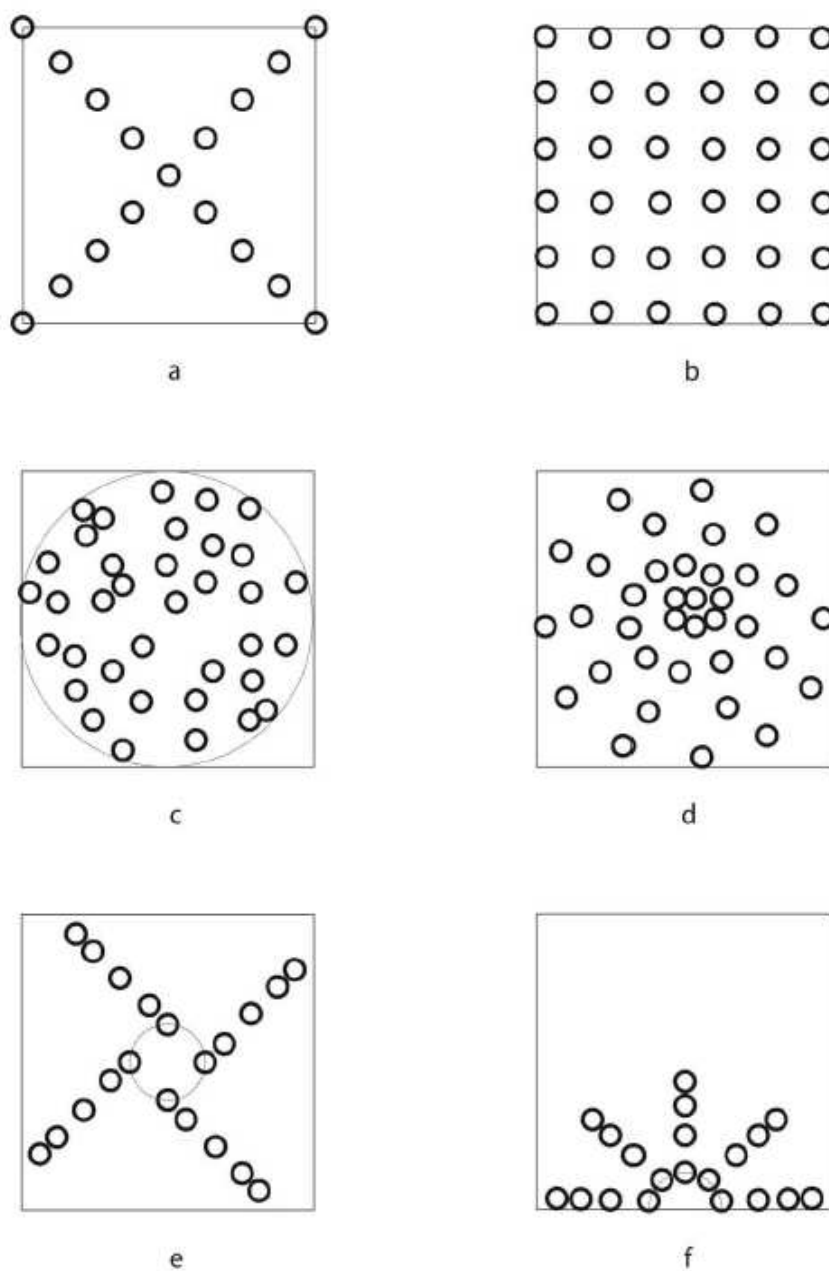
Za předpokladu, že budeme analyzovat úzkopásmové zvukové signály s maximální obsaženou frekvencí f_{max} , bude prostorovému aliasingu zabráněno, pokud fázový rozdíl mezi dvěma prostorově vzorkovanými signály bude nabývat hodnot v intervalu $(-\pi, \pi)$. Této podmínce je vyhověno v případě volby vzdálenosti sousedních senzorů d dle vztahu (23) [1],[14]

$$d < \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (23)$$

4.1.3 Typy mikrofonních polí

Při návrhu mikrofonního pole je třeba vzít v úvahu řadu praktických aspektů jako spodní a horní kmitočet zpracovávaného kmitočtového pásma, maximální úroveň postranních laloků přijímací charakteristiky, průměr pole a vzdálenost pole od měřeného zdroje. Všechny tyto veličiny jsou spolu úzce spjaty. Výkonnost mikrofonního pole je do značné míry určena geometrií pole. Každá geometrie zavádí do přijímací charakteristiky určité rozdíly. V zásadě rozlišujeme 2 druhy mikrofonních polí:

- s pravidelnou geometrií
- s nepravidelnou geometrií



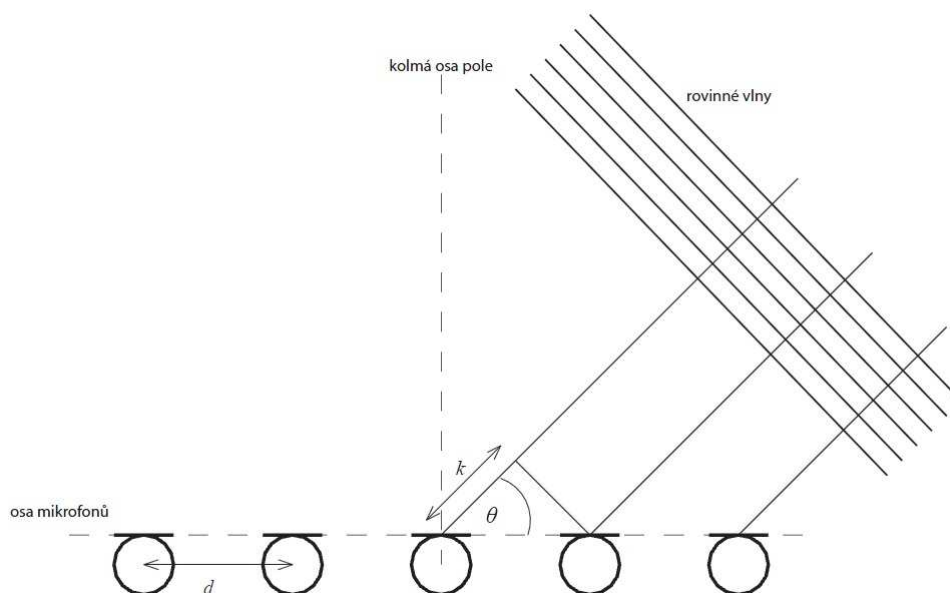
Obr. 17 Typy různých geometrií mikrofonních polí

Nejjednodušším příkladem pravidelného pole je rovinné lineární pole s konstantní vzdáleností d mezi mikrofony. Přijímací charakteristika pole je pak zobrazena na obrázku 16. Limitním faktorem pravidelných polí je pak prostorový aliasing. Tomu se lze vyhnout, pokud geometrie pole bude taková, že rozdílový vektor mezi polohou jakýchkoli dvou mikrofonů bude v rámci pole jedinečný. Tedy pokud se tento vektor nebude opakovat pro

žádnou jinou dvojici mikrofonů v poli. Pole s nepravidelnou geometrií umožňují daleko lépe lokalizovat zvuk, než když jsou mikrofonní pole pravidelně rozestavena. Vytvořit návrh nepravidelného pole, které by za daných podmínek poskytlo uspokojivé výsledky, je velmi obtížné. Často se k tomuto úkolu přistupuje metodou pokusu a omylu, což zvyšuje jeho časovou náročnost. Vyžadujeme-li dobré úhlové rozlišení pro velmi vzdálený zdroj signálu, musíme použít pole velkých rozměrů o relativně velkém počtu mikrofonů. Jednodušší situace je u parametrických nepravidelných konfigurací jako například spirálové pole. Parametry takového pole mohou být testovány systematicky jako třeba hledáním minima MSL v závislosti na parametrech pole. Funkce tohoto typu však často vykazují vysoce nestálé chování, proto ani toto uspořádání není ideální. Posledním typem mikrofonních polí je uspořádání prostorové. Nejčastěji je použito rozestavení mikrofonů do tvaru krychle. V tomto případě se budeme snažit nalézt dva neznámé parametry a to směr příchodu signálu θ a jeho elevaci Φ . Tento typ polí odstraňuje oproti polím rovinným nejednoznačnost směru příchodu signálu.[4],[12]

4.2 BEAMFORMING

Beamforming je měřicí technika využívající mikrofonních polí k lokalizaci zdrojů zvuku ve středních až dlouhých vzdálenostech od zdroje. Tato metoda je založená na prostorové filtraci. Filtry byly navrženy pro úzkopásmové signály, které mohou být charakterizovány jediným kmitočtem. Pro širokopásmové signály, které mají bohatý rozsah neharmonických frekvencí, nebudou tyto tvarovače poskytovat stejnou přijímací charakteristiku pro různé kmitočty. Lokalizace zdroje zvuku probíhá na podobném principu, na jakém funguje lokalizace pomocí našich dvou uší a mozku. Mozek je schopen zaměřit se na jeden konkrétní zvuk a zbytek nevnímat, dokonce i pokud jsou okolní rušivé zvuky poměrně hlasité. Prostorová filtrace vytváří vlastně elektronicky natočitelnou anténu s úzkým paprskem, která má velký zisk v jednom určitém směru, a v ostatních má značný útlum.[4]



Obr. 18 Lineární mikrofónové pole s ekvivalentním rozmístěním mikrofónů

Beamforming může být použit v oblastech detekování přítomnosti určitých signálů, získání směru příchodu DOA, zvýraznění signálu v záznamu ovlivněné šumem či ostatními nežádoucími zdroji signálu a odrazy. Obvykle je definován jako prostorový filtr, který je zařazen na výstupu sensorového pole. Průběh prostorové filtrace můžeme rozdělit do dvou částí:

- synchronizace
- vážené sčítání

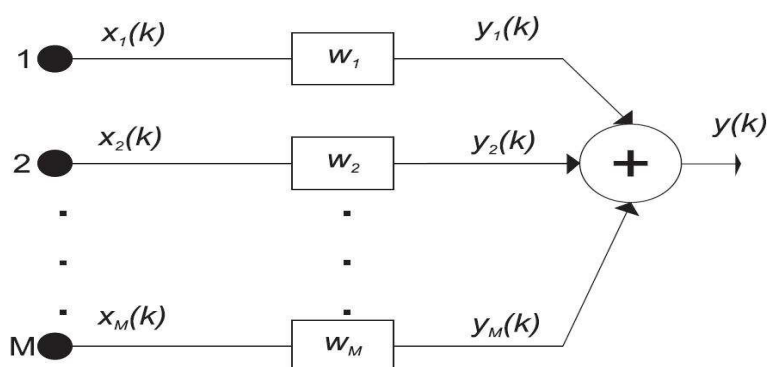
Proces synchronizace spočívá v úpravě rozdílů časových zpoždění na každém mikrofону o vhodnou hodnotu, tak aby byl signál ze všech mikrofonů zřázován a synchronizován. V praxi se pro synchronizaci nejvíce využívá metody odhadu časových zpoždění (TDOA), která je podrobně popsána v kapitole 4.1. Synchronizační část řídí směr natočení mikrofonního pole. V druhém kroku se přidělují jednotlivým signálům váhové koeficienty. Tyto signály jsou následně sečteny, aby vytvořily jediný výstup. Vhodným nastavením váhových koeficientů je možné ovlivnit přijímací charakteristiku. V mnoha aplikacích mohou být váhové koeficienty získány na základě požadované přijímací charakteristiky. Obvykle je ale výhodnější odhadovat tyto koeficienty adaptivním způsobem založeným na charakteru konkrétního signálu a šumu.[1],[4]

Nejjednodušší beamformery pracují metodou zpoždění a součtu (Delay and Sum), kdy se vychází z předpokladu, že signály zachycené senzory jsou totožné s výjimkou zpoždění, které bude pro každý senzor odlišné. Jestliže tedy v řetězci zpracování signálu nastavíme pro jednotlivé mikrofony zpoždění dané váhami h_1 až h_n , získáme maximum užitečného signálu, zatímco šum bude potlačován.

