

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Určování směru příchodu ultrazvukového signálu
v prostředí s odrazy

Bc. Tomáš Vaňkát

Diplomová práce

2012

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Vaňkát**
Osobní číslo: **I10373**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Určování směru příchodu ultrazvukového signálu v prostředí s odrazy**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V teoretické části popište metody lokalizace zdroje zvukového a ultrazvukového signálu. Charakterizujte ultrazvukový signál, problematiku jeho šíření volným prostředím a prostředím s překážkami, navrhněte zpracování ultrazvukového signálu pro účely detekce času příchodu signálu.

V praktické části navrhněte a vytvořte ultrazvukové sensorové pole a zařízení pro zesílení signálu. Navrhněte metodu (např. v prostředí Matlab) pro určení směru příchodu ultrazvukového signálu včetně metody pro zpracování signálu. Zrealizujte softwarové zpracování reálně naměřených signálů pro účely určení směru, vyhodnoťte přesnosti dosažené pro různé sestavy sensorového pole (např. rozměry čtverce 1 m x 1 m; 0,5 m x 0,5 m; 0,3 m x 0,3 m).

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

BENESTY, J.; CHEN, J.; HUANG, Y. Microphone Array Signal Processing.

Berlin :

Springer, 2008. 250 s. ISBN 978-3-540-78611-5

BEZOUŠEK, P., ŠEDIVÝ, P.. Radarová technika. 1. vyd. Nakladatelství

ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03036-3

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

15. prosince 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

11. května 2012



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Simeon Karamazov".

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan

L.S.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Zdeněk Němec".

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 30. března 2012

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10. 8. 2012

Bc. Tomáš Vaňkát

Poděkování

Především bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Zdeňku Němcovi, Ph.D., za podnětné rady, připomínky a návrhy týkající se diplomové práce. Dále patří mé poděkování rodině, která mě ve studiu vždy podporovala, přítelkyni, která mi je oporou a všem ostatním studentům, kamarádům, kteří mi byli nápomocni v průběhu studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá možnostmi využití sensorového pole pro detekci směru příchodu ultrazvukového signálu. Součástí práce je rozbor vlastností ultrazvuku a jeho šíření v prostředí s překážkami. V rámci práce je vytvořen hardware vysílání a příjem signálu a software pro zpracování signálu a určení azimutu příchodu signálu. Výsledky diplomové práce prokazují dobré možnosti pro rozlišení i malých změn v poloze vysílače.

Klíčová slova

ultrazvuk; ultrazvukový signál; sensorové pole; TDOA; detekce směru

Title

Indoor Ultrasonic Direction Estimation.

Annotation

Diploma thesis deals with the use of ultrasound sensor array for azimuth detection of ultrasound signal source. The first part of thesis contains analysis of ultrasound properties and ultrasound indoor propagation. The second part is focused on ultrasound receiver and transmitter hardware development and software for signal processing and azimuth detection. Experimental results show the good possibility of azimuth detection and good resolution of small changes of source position.

Keywords

ultrasound; ultrasound signal; sensor array; TDOA; azimuth detection

Obsah

SEZNAM ZKRATEK	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD	13
1 ULTRAZVUK	14
1.1 ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU	15
1.2 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU	15
1.3 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU V KAPALINÁCH.....	16
1.4 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU V PLYNECH.....	16
1.5 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU V PEVNÝCH LÁTKÁCH.....	17
1.6 ŠÍŘENÍ ZVUKU.....	18
1.6.1 Odraz a lom ultrazvukových vln	18
1.6.2 Vznik odrazu zvuku.....	19
1.6.3 Rozptyl ultrazvukových vln	21
1.6.4 Dozvuk	21
1.6.5 Útlum ultrazvukových vln	22
1.7 VYUŽITÍ ULTRAZVUKU	23
1.8 NORMY PRO VYUŽITÍ ULTRAZVUKU.....	23
2 ELEKTROAKUSTICKÉ MĚNIČE A SENZOROVÁ POLE	24
2.1 ELEKTROAKUSTICKÉ MĚNIČE	24
2.1.1 Hlavní parametry akustických měničů:	24
2.1.2 Dělení elektroakustických měničů.....	24
2.2 SENZOROVÉ POLE	25
2.2.1 Vlastnosti sensorového pole.....	25
3 METODY LOKALIZACE ZDROJE ULTRAZVUKOVÉHO SIGNÁLU	28
3.1 TIME DIFFERENTIATION OF ARRIVAL (TDOA)	28
3.1.1 Výpočet polohy pro metodu TDOA:	29
3.1.2 Přesnost polohy určení cíle.....	31
3.2 BEAMFORMING	33
3.3 HIGH RESOLUTIONS SPECTRAL ESTIMATION	35
4 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ ZDROJE SIGNÁLU A SENZOROVÉHO POLE	37
4.1 VYSÍLAČ	37
4.1.1 DPS vysílače.....	40