4.2.1 Tvarovač typu Delay and Sum (DAS)

Mezi nejjednodušší tvarovače patří právě tvarovač typu Delay And Sum, bývá označován zkratkou DAS. Základní struktura tvarovače typu DAS je vidět na obrázku 19.[13] Vychází z předpokladu, že signály zachycené senzory jsou totožné s výjimkou časového zpoždění, které bude pro každý senzor odlišné. Jestliže tedy v řetězci zpracování signálu nastavíme

pro jednotlivé mikrofony zpoždění dané váhami h_1 až h_n , získáme maximum užitečného signálu, zatímco šum bude potlačován. DAS tvarovač se chová jako filtr s konečnou délkou impulsové odezvy. To znamená, že signál dopadající na mikrofonní pole je modifikován filtrem s frekvenční charakteristikou odpovídající příslušnému úhlu dopadu.[4]



Obr. 19 Tvarovač typu Delay and Sum

Výstup tvarovače DAS můžeme popsat vztahem (24), kde každému vstupnímu signálu $x_i[n]$ je přiřazena jedna z vah w_i .

$$y[k] = \sum_{i=1}^M w_i \cdot x_i[k] \quad (24)$$

Lokalizace zdroje zvukového signálu tvarovače DAS je založena na výpočtu úrovně výstupního signálu pro jednotlivé předpokládané úhly dopadu zvukové vlny

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{\Phi}[i]^2} \quad (25)$$

Zdroj signálu se určí společným vyhodnocením úhlu α maximální RMS hodnoty

$$\alpha = \arg \max(V_{RMS}[\Phi]) \quad (26)$$

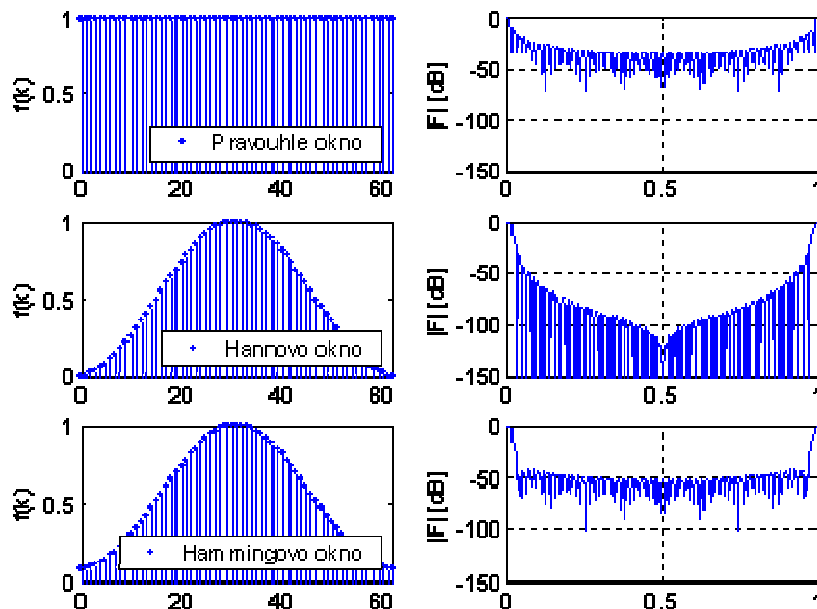
Výhoda tohoto typu tvarovače spočívá v nezávislosti jeho parametrů na pracovních podmínkách a především na typu vstupního signálu. Nevýhodou je malé zvýraznění užitečného signálu, které je úměrné počtu mikrofonů. [1],[14]

4.2.2 Váhování

Hlavní výhodou metod založených na beamformingu je, že jednotlivým signálům můžeme přiřadit váhu. Tím můžeme změnit vlastnosti tvarovací charakteristiky, jako jsou šířka hlavního paprsku, šířka bočních laloků či odstup signálu od šumu. Váhování vychází z vlastností DTFT, které jsou popsány v kapitole 5.4.3.

$$X[k, m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot w[n - mN] \cdot e^{-j \frac{2\pi mk}{M}} \quad (27)$$

Váhování může být provedeno násobením vyhlazovací okénkovou funkcí, jako je například Hammingovo okno. V případě, že váhy nechceme použít, nastaví se hodnoty všech koeficientů w_m na stejnou hodnotu (nejčastěji hodnotu 1). Hlavní rozdíl ve vlastnostech beamformeru při použití vhodných váhových koeficientů je, že dojde k rozšíření hlavního laloku a zároveň k potlačení postranních laloků spektra. Vzroste tak dynamický rozsah na úkor prostorového rozlišení. Nejčastěji jsou v praxi používána váhová okna pravoúhlá, Hammingovo a Hannovo. (Obr. 20) [1],[4],[9]



Obr. 20 Váhovací okna – a, pravoúhlé; b, Hannovo; c, Hammingovo

4.2.3 Metoda tvarování přijímací charakteristiky

Dalším způsobem, jak můžeme nahlížet na problematiku lokalizace zdroje zvuku, je metoda tvarování přijímací charakteristiky. Ta poskytuje vstupně/výstupní model chování systému. Každá přijímací charakteristika je popsána počtem laloků s různou rozhodovací úrovní. Obecně platí, že počet laloků v pásmu od 0° - 180° roste s rostoucím kmitočtem a počtem mikrofonů. Lalok s nejvyšší úrovní se nazývá paprsek. Mezním parametrem paprsku je jeho šířka, která je definovaná jako oblast mezi krajními body, kde křivka paprsku dosáhne minima. Šířku paprsku R můžeme vypočítat ze vztahu (28) [13],[14]

$$R = 2 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{c}{Mdf} \right) \quad (28)$$

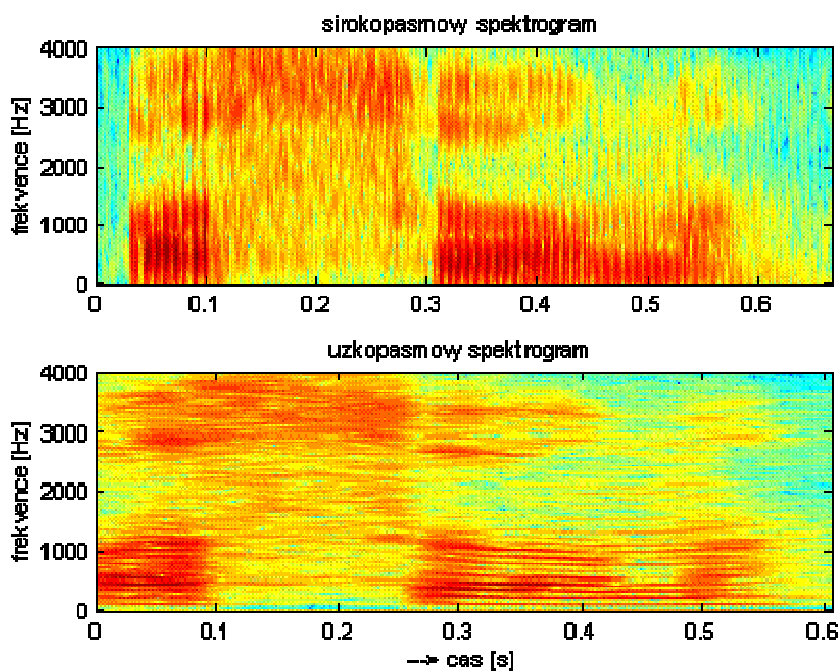
Šířka hlavního paprsku klesá s rostoucím počtem mikrofonů v poli, s rostoucí vzdáleností mikrofonů a s rostoucím kmitočtem přijímaného signálu. Postranní laloky jsou nežádoucí, protože nám do snímaného signálu přidávají šum a nežádoucí rušivé signály v jiných směrech, než je mikrofonní pole natočeno. Při návrhu mikrofonních polí a následném zpracování signálu se snažíme držet úroveň postranních laloků na co nejnižší úrovni, aby signály přicházející z ostatních směrů byly maximálně utlumeny. Vhodnou volbou váhových koeficientů se snažíme dosáhnout toho, aby velikost postranních laloků byla co nejmenší.[4],[12]

4.3 Spektrální odhad vysokého rozlišení

Časová lokalizace frekvenčního spektra nalézá své uplatnění v mnoha aplikacích, ve kterých je nezbytné kromě zjištění jednotlivých frekvenčních složek, nacházejících se ve zkoumaném signálu, také zjistit jejich přítomnost v průběhu času. Spektrogram získáme pomocí DTFT, kapitola 5.4.3.

$$X[k, m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot w[n - mN] \cdot e^{-j \frac{2\pi mk}{M}} \quad (29)$$

Metody založené na spektrálním odhadu vysokého rozlišení jsou schopny lokalizovat více zdrojů signálu i v případě, že jsou zdroje velmi blízko sebe. Metoda pak vykazuje znatelně lepší výsledky než metody založené na tvarování přijímací charakteristiky.



Obr. 21 Ukázka užití spektrogramu pro různé druhy signálu

Tyto metody jsou také méně výpočetně náročné než metody tvarování přijímací charakteristiky. Většina lokalizačních technik založená na odhadu vysokého rozlišení je vyvinuta pouze pro aplikaci na úzkopásmových signálech. Tato metoda nachází nejčastěji uplatnění v radarových a sonarových zařízeních. Další užití je například v systémech na rozpoznání řeči či řešení optimalizačních úkolů. Pokud by tato metoda byla aplikována na širokopásmový signál, její výpočetní nároky se razantně zvýší.[1],[13],[14]

5 POŽADAVKY NA HARDWAROVÉ ZPRACOVÁNÍ ZVUKU

Když se v druhé polovině 19. století podařilo přenést zvukový signál po vedení na větší vzdálenost, pak nastalo období, kdy zájmem vynálezců se stal záznam zvuku. Postupem času se objevily tři zásadní způsoby záznamu zvukového signálu.

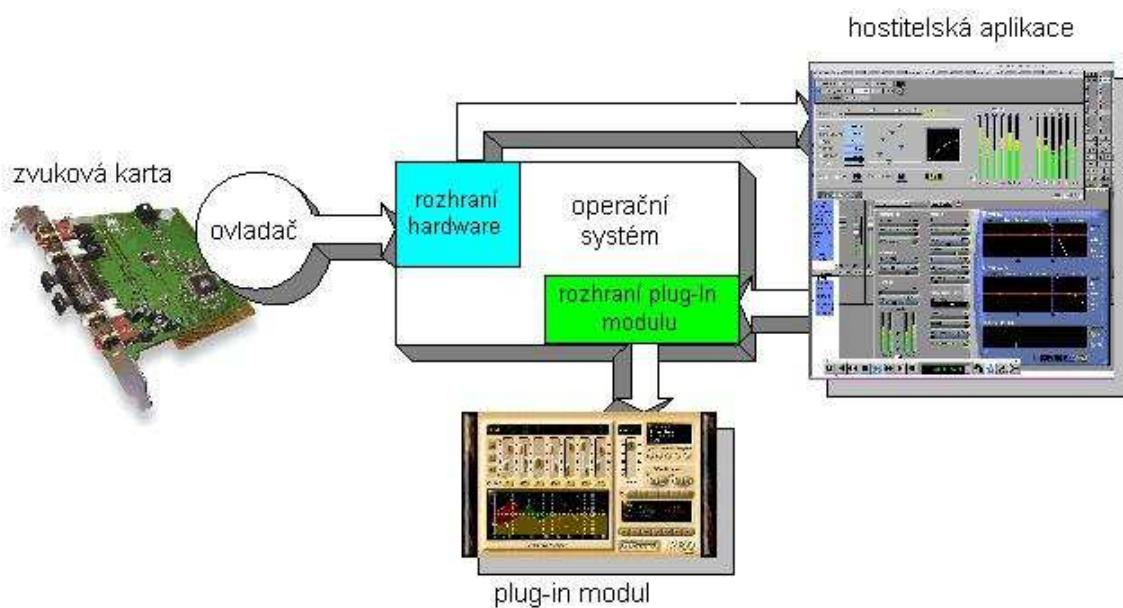
- Mechanický záznam
- Magnetický záznam
- Optickomechanický záznam

Prvním použitelným systémem pro záznam zvuku se stal Edisonův fonograf. Záznam zvukových vln byl mechanicky vryt do drážky, která byla na rotujícím válečku. Hloubka drážky odpovídala okamžité hodnotě akustického tlaku přicházející vlny. Zanedlouho po vynálezu fonografu přišel na trh Berlinerův gramofon, jenž taktéž fungoval na principu mechanického záznamu. Gramofon se nadále vyvíjel, dlouhou dobu byl nejkvalitnějším zdrojem zvukového signálu. Bylo dosaženo frekvenčního rozsahu reprodukce nahrávky $30\text{Hz} - 15\text{kHz}$ při odstupě signálu od šumu $55-60\text{dB}$. Konec „gramofonové éry“ přišel okolo roku 1950, kdy byl nahrazen magnetickým záznamem.[25]

Myšlenka magnetického záznamu zvukového signálu se objevila v 30. letech minulého století. Hlavní výhodou oproti mechanickému záznamu byla snadná možnost oprav záznamu jeho přepsáním. Dlouhou dobu se tento způsob záznamu realizoval jen v profesionálních rozhlasových studiích. Boom nastal v druhé polovině 20. století, kdy se magnetofon více rozšířil mezi lidi. Postupně dosáhla kvalita magnetofonů takové úrovně, že prakticky vytlačila ostatní zařízení.

Postupem času začaly požadavky posluchačů převyšovat možnosti masově šířených nahrávek – ať už na gramofonových deskách, tak i na magnetofonových kazetách. Přišel čas na nové médium. Krátce po roce 1980 přišly firmy Philips a Sony s novým revolučním řešením, které nazvaly CD – Compact Disc. Jedná se o mechanický záznam digitálního zvukového signálu na plastovém kotouči, který je snímán bezdotykově pomocí odrazu laserového paprsku. Na disku je zaznamenán stereofonní digitální zvukový signál, který je

vzorkován frekvencí $44,1\text{kHz}$ a kvantován 16bitovým kvantizérem. Kvalita signálu snímaného z tohoto média je velmi vysoká, odstup signálu od šumu přesahuje 90dB . [25],[26]



Obr. 22 Současné pojetí zpracovávání signálů

V současné době se pro zpracování zvukových signálů používá téměř výhradně digitálních signálových procesorů a osobních počítačů s procesory pro všeobecné použití, včetně tzv. embedded systémů. Plug-in moduly se používají zejména pro realizaci digitálních hudebních efektů upravujících zvukový signál. Lze je ale také použít jako kodéry a dekodéry různých formátů, generátory zvukových signálů nebo pro vizualizaci zvukových signálů. V hardwarových zařízeních, jako jsou digitální mixážní pulty, efektové procesory a mobilní nahrávací zařízení, se používají digitální signálové procesory.[21]

Je třeba si uvědomit, jak dlouho trvalo, než se zpracování zvukových signálů dostalo až k současnému stavu. Kvalita snímaného zvuku předurčuje jeho další využití. Pro potřeby lokalizačních algoritmů bylo třeba využít poznatků získaných v průběhu „záznamové evoluce“. Ty pak předurčily vývoj jednotlivých prvků elektroakustického řetězce, které slouží pro převod na digitální zvukový signál.

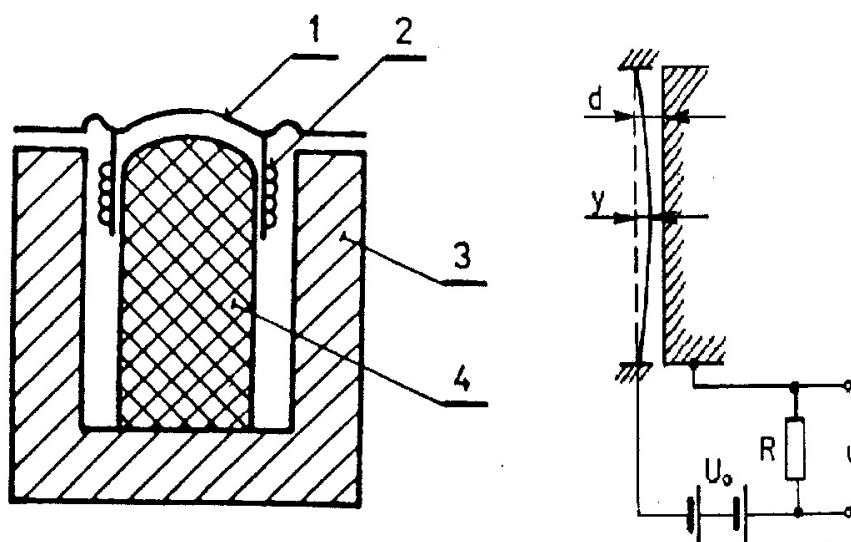
5.1 MIKROFONY

Naprostá většina zvukových signálů vzniká ve své prvotní formě právě prostřednictvím mikrofonu. Mikrofon je zařízení, které slouží k přeměně akustické energie na mechanickou a poté na energii elektrickou. Jedná se tedy o elektroakustický měnič. Přeměna mechanické energie na elektrickou je pak dána typem použitého měniče mikrofonu. Použitý fyzikální princip dává jednotlivým druhům měničů rozdílné vlastnosti, které určují rozsah jeho možného použití. Tyto vlastnosti jsou pak nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje, jakým způsobem bude měřený zvuk zkreslen. Nejzákladnějšími měřitelnými vlastnostmi mikrofonu jsou citlivost, frekvenční a směrová charakteristika. Dále můžeme mikrofony dělit podle akustické veličiny, na kterou mikrofon reaguje nebo podle jejich využití.[12],[27]

5.1.1 Rozdělení podle typu mikrofonu

Jak je již uvedeno v úvodu, zvuková technika prošla za dobu své existence výrazným vývojem. Nejinak tomu bylo i mikrofonů, které se staly nedílnou součástí elektroakustického řetězce. Prvním typem mikrofonu bylo vlastně Bellovo telefonní sluchátko, které pracovalo jako obousměrný elektroakustický měnič. V následujícím přehledu jsou mikrofony rozděleny na základě fyzikálního principu měniče na:

- Uhlíkový mikrofon
- Piezoelektrický mikrofon
- Elektromagnetický mikrofon
- Elektrodynamický mikrofon
- Kondenzátorový mikrofon
- Elektretový mikrofon



Obr. 23 Schéma mikrofonů a, elektrodynamický; b, kondenzátorový [25]

Na obrázku 23. a, je zobrazen elektrodynamický mikrofon, který využívá při své činnosti elektromagnetickou indukci. V magnetickém poli trvalého magnetu (4) se pohybuje vodič spojený s pružnou membránou (1), na kterou dopadá zvukové vlnění. Kmitání membrány se přenáší na vodič (2) a indukuje se v něm časově proměnné napětí shodného časového průběhu, jaký má akustický signál.

Kondenzátorový mikrofon (Obr. 23b) je založen principu změny napětí na kondenzátoru při změně jeho kapacity při konstantním náboji. Membrána tvoří společně s elektrodou kondenzátor, kde při působení akustického tlaku se membrána vychýlí, a tím dochází ke změně kapacity kondenzátoru, což má za následek vznik signálového napětí ΔU . Kondenzátorové mikrofony patří dnes k nejkvalitnějším a nejpoužívanějším. Jejich frekvenční charakteristika je konstantní i pro vysoké frekvence, což je předurčuje širokému použití.

5.1.2 Citlivost mikrofonu

Je poměr efektivní hodnoty výstupního napětí mikrofonu k akustickému tlaku, který vyvolá ve volném akustickém poli při frekvenci $f=1 \text{ kHz}$.

$$\eta = \frac{U}{p} \quad (30)$$

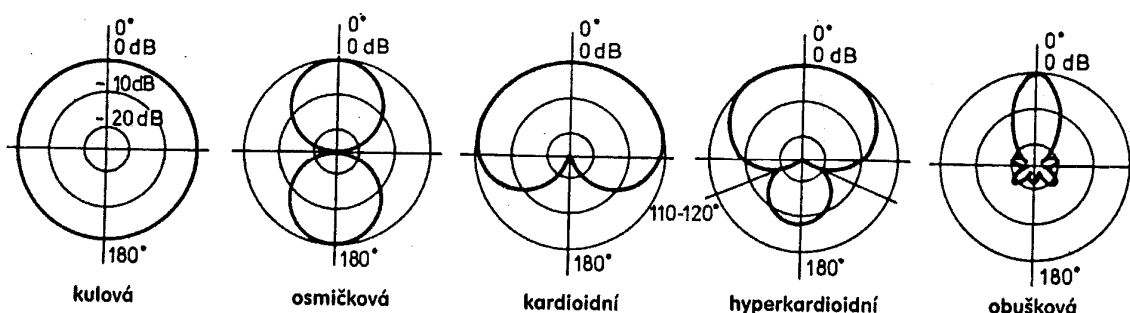
Každý mikrofon má svou mezní hodnotu akustického tlaku. Pokud tento tlak nebude dostatečně veliký, tak mikrofon na výstupu nevybudí žádný signál. Když hodnota akustického tlaku překročí tuto hranici, bude docházet ke zkreslení výstupního napětí. Zkreslení je způsobeno nedokonalou mechanickou tuhostí použitých konstrukčních materiálů. Obvyklé hodnoty citlivosti pro běžné mikrofony jsou uvedeny v tabulce 1. [27]

Typy mikrofonu	Citlivost - η
Elektrodynamické	1-5 mV/Pa
Kondenzátorové	20-50 mV/Pa
Elektretové	1-30 mV/Pa

Tab. 1 Citlivost různých druhů mikrofonu

5.1.3 Směrová charakteristika mikrofonu

Směrová charakteristika je jedním z nejdůležitějších parametrů mikrofonu, má klíčový význam pro použití mikrofonu při snímání různých zdrojů zvuku v různých prostředích. Citlivost mikrofonu závisí na úhlu, který svírá akustická osa mikrofonu s osou akustického zdroje. Akustická osa mikrofonu je u rotačně symetrických mikrofonů většinou totožná s jeho osou geometrickou, u ostatních je určena výrobcem. Tato charakteristika se zpravidla měří ve vodorovné rovině.



Obr. 24 Směrové charakteristiky mikrofonu [25]

Na obrázku 24 jsou zobrazeny diagramy směrových charakteristik mikrofonů. Tyto charakteristiky jsou odlišné pro různé druhy mikrofonů, a proto je třeba pokaždé zvážit, jaký typ se v praxi využije. (Tab. 2)

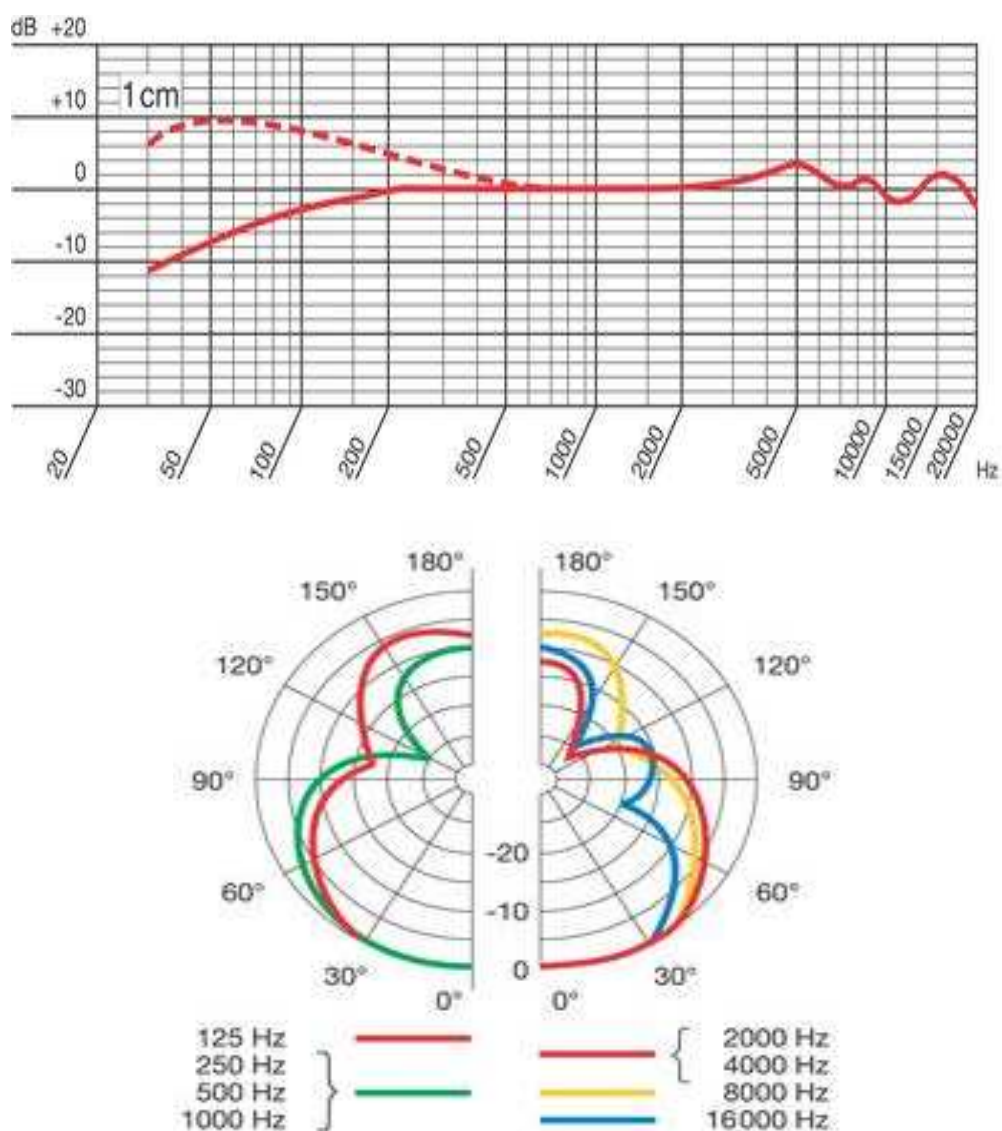
Směrová charakteristika	Typ mikrofonu	Využití mikrofonu
Kulová	Tlakový	Je vhodná pro nahrávání nízkých a středních frekvencí. Pro vysoké frekvence je délka akustické vlny srovnatelná s rozměry mikrofonu, což charakteristiku deformuje.
Osmičková	Rychlostní	V akustické ose jsou dvě stejná maxima citlivosti. Tyto mikrofony je vhodné použít pro stereofonní snímací systémy M-S či v hlasatelně se dvěma hlasateli.
Kardioidní	Tlakovy-rychlostní	Potlačují zvuky přicházející v ose mikrofonu zezadu. Jsou tedy odolnější proti akustické zpětné vazbě. V praxi jsou užívané pro snímání mluveného slova i hudby.

Hyperkardiodní	Tlakovo- rychlostní	Hlavní jejich doménou je potlačení zvuků přicházejících ze stran. Používají se ve specifických podmínkách.
Obušková	Tlakovo- rychlostní	Velmi úzká směrová charakteristika potlačuje všechny zvuky, jež přicházejí z jiného směru, než je osa mikrofonu. To tyto mikrofony předurčuje pro snímání na větší vzdálenost.

Tab. 2 Směrové charakteristiky mikrofonů

5.1.4 Frekvenční charakteristika mikrofonu

Frekvenční charakteristika udává rozsah přenášeného pásma akustických signálů. Jedná se o závislost výstupního napětí mikrofonu na frekvenci (při konstantním akustickém tlaku). Pro kvalitní záznam se požaduje rovnoměrná charakteristika pro interval frekvencí 40-15000 Hz. Její tvar závisí i na vzdálenosti mikrofonu od zdroje. Nerovnoměrnost frekvenční charakteristiky by neměla být v daném pásmu větší než ± 5 dB.[25],[27]

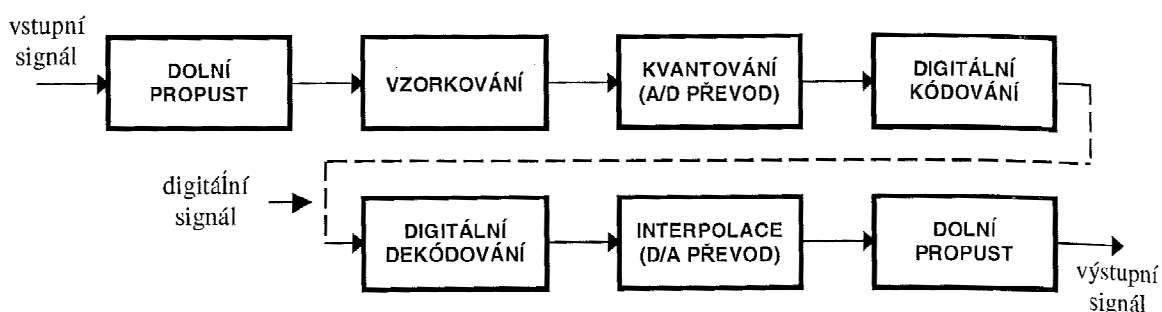


Obr. 25 Frekvenční charakteristika mikrofonu C 1000 S hypercardiod

Příklad průběhu frekvenční charakteristiky je znázorněn na obrázku 25. Stupně u charakteristiky kondenzátorového mikrofonu AKG C1000S udávají, odkud bylo prováděno mikrofonní měření (0° - zepředu, 90° - z boku, 180° - zezadu). [17],[23]

5.2 ZVUKOVÁ KARTA

Zvuková karta je zařízení, které slouží pro zpracování vstupně/výstupního signálu. Převádí analogový vstupní signál na signál digitální a naopak. Pro tento převod využíváme nejčastěji procesu, jenž je naznačen na obrázku 26.[17] V této kapitole si projdeme nejdůležitější bloky digitalizace a zpracování spojitého signálu.



Obr. 26 Blokové schéma AD/DA převodu [25]

Vlastnosti tohoto převodu spojitého signálu na diskrétní jsou dány nastavením AD převodníku, který má zásadní vliv na kvalitu zpracovávaného signálu. Každá zvuková karta má pevně dané počty vstupů/výstupů, které dokáže zpracovávat. Každý tento vstup si můžeme představit jako jeden kanál, pro který zvuková karta provádí časovou diskretizaci. Důležitými vlastnostmi kanálu jsou užitý digitálně-analogový převodník, maximální možná vzorkovací frekvence a poskytovaný odstup signálu od šumu. Nastavení těchto vlastností hraje hlavní roli, která se podepíše na kvalitě digitálního (výstupního) signálu. V současné době zvukové karty užívají nejčastěji 24bitový AD převodník, který umožňuje užit vzorkovací frekvenci až 96 kHz. Odstup signálu od šumu u některých zařízení dosahuje až 114 dB. Bitový tok ze zvukové karty bude tedy roven součtu všech bitových toků jednotlivých vstupních kanálů.

V zásadě rozlišujeme 2 různé typy zvukových karet:

- Interní
- Externí

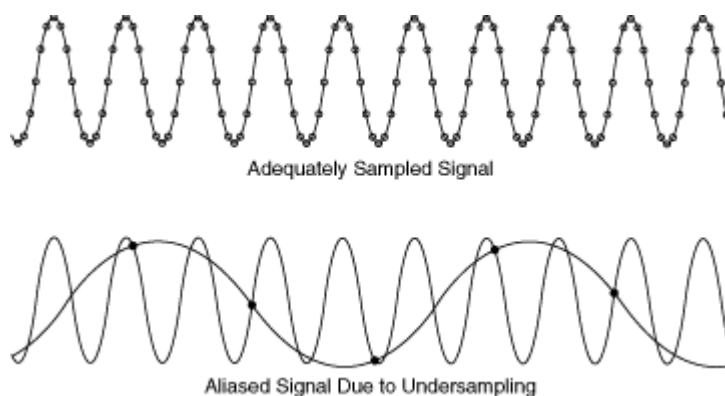
Toto rozdělení je dané dle způsobu připojení zvukové karty k PC. Interní zvukové karty jsou připojeny pomocí rozhraní PCI (*Peripheral Component Interconnect*), které poskytuje prostupnost jedné linky až 500MB/s. Externí zvukové karty bývají nejčastěji připojeny přes vysokorychlostní rozhraní USB či FireWire.[9]

5.2.1 AD PŘEVOD

Kolem roku 1930 přišli nezávisle na sobě C. Shannon a V. A. Kotělnikov s novou myšlenkou. Matematicky prokázali, že k přenosu signálu stačí přenést pouze omezený počet okamžitých hodnot, aniž by došlo ke ztrátě informace. Každá signálová funkce času s omezeným frekvenčním spektrem může být beze ztráty nahrazena posloupností diskrétních vzorků odebíraných s periodou T , nejvýše rovnou polovině převrácené hodnoty nejvyšší frekvence f_{\max} , která je obsažena v původním signálu. Tato podmínka může být popsána vztahem (31)

$$f_{vz} = \frac{1}{T} \geq 2 \cdot f_{\max} \quad (31)$$

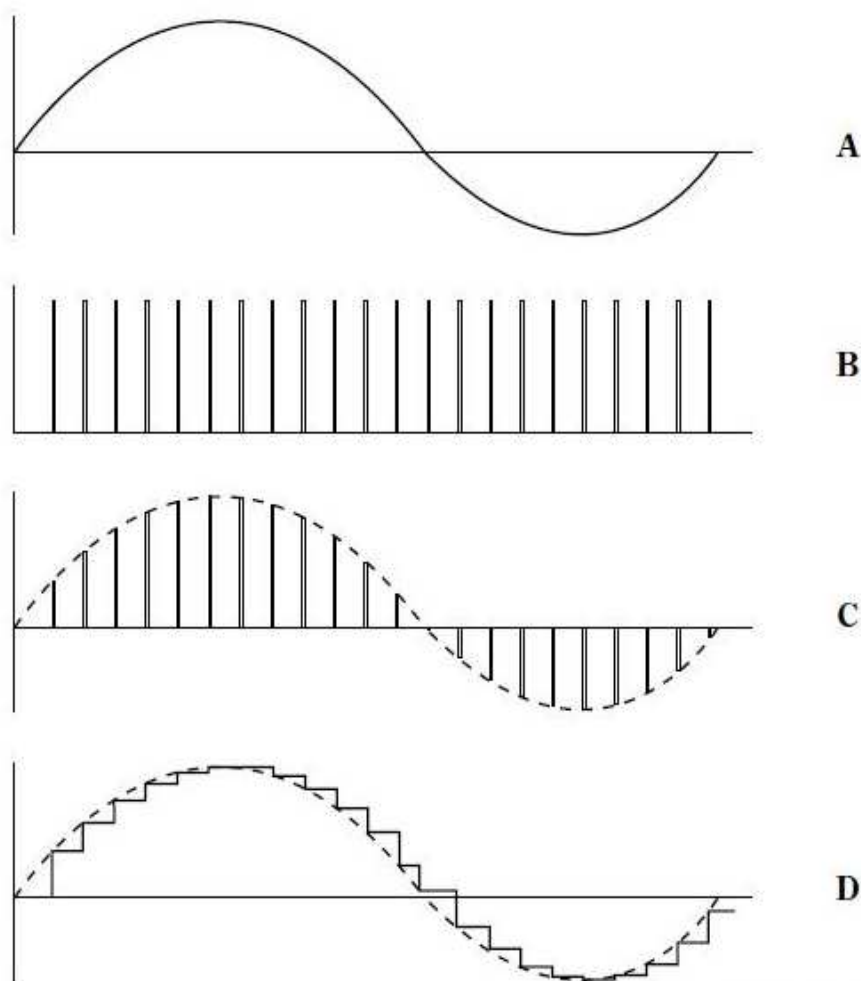
Při nedodržení Nyquistovy podmínky dochází k problému zvanému aliasing. Pokud tedy vzorkovací frekvence f_{vz} není 2x vyšší než nejvyšší frekvence f snímaného signálu, dochází k překrytí frekvenčních spekter vzorkovaného signálu, a tedy ke ztrátě informace. Projevem aliasingu je vznik frekvencí, jež původní analogový signál neobsahoval. Jedná se vlastně o zázněje mezi frekvencemi původního signálu a obrazem těchto frekvencí v dolním postranním pásmu první harmonické frekvence. [17],[27]



Obr. 27 Aliasing při malé vzorkovací frekvenci

Projevy aliasingu mohou zcela znehodnotit signál a vzhledem k jejich spektru, které leží uvnitř pásma užitečného signálu, již nejdou odstranit. V praxi se snažíme těmto problémům vyhnout, proto před vzorkováním zařazujeme filtr typu dolní propust', který signál ořeže o okrajové pásmo.

Signál je funkcí času, jeho obrazem ve frekvenční oblasti je jeho spektrum, které nám říká, jaké všechny frekvence jsou v signálu obsaženy a v jaké úrovni. Souvislost mezi signálem a jeho spektrem je jednoznačně vyjádřena na obrázku 30 (kapitola 5.4) Skutečné vzorkování analogového signálu se provádí pomocí obdélníkových impulsů nenulové šířky a nazýváme jej vzorkování druhého řádu. Toto vzorkování je znázorněno na obrázku 28, b, kdy je vlastně výsledkem konvoluce modulované funkce a Diracova impulsu pro konečný počet vzorků. Minimální počet vzorků je dán z Nyquistovy podmínky (31), kdy při nedodržení dochází k přeložení horní části základního spektra do postranních pásem, a tím i ztrátě informace v signálu. Zkreslení základního spektra je závislé na volbě vzorkovací frekvence, čím je vyšší, tím je zkreslení menší.[25]



Obr. 28 Diskretizace spojitého signálu

Vzorkovaný analogový signál již má omezený počet vzorků v časové oblasti. Jejich amplitudy obsahují nekonečné množství hodnot. Tento signál nejsme schopni převést na digitální, protože je „nekonečně vysoký“. Zařízení, které přiřazuje jednotlivé úrovně obdélníkovým impulsům, nazýváme kvantizér. Každému vzorku signálu je přiřazena právě jedna z vybraných kvantizačních úrovní. Při počtu kvantizačních úrovní s , bude odstup signálu od šumu dán vztahem (32) [25],[26]

$$\frac{S}{N} = 20 \log s + 1,8 \quad (32)$$

Kvantizační šum je závislý na amplitudě vzorku. Pro velmi malé amplitudy se začíná tento šum měnit na harmonické zkreslení. Pokud je amplituda vzorku v blízkosti kvantizační úrovně, signál se stává schodovým s obsahem vyšších harmonických frekvencí. Tento problém by nás tížil hlavně v případě zpětného převodu digitálního signálu na analogový. Pro odstranění tohoto zkreslení se vkládá do signálové cesty za DA převod dolní propust'. Tento blok signál vyhladí, ovšem nikdy jej nebude moci rekonstruovat do původní podoby. Další možností korekce tohoto zkreslení je přiřazení většího počtu kvantizačních úrovní, které bude mít za důsledek odpovídající zvýšení bitového toku. Posledním užívaným způsobem je nelineární kvantování. Rozhodovací hladiny jsou umístěny v rozdílných vzdálenostech, čímž se zaručí, že pro některé amplitudy může být provedeno přesnější kvantování. Jedná se vlastně o jistý druh komprese signálu. Tomuto faktu musí být přizpůsoben zpětný DA převod.[25]

Kódování je posledním krokem vzniku digitálního signálu. Podstatou tohoto procesu je přiřazení vhodného čísla jednotlivým kvantizačním hladinám. Z praktických důvodů je pro kódování používána binární soustava. Důvodů pro její použití je hned několik:

- snadné rozlišení i při značném zkreslení digitálního signálu
- snadná obnova do původního tvaru

Odstup signálu od šumu ve zpětně převedeném analogovém signálu můžeme vyjádřit pomocí vztahu (33). [25],[26]

$$\frac{S}{N} = 20 \cdot \log 2^b + 1,8 = 6b + 1,8 \quad (33)$$

5.3 MATLAB





MATLAB (Matrix Laboratory) je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, paralelní výpočty, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. MATLAB vytvořil na konci 70. let minulého století prof. Cleve Moller. Navrhl jej z důvodu, aby jeho studenti mohli využívat tento software pro výpočty numerické lineární algebry. Tehdejší programovací jazyky byly nesourodé, a to přinášelo mnoho nástrah při řešení matematických výpočtů. V roce 1983 zakládá Moller společně se svými kolegy ze Stanfordské univerzity firmu MathWorks a překládá MATLAB do jazyka C. V roce 1984 se MATLAB poprvé objevuje na trhu. Další významný milník přichází v roce 2000, kdy přichází obnova knihoven pro výpočty matic, spravování obrázků a zvukových signálů.

Nepostradatelnou částí MATLABU je také prostředí Simulink, které slouží k modelování, simulování a analyzování dynamických systémů. Využívá algoritmy MATLABu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic.

V současné době je tento program používán ve více než 100 vědních oborech a jeho výpočty se staly nenahraditelnými v řešení složitých matematických problémů.[24]

5.4 FOURIEROVA TRANSFORMACE

Fourierova analýza je pojmenována podle francouzského matematika Jeana Baptista Josepha Fouriera. Vychází z předpokladu, že každý nasnímaný signál je možno reprezentovat nejen v jeho časové oblasti, ale také v oblasti frekvenční pomocí Fourierovy transformace (FT).[1],[9]

Typ transformace	Příklad signálu
Fourierova Transformace (spojitý neperiodický signál)	
Fourierova Řada (spojitý periodický signál)	
Diskrétní Časová Fourierova Transformace (nespojité neperiodický signál)	
Diskrétní Fourierova Transformace (nespojité periodický signál)	

Obr. 29 Druhy Fourierovy transformace

Z matematického pohledu je to operace, která provádí transformaci funkce v časové oblasti na funkci ve frekvenční oblasti. Fourierova transformace vychází z předpokladu, že každý signál lze vyjádřit jako superpozici nekonečně mnoha harmonických signálů. Výsledkem Fourierovy transformace jsou Fourierovy koeficienty, které vyjadřují, jak daný harmonický průběh přispívá k celkovému signálu. [1],[3],[11]

Je nutné si uvědomit, že Fourierova transformace slouží jak pro řešení diskrétních, tak i spojitých signálů. Základní rozdělení je zobrazeno na obrázku 29, spojitě i diskrétní signály tedy můžeme dále rozdělit na periodické a aperiodické.

5.4.1 Fourierova transformace ve spojité oblasti

K popsání periodických spojitých signálů nám slouží Fourierovy řady, které je možné použít pro zápis jakéhokoli periodického signálu pomocí goniometrických funkcí sin a cos. Fourierovu řadu můžeme popsat pomocí Eulerova vztahu (34), který je definován na intervalu $-L \leq x \leq L$

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \cdot e^{j \frac{n\pi x}{L}} \quad (34)$$

Pro popis spojitého aperiodického signálu je Fourierova transformace $X(j\omega)$ funkce $x(t)$ definována integrálním vztahem (35), který existuje jen, pokud je funkce $x(t)$ absolutně integrovatelná

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (35)$$

Zpětná Fourierova transformace bude tedy definována jako transformace originální funkce $x(t)$ z jejího obrazu $X(j\omega)$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) \cdot e^{j\omega t} dt \quad (36)$$

5.4.2 Diskrétní Fourierova transformace

V případě počítačového zpracování signálů máme k dispozici vždy jen vzorky z funkce $f(t)$ v diskrétních časových okamžicích. Diskrétní Fourierova transformace (DFT) je metoda, která dokáže pracovat pouze se signály o konečné délce. Předpokládejme tedy, že vstupní signál bude tvořit konečnou komplexní posloupnost $x[n]$ o N prvcích. (x_0, \dots, x_{n-1}) . Potom budeme moci zapsat každé x_i dle vztahu (37)

$$x_i = x_{RE} + j x_{IM} \quad (37)$$

Zavedením DFT dostaneme vztah (38). Jde tedy o formální nahrazení integrálu, integrálním součtem s dělením odpovídajícím periodě vzorkování

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{\frac{-j2\pi nk}{N}} \quad (38), \text{ pro všechna } k = 0, 1, \dots, N-1$$

A pak zpětná DFT bude definována

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (39), \text{ pro všechna } n = 0, 1, \dots, N-1$$

Z jednotlivých hodnot složek x_{RE} a x_{IM} můžeme pak určit okamžitou hodnotu amplitudy a fázi daného vzorku $X[k]$, ty jsou pak dány vztahem (40)

$$\begin{aligned} Mag_X[k] &= \sqrt{(\text{Re}_X(k))^2 + (\text{IM}_X(k))^2} \\ Pha_X[k] &= \arctan\left(\frac{\text{IM}_X(k)}{\text{RE}_X(k)}\right) \end{aligned} \quad (40)$$

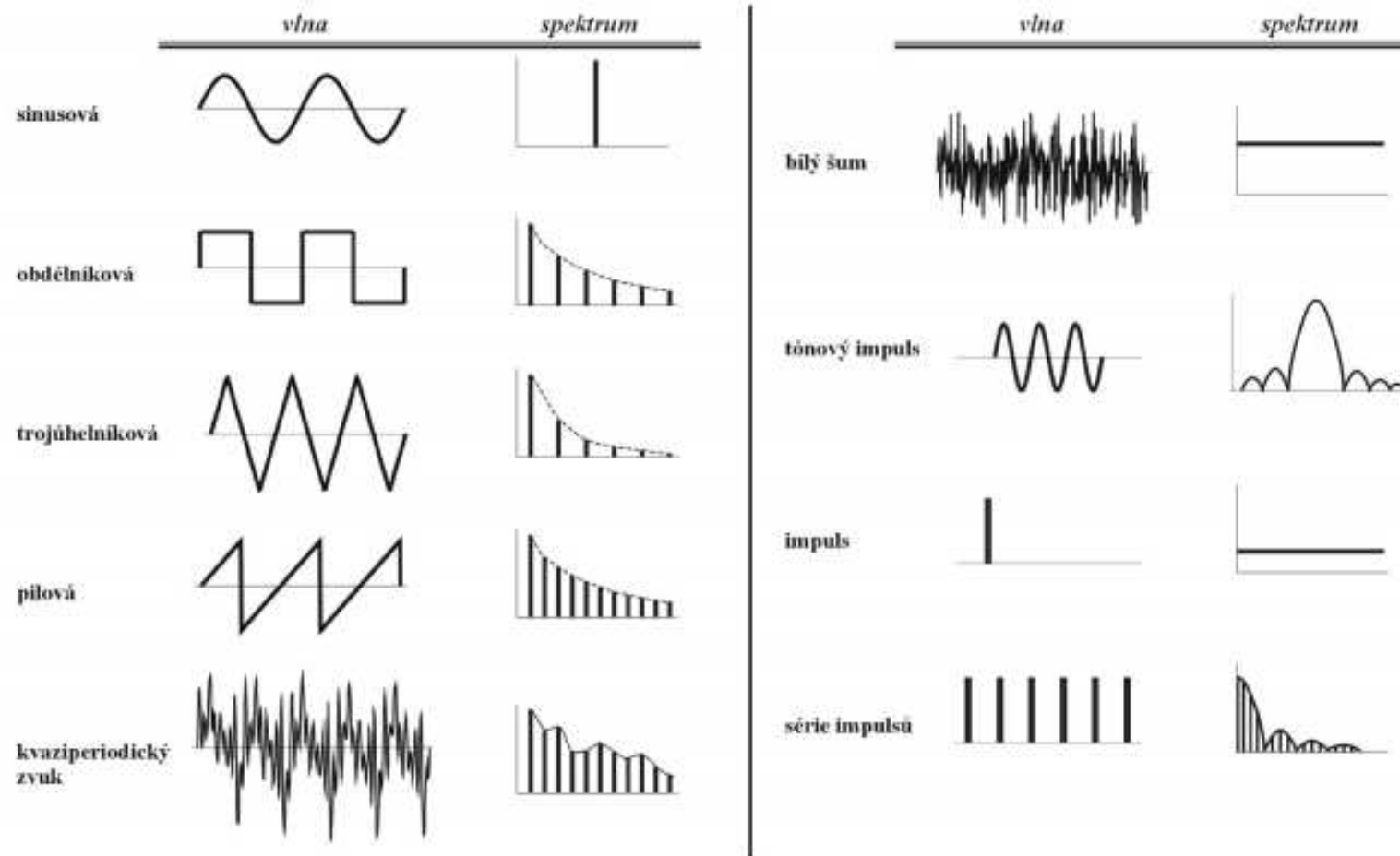
5.4.3 Krátkodobá Fourierova transformace v čase

Běžná frekvenční analýza signálu pomocí Fourierovy transformace nám poskytuje informace o frekvenčních složkách, které se nacházejí v signálu bez jejich časové lokalizace. V případě, že vznikne potřeba časové lokalizace spektra, je potřebné použít krátkodobou Fourierovu transformaci. Ta vychází z předpokladu, že se signál rozdělí na mikrosegmenty. Za předpokladu, že segment bude nekonečně krátký, tak jej můžeme popsat jako periodický signál. Tím vzniká chyba, která může být částečně kompenzována použitím okénka, což je posloupnost vah pro jednotlivé vzorky v mikrosegmentu, je daná vztahem (41) [1]

$$X(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (41)$$

Váhovací okno $w(t - \tau)$ potlačuje hodnoty signálu vně své délky; získáváme tedy lokální spektra pro jednotlivé hodnoty τ . Pro diskrétní čas a diskrétní frekvence je krátkodobé diskrétní frekvenční spektrum dáno vztahem (42) [11],[12]

$$X[k, m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot w[n - mN] \cdot e^{-j \frac{2\pi k n}{M}} \quad (42)$$



Obr. 30 Výpočet spektra pro různé druhy signálu [9]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 ZHODNOCENÍ METOD LOKALIZACE ZDROJE ZVUKU

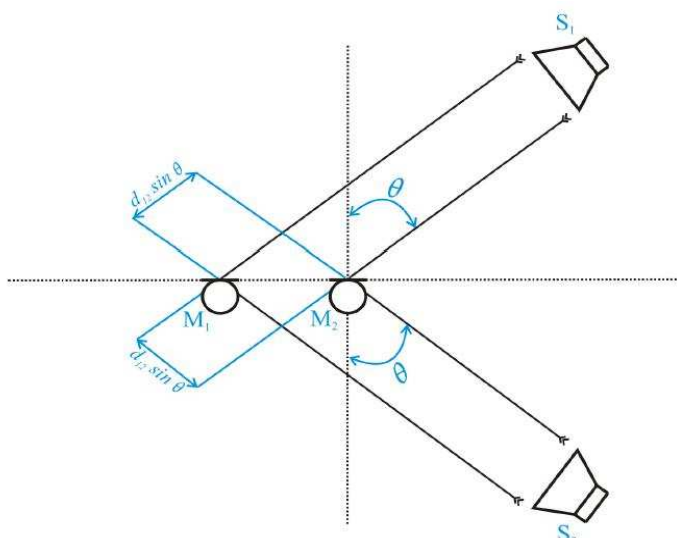
Pro konstrukci mikrofonního pole s M mikrofony byl implementován algoritmus (`SynthesizeArray.m`), který modeluje rovinné pole v prostředí MATLAB. Jeho výhodou je možnost simulace libovolného množství mikrofónů vzdálených o konstantní rozdíl d . Výhodou tohoto řešení je, že na tomto poli můžeme porovnat různé lokalizační algoritmy.

```
function A=SynthesizeArray(filename, Angle)
% This function synthesises microphone array recordings for a single sound
% source at direction Angle.
% Angle should be between 0 and 180 in degrees.

spacing=0.11; %Inter-microphone spacing in meters.
N=15; % number of microphones in the array
c=344; % Speed of sound
fs=44100; % Sampling frequency
delay=spacing.*cos(Angle.*pi/180).*[0:N-1]./c;
S=wavread(filename);
delay=delay-min(delay);
for i=1:N
    Ad=delayt(S,fs,delay(i));
    A(:,i)=Ad(1:length(S));
end
A=A';
```

Obr. 31 Vytvoření rovinného mikrofonního pole v prostředí MATLAB

Nevýhodou lineárního rovinného pole je tzv. předozadní nejednoznačnost pole (Obr. 32), kdy pro dopad zvukového signálu mohou být uvažovány dva zdroje zvuku umístěné souměrně podle osy mikrofonního pole. V tomto případě jsou časová zpoždění dopadajícího signálu i vzdálenosti, které urazí signál ke vzdálenějšímu mikrofónu stejné. Z toho vyplývá, že u lineárního rozložení mikrofónů velmi závisí na směru snímání.[14]



Obr. 32 Předozadní nejednoznačnost pole

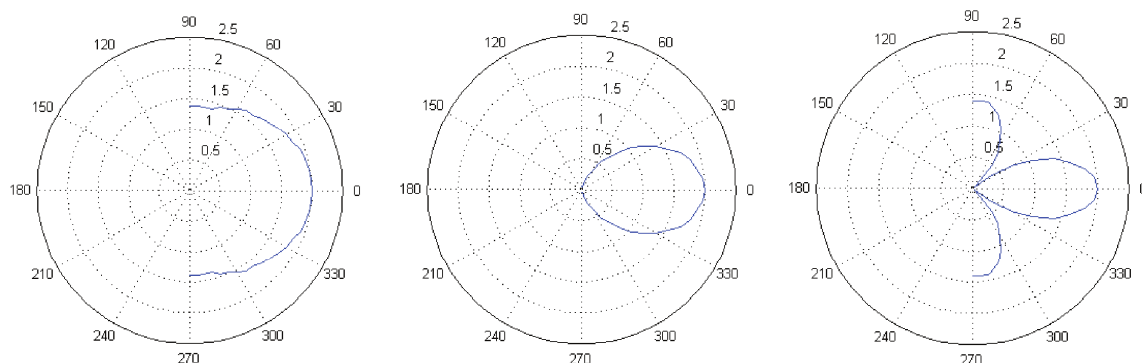
6.1 METODA ODHADU ČASOVÉHO ZPOŽDĚNÍ

Metoda odhadu časových zpoždění je jednou z nejjednodušších možných algoritmů pro určení zdroje zvuku. Klíčovým faktem pro přesnost lokalizace zůstává vhodné nastavení parametrů mikrofonního pole. Musíme uvažovat, jaký zvukový signál budeme pomocí tohoto pole lokalizovat. Ze vztahu (43) můžeme jednoduše vyjádřit, pro jakou maximální frekvenci bude mít pole lokalizační schopnost.

$$\lambda_{\min} \Rightarrow f_{\max} = \frac{c}{2d} \quad (43)$$

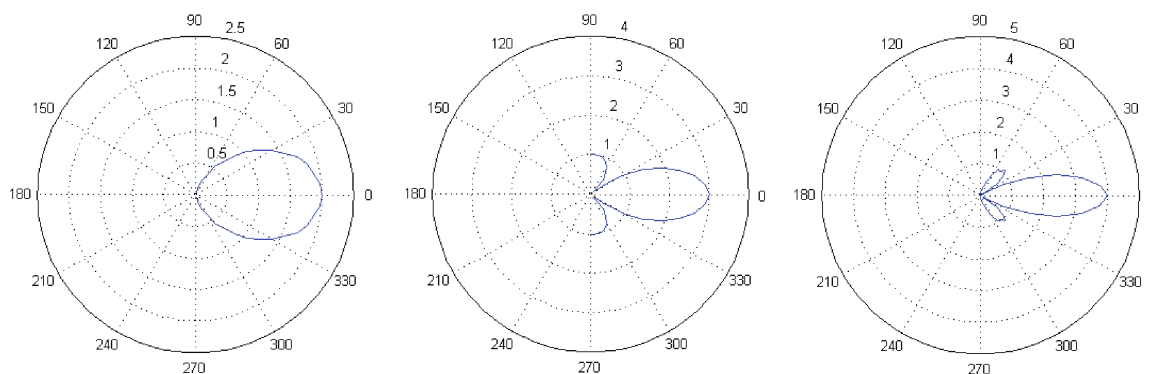
Vzdálenost mikrofonů d [cm]	Maximální frekvence příchozího signálu f_{\max} [Hz]	Délka vlny λ_{\min} [m]
5	3430	0,1
10	1715	0,2
15	1143	0,3

Tab. 3 Výpočet lokalizační schopnosti pro různá mikrofonní pole



Obr. 33 Směrová charakteristika pro mikrofonní pole, pro rozdílné d ; a, $d=5\text{cm}$, b, $d=10\text{cm}$, c, $d=15\text{cm}$

Na obrázku 33 jsou zobrazeny směrové charakteristiky mikrofónů pro hodnoty uvedené v tabulce 3. Pro jednoduchost byly tyto charakteristiky vytvořeny pro signál o $f=1500\text{Hz}$, který dopadal na jeden pár mikrofónů. Ze simulovaných přijímacích charakteristik můžeme usoudit, že ideální průběh má charakteristika modelu, jehož maximální frekvence, kterou zpracovává, odpovídá frekvenci zdroje signálu. Mikrofonní pole bývají většinou složena z většího počtu mikrofonních jednotek, takže je potřeba uvažovat vliv počtu mikrofónů na výslednou směrovou charakteristiku pole. Z tohoto důvodu jsem pro konstantní vzdálenost $d=10\text{cm}$ simuloval mikrofonní pole o 2, 3 a 4 mikrofonech. Směrová charakteristika pro tato pole je zobrazena na (obr. 34).



Obr. 34 Směrová charakteristika pro mikrofonní pole, rozdílné M , a, $M=2$, b, $M=3$, c, $M=4$

6.1.1 Vyhodnocení výsledků

Výsledky znázorněné v tomto experimentu mají především demonstrativní účel. Slouží pro znázornění zákonitostí, které určují závislost přesnosti měření na vstupních parametrech mikrofonního pole. Systém, který pracuje na principu vyhodnocování rozdílů časových zpoždění dopadající zvukové vlny, dokazuje, že přesnost lokalizace je jednoznačně dána volbou vzdálenosti mikrofonních jednotek a zvolenou vzorkovací frekvencí snímaného signálu. Pro zvýšení přesnosti jsou dvě možnosti:

- zvětšení vzdálenosti mikrofonních jednotek
- zvýšení vzorkovací frekvence

Zvětšení vzdálenosti d se jeví jako správná volba řešení problému, nicméně i tato metoda má svá úskalí. V případě, že budou mikrofony až moc vzdálené, dojde k situaci, kdy systém bude mít problém s vyhodnocováním vzájemné korelace. Tomuto problému je možné zabránit zvýšením počtu mikrofonů. Změna vzorkovací frekvence má za následek zpřesnění lokalizace. V případě, že máme jen velice malé pole o délce l

$$l = d \cdot (M - 1) \quad (44)$$

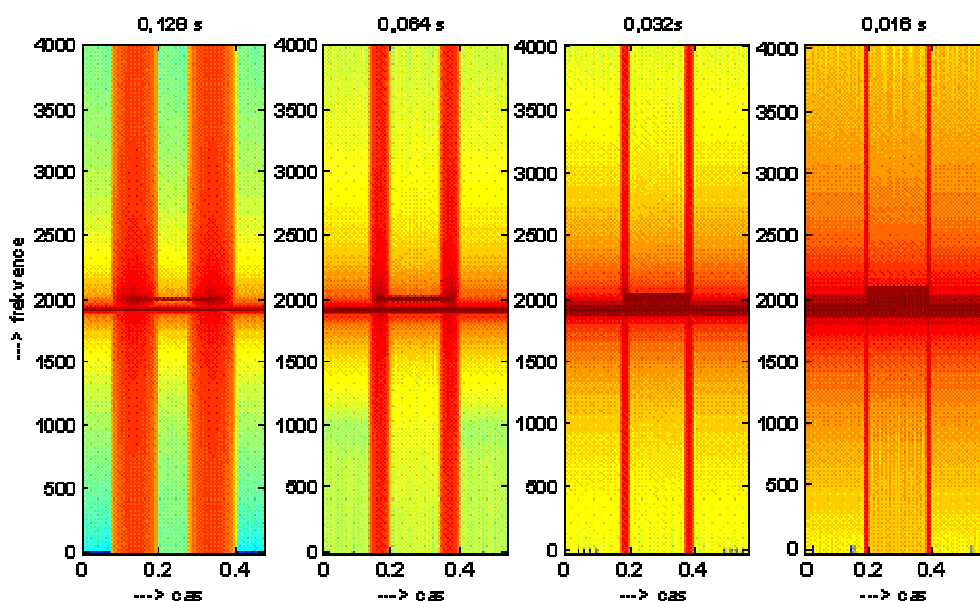
můžeme zvýšit rozpoznávací schopnost tohoto pole převzorkováním původní snímací frekvence. Touto metodou sice nezískáme žádné nové informace ze vstupního signálu, ale zlepšíme tím podmínky pro výpočet korelační analýzy, která pak dokáže přesněji určit časové zpoždění mezi dvojicí mikrofonů. Nevýhodou tohoto postupu je dost výrazné zvýšení úrovně šumů.

Mikrofonní pole založené na metodě odhadu časového zpoždění je velmi efektivní metodou, protože vypočítává přímo směr příchozího signálu. Díky své malé výpočetní náročnosti a možnosti aplikace přímo na širokopásmové signály se TDOA používá ve většině aplikací pro digitální zpracování akustického signálu. Tato metoda umožňuje lokalizaci i více akustických zdrojů. V těchto případech nastává problém, že se ve

vzájemné korelační funkci vyskytne více maxim, a je obtížné určit, které maximum patří jakému zdroji.

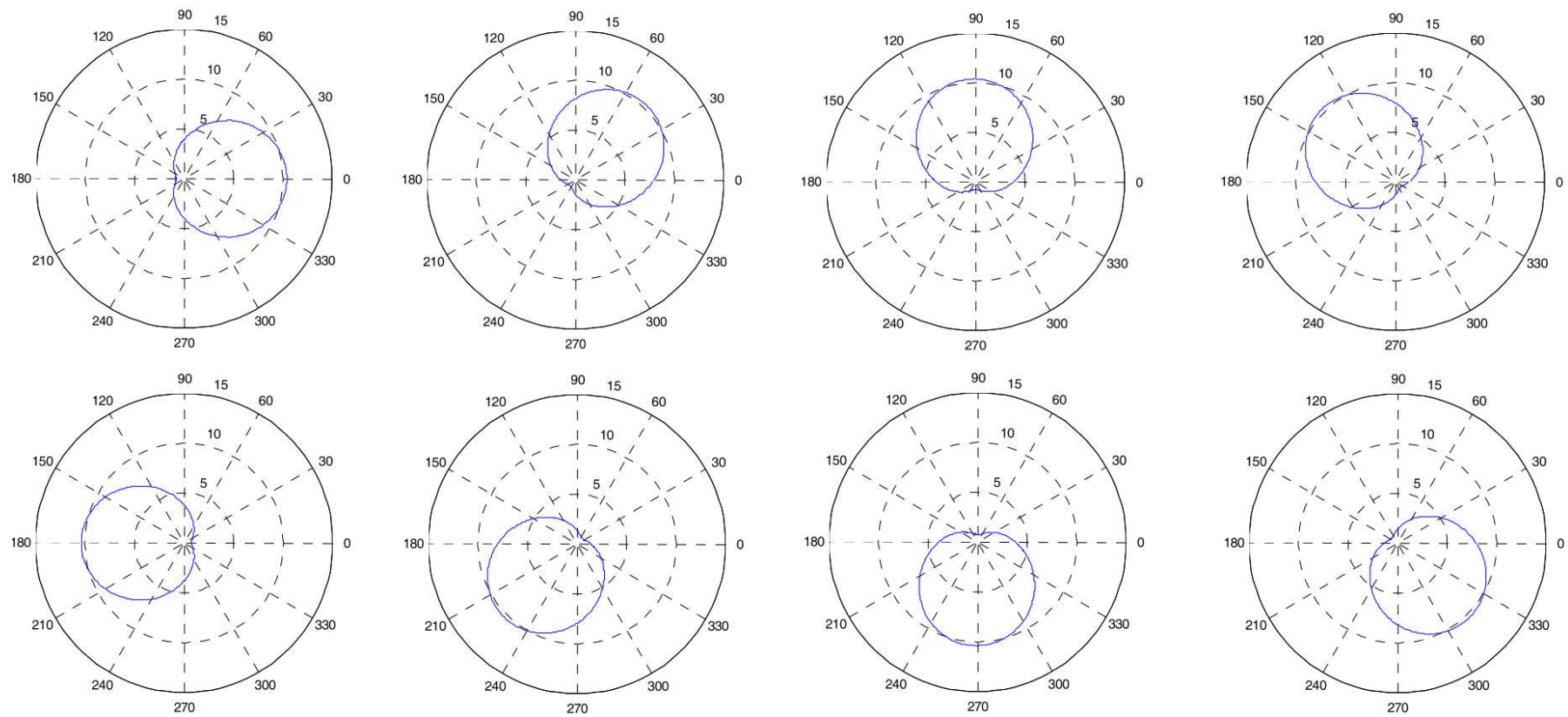
6.2 METODY ZALOŽENÉ NA BEAMFORMINGU

Lokalizační systém vyhodnocující polohu zdroje zvukového signálu na bázi beamformingu používá po hardwarové stránce stejnou vyhodnocovací jednotku jako lokalizátor vyhodnocující metodu časových zpoždění TDOA. Hlavní rozdíl spočívá ve vyhodnocování přichozího zvukového signálu. V rámci beamformingu je tento signál úzkopásmový. Pole musí být pevně danou geometrickou strukturou, kterou nelze změnit. Metoda beamformingu není schopna analyzovat absolutní hodnoty úrovně akustického tlaku měřených zdrojů.



Obr. 35 Spektrální rozlišení tvarovače typu DAS

Výsledné mapy tedy reprezentují jen relativní poměry akustické energie. Při použití víceúrovňového hledání DOA pomocí fázového posuvu se používají komplexní váhy w_i . Tvarovač typu DAS je vysoce závislý na spektrálním obsahu zdrojového signálu. Významná přítomnost ozvěny, šumu a zdroje signálu jsou vysoce korelovány, což způsobuje neproveditelnost přesného odhadu DOA.



Obr. 36 Směrové charakteristiky při simulaci Beamformingu

6.2.1 Zhodnocení výsledků

Z výsledků získaných simulací lokalizačního systému je patrné, že přesnost lokalizace ve srovnání s metodou TDOA na mikrofonním poli není příliš dobrá. Přesnost je dána nastavením váhovací funkce beamformeru, která nám určuje, s jakým rozlišením se bude provádět nastavení azimitu směrové charakteristiky pole při vyhledávání zdroje zvuku. Pro simulaci bylo použito nastavení o $\pi/4$. Lokalizační algoritmus funguje naprosto v pořádku a příčiny neúčinnosti přesného vyhledávání hledáme v subsystému snímacího mikrofonního pole. Pro uspokojivější vyhledávání této metody (beamformingu) je potřeba využít úzkopásmovější vyhledávání, kterému budou přizpůsobeny vlastnosti mikrofonního pole a váhování.

Vlastnosti DAS plynou z jeho jednoduché struktury. Výhoda tohoto typu tvarovače spočívá v nezávislosti jeho parametrů na pracovních podmínkách a především na typu vstupního signálu. Nevýhodou je malé zvýraznění užitečného signálu, které je úměrné počtu mikrofonů.

7 PŘÍPRAVA LABORATORNÍ ÚLOHY

Po konzultacích s vyučujícími panem doc. Ing. Markem Kubalčíkem, Ph.D. a panem Ing. Petrem Dostálkem, Ph.D. jsem se rozhodl pro rozložení této laboratorní úlohy do 2 částí. První z nich je domácí příprava, kdy student na základě samostudia vypracuje seminární práci v rozsahu 5-7 stran. V této práci se student seznámí se základními lokalizačními technikami odhadu časového zpoždění, tvarování přijímací charakteristiky a jinými metodami postavených na bázi beamformingu. Seminární práce bude odevzdána nejpozději v den měření! Druhou částí je samotné měření laboratorní úlohy viz kapitola 8.4.

7.1 TEORETICKÝ RÁMEC

Doporučená literatura:

- [1] DOSTÁLEK, P. Embedded systém pro lokalizaci zdroje zvuku. Zlín, 2009. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav automatizace a řídicí techniky. Vedoucí práce prof. V. Vašek.
- [2] EVEREST, F. The master handbook of acoustics. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001, xix, 615 s. ISBN 00-713-6097-2.
- [3] KURC, David. Identifikace zdrojů hluku pomocí Beamformingu. BRNO, 2011. Diplomová práce. VUT Brno.
- [4] BENESTY, Jacob, J CHEN a Yiteng HUANG. Microphone array signal processing. Berlin: Springer, c2008, 240 s. ISBN 978-354-0786-122.
- [5] BRANDSTEIN, Michael a Darren WARD. Microphone arrays: signal processing techniques and applications. New York: Springer, c2001, 398 s. Digital signal processing (Springer-Verlag). ISBN 35-404-1953-5.

7.2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

Vyvinutý zvukový lokalizační systém je složen ze tří základních komponentů: mikrofonního pole s geometrickou konfigurací danou příslušnou metodou vyhodnocování, 16 kanálové zvukové karty a vyhodnocovacího aparátu – např. prostředí MATLAB.

7.3 PRACOVNÍ POSTUP

Pozorně prostudujte všechny soubory typu (.m file), které jsou přiložené k této laboratorní úloze. Je třeba se v nich orientovat, protože v měření je nutné kombinovat jejich vstupy a výstupy. Svou pozornost soustřeďte na soubory (`Writingafile.m`, `Readingafile.m`), které slouží pro načtení zvukového signálu. Pomocí (`SynthesizeArray.m`) vytvořte mikrofonní pole. Výstup tohoto pole dále využijte pro metodu odhadu časových zpoždění. (`Beamforming.m`, `BeamformingbasedLocaliser.m`, `Null_beamform.m`). Tuto metodu také využijte pro více zdrojů zvuku, které získáte konvolucí dvou signálů o stejném počtu vzorků. Využijte pro ně metody (`MUSICbasedLocaliser.m`, `myoctaveband.m`). Připojte do knihovny MATLABU soubory (`playrec.dll` a `playrec.mexmaci`). Ty slouží pro online zpracování vstupních dat MATLABU. Využijte naprogramovaných algoritmů pro zpracování reálných vstupních dat.

7.4 ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

Cílem této laboratorní úlohy je seznámení se s lokalizačními algoritmy, osvojení si základních technik lokalizace zvuku v prostředí MATLAB.

- a) Z dostupných prostředků sestavte měřicí aparaturu, včetně připojení osciloskopu k PC pro zápis naměřených hodnot do textového souboru pro potřeby dalšího zpracování naměřených signálů.

-
- b) Pomocí nastavení jednotlivých vstupních parametrů (vzorkovací frekvence f_{vz} , počet mikrofonů N , vzdálenosti mikrofonů d , úhel natočení pole α , azimut ϕ) ověřte funkčnost lokalizačních algoritmů.
- c) Dosažené výsledky graficky zobrazte.
- d) Připravte si prezentaci na cca 5 minut, kde pohovoříte o dané úloze a Vámi dosažených výsledcích.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce přináší shrnutí poznatků o vlastnostech a funkcích lokalizačních algoritmů. V teoretické části jsou zmíněny poznatky o šíření zvukových signálů, jež mají zásadní vliv v mnoha vědních oborech. Je potřeba si uvědomit širší souvislost mezi jednotlivými vztahy popisujícími zvukový signál.

V praktické části práce jsou ověřeny teoretické předpoklady na algoritmech TDOA a Beamformingu naprogramovaných v prostředí MATLAB. Příjímací charakteristika lokalizace akustického zdroje potvrdila předpoklad, že příjem mikrofonního pole je na nízkých kmitočtech všesměrový a jeho směrovost se zlepšuje se vzrůstajícím kmitočtem. Dále byl ověřen fakt, že intenzita zvuku klesá se zvyšující se vzdáleností od zdroje a že na lokalizaci má vliv i kmitočtová charakteristika použité reproduktorové soustavy.

Lokalizační algoritmy nacházejí širokou paletu využití. Je potřeba se s nimi správně naučit pracovat, nastavovat jejich parametry za účelem zlepšení jejich rozpoznávacích schopností. Proto byla také připravena laboratorní úloha, která může nalézt uplatnění ve výuce některých odborných předmětů. Vypracováním laboratorní úlohy získá student cenné poznatky, které může použít v dalším studiu, případně je aplikovat do jiných vědních oborů.

CONCLUSION

This work summarizes pieces of knowledge concerning features and functions of localisation algorithms. The theoretical part talks about the knowledge of sound signal propagation, that influences many science branches. A wider connection among particular terms describing acoustic signals shall be appreciated.

The practical part validates theoretical pre-requisites using TDOA and Beamforming algorithms programmed in the MATLAB environment. Reception characteristics of the acoustic source localisation confirmed that the microphone reception field is omnidirectional at low frequencies and the directivity improves as the frequency increases. Also, the effect was verified that the sound intensity decreases with the distance from the source and the localisation is influenced by the frequency characteristics of the loudspeakers used.

Localisation algorithms have a wide range of use. To improve their recognition possibilities there is a need to learn to handle these algorithms correctly and to set their parameters. Hence the laboratory experiment was prepared to be used in some areas of vocational education. By elaborating this experiment the students get valuable knowledge they can use in the following study or apply in other disciplines.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DOSTÁLEK, P. *Embedded systém pro lokalizaci zdroje zvuku*. Zlín, 2009. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, FAI, Ústav automatizace a řídicí techniky. Vedoucí práce Prof. V.Vašek
- [2] EKSLER, V. *Prostorová lokalizace a separace naslepo zdrojů akustických signálů polem mikrofonů*. Brno, 2006. 98 s. Doktorská disertační práce, VUT Brno. Vedoucí Prof. Z. Smékal.
- [3] TKADLEC, J. *Lokalizace vzdáleného zdroje zvuku*, Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, PhD.
- [4] KURC, D. *IDENTIFIKACE ZDROJU HLUKU POMOCÍ BEAMFORMINGU*. BRNO, 2011. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT BRNO
- [5] BENESTY, J. *Microphone array signal processing*. Berlin: Springer, c2008, 240 s. ISBN 978-354-0786-122.
- [6] BRANDSTEIN, M. *Microphone arrays: signal processing techniques and applications*. New York: Springer, c2001, 398 s. Digital signal processing (Springer-Verlag). ISBN 35-404-1953-5.
- [7] BEH, Jounghoon a Taekjin LEE. Sound Source Separation by Using Matched Beamforming and. *IEEE/RSJ International Conference* [online]. 2010(6) [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: <http://www.umiacs.umd.edu/~jhbeh/05652512.pdf>
- [8] HALD, J. *Combined NAH and Beamforming Using the Same Microphone Array*. *SOUND AND VIBRATION* [online]. 2004(25) [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: <http://www.sandv.com/downloads/0412hald.pdf>
- [9] EVEREST, F. *The master handbook of acoustics*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001, xix, 615 s. ISBN 00-713-6097-2.
- [10] NOVOTNÝ, O. *Psychoakustická měření binaurálních vlastností lidského sluchu*. BRNO, 2010. Diplomová práce. VUT BRNO. Vedoucí práce Ing. JIRÍ SCHIMMEL, Ph.D.

- [11] KOMRSKA, J. *Fourierovské metody v teorii difrakce a ve strukturní analýze: přednášky pro 3. ročník oboru "Fyzikální inženýrství" a 4. ročník oboru "Přesná mechanika a optika" na Fakultě strojního inženýrství VUT Brno* [online]. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 242 s.[cit. 2012-05-27]. ISBN 978-80-214-3532-2.
- [12] BARTOŇ, Z. *Tvarování přijímací charakteristiky mikrofonních polí*. BRNO, 2010. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. IVAN MÍČA.
- [13] BEZDÍČEK, M. *Lokalizace pohyblivých akustických zdrojů*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. IVAN MÍČA.
- [14] MIKEŠ, P. *Lokalizace statických akustických zdrojů*. BRNO, 2010. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce ING. IVAN MÍČA.
- [15] Co je to zvuk. [online]. 2009-09-28 [cit. 2012-05-27]. Dostupné z: <http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/o-zvuku>
- [16] TOUFAROVÁ, Tereza. *Testování prostorové akustiky*. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Sigmund, CSc.
- [17] BERNAT, P. *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu* [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [18] REICHL, J. [online]. [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [19] Šíření zvuku. [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=662
- [20] MUSEUM "WAALSDORP. [online]. 2007 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.museumwaalsdorp.nl/en/useacous.html>
- [21] SCHIMMEL, Jiří. *Digitální zpracování zvukových signálů na DSP pomocí plug-in modulů* [online]. 2005[cit. 2012-05-27]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05034/index.html>

-
- [22] Akustika [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z:
<http://muj.optol.cz/bajer/skripta/kap7.pdf>
- [23] AKG C1000S. [online]. [cit. 2012-05-28]. Dostupné z:
<http://www.audiotek.cz/product-13269-akg-c1000s>
- [24] HUMUNSOFT. In: [online]. [cit. 2012-05-28]. Dostupné z:
<http://www.humusoft.cz/>
- [25] ZAHRADNÍK, J. *Technologie zvukové tvorby I*, 3. vydání, SPŠST, 2007, 112s.
- [26] ZAHRADNÍK, J. *Technologie zvukové tvorby II*, 1. vydání, SPŠST, 2002, 64s.
- [27] ZAHRADNÍK, J. *Zvuková technika I*, 1. vydání, SPŠST, 2007, 112s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AD	–	Analog-digital
CD	–	Compact disc
DA	–	Digital-analog
DAS	–	Delay and Sum
DOA	–	Difference of Arrivals
DTFT	–	Discrete-time Fourier transform
FFT	–	Fast fourier transform
MSL	–	Maximum Length Sequence
PC	–	Personal computer
PCI	–	Peripheral Component Interconnect
TDE	–	Time Delay Estimate
TDOA	–	Time Difference of Arrivals
RMS	–	Root mean square

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Kmitavý pohyb zavěšeného tělíska na pružině	13
Obr. 2 Akustický vs. atmosférický tlak.....	14
Obr. 3 Závislost intenzity zvuku na vzdálenosti	16
Obr. 4 Huygensův princip šíření vlnění	17
Obr. 5 Odraz zvukové vlny od překážky	18
Obr. 6 Ohyb vlnění na štěrbíně	19
Obr. 7 Ukázka interference vlnění	20
Obr. 8 Fyziologie lidského ucha	22
Obr. 9 Prostorové vnímání zvuku	24
Obr. 10 Směrový diagram citlivosti lidského ucha (1-6kHz)	25
Obr. 11 Hladiny stejné hlasitosti.....	27
Obr. 12 Jeden z prvních lokalizačních přístrojů	28
Obr. 13 Rovinné mikrofonní pole s konstantním rozestupem mikrofonů	29
Obr. 14 Směrová přijímací charakteristika mikrofonního pole[12].....	30
Obr. 15 Směrová přijímací charakteristika mikrofonního pole pro různé vzdálenosti d.....	31
Obr. 16 Lineární mikrofonní pole	32
Obr. 17 Typy různých geometrií mikrofonních polí.....	35
Obr. 18 Lineární mikrofónové pole s ekvivalentním rozmístěním mikrofonů.....	37
Obr. 19 Tvarovač typu Delay and Sum.....	39
Obr. 20 Váhovací okna – a, pravoúhlé; b, Hannovo; c, Hammingovo.....	40
Obr. 21 Ukázka užití spektrogramu pro různé druhy signálu	42
Obr. 22 Současné pojetí zpracovávání signálů	44

Obr. 23 Schéma mikrofonů a, elektrodynamický; b, kondenzátorový [17].....	46
Obr. 24 Směrové charakteristiky mikrofonu.....	48
Obr. 25 Frekvenční charakteristika mikrofonu C 1000 S hypercardiod	50
Obr. 26 Blokové schéma AD/DA převodu	51
Obr. 27 Aliasing při malé vzorkovací frekvenci.....	53
Obr. 28 Diskretizace spojitého signálu	54
Obr. 29 Druhy Fourierovy transformace	57
Obr. 30 Výpočet spektra pro různé druhy signálu [9].....	61
Obr. 31 Vytvoření rovinného mikrofonního pole v prostředí MATLAB	63
Obr. 32 Předozadní nejednoznačnost pole.....	64
Obr. 33 Směrová charakteristika pro mikrofonní pole, pro rozdílné d; a, d=5cm, b, d=10cm, c=15cm	65
Obr. 34 Směrová charakteristika pro mikrofonní pole, rozdílné M, a, M=2, b, M=3, c, M=4	65
Obr. 35 Spektrální rozlišení tvarovače typu DAS.....	67
Obr. 36 Směrové charakteristiky při simulaci Beamformingu	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Citlivost různých druhů mikrofonu	47
Tab. 2 Směrové charakteristiky mikrofonů.....	49
Tab. 3 Výpočet lokalizační schopnosti pro různá mikrofonní pole	64

SEZNAM PŘÍLOH

A – Obsah přiloženého CD

B – Použité funkce v prostředí MATLAB

A – OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Diplomová práce – obsahuje soubor Papez_martin_diplomova_prace.pdf

MATLAB - obsahuje soubory skriptů a funkcí použitých při vypracování diplomové práce

Použité obrázky – složka obsahuje obrázky, které byly použity v této diplomové práci

B – PŘILOŽENÉ SOUBORY V ADRESÁŘI MATLAB

Writingafile.m

Readingafile.m

SynthesizeArray.m

Beamforming.m

BeamformingbasedLocaliser.m

Null_beamform.m

MUSICbasedLocaliser.m

Myoctaveband.m

Playrec.dll

Playrec.mexmaci

Usingplayrec.m

AddReverb.m

RTCalculation.m

Usingplayrec.m