4.2	PŘIJÍMAČ	41
4.2.1	DPS přijímačů	43
4.3	ULTRAZVUKOVÝ SENZOR	44
5	ZÁZNAM A ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU	46
5.1	POPIS BLOKOVÉHO SCHÉMA PRŮBĚHU ZPRACOVÁNÍ.....	47
5.1.1	Záznam signálu.....	47
5.1.2	Předzpracování signálu.....	48
5.1.3	Detekce časových rozdílů.....	50
5.1.4	TDOA.....	51
6	MĚŘENÍ V PROSTŘEDÍCH S ODRAZY	52
6.1	MĚŘENÍ V UČEBNĚ EL101	52
6.1.1	Rozmístění pole 0,5 m x 0,5 m.....	54
6.1.2	Rozmístění pole 1 m x 1 m.....	58
6.2	MĚŘENÍ NA CHODBĚ	64
6.2.1	Rozmístění pole 0,5 m x 0,5 m.....	65
6.2.2	Rozmístění pole 0,3m x 0,3m.....	70
6.3	CELKOVÉ POROVNÁNÍ	73
7	ZÁVĚR	74
8	LITERATURA	75

Seznam zkratek

ČSN EN	Česká technická norma (dříve Československá státní norma), Evropská norma
DOA	Direction of Arrival
TDOA	Time Differentiation of Arrival
2-D	Dvourozměrný prostor
3-D	Trojrozměrný prostor
DOP	Dilution of Precission
HDOP	horizontální DOP
VDOP	vertikální DOP
MV	Minimum Variance
MUSIC	Multiple Signal Classification
DPS	Deska plošných spojů
MATLAB	MATrix LABoratory

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Dělení mechanického vlnění.....	14
Obrázek 2 - Šíření ve volném prostředí.....	19
Obrázek 3 - Odraz a lom zvukového vlnění.....	20
Obrázek 4 - Schématické znázornění rozptylu ultrazvukových vln.....	21
Obrázek 5 - Graf závislosti ztrátového čísla a vody na teplotě t [1].....	22
Obrázek 6 - Lineární uspořádání sensorového pole.....	26
Obrázek 7 - Rovinné uspořádání sensorového pole.....	26
Obrázek 8 - Prostorové uspořádání sensorového pole.....	27
Obrázek 9 - Hyperbola s popisem parametrů.....	29
Obrázek 10 - Lokalizace polohy pro čtyři senzory.....	30
Obrázek 11 - Zobrazení vzniku chyby.....	32
Obrázek 12 - Schématické znázornění fixního tvarovače.....	34
Obrázek 13 - Schéma zapojení první 555.....	38
Obrázek 14 - Schéma zapojení druhé 555.....	39
Obrázek 15 - Schéma zapojení hradlového zesilovače.....	40
Obrázek 16 - DPS vysílače ze strany spojů.....	40
Obrázek 17 - Vysílač - DPS osazená součástkami.....	41
Obrázek 18 - Invertující zapojení operačního zesilovače [18].....	42
Obrázek 19 - Schéma přijímače pro jeden kanál.....	42
Obrázek 20 - DPS přijímačů ze strany spojů.....	43
Obrázek 21 - Přijímače - DPS osazená součástkami.....	44
Obrázek 22 - Ultrazvukový senzor [19].....	44
Obrázek 23 - Vyzařovací charakteristika ultrazvukového senzoru [17].....	45
Obrázek 24 - Blokové schéma zpracování.....	46
Obrázek 25 - Záznam signálu pomocí digitálního osciloskopu.....	47
Obrázek 26 - Zaznamenaný signál.....	48
Obrázek 27 - Filtrovaný signál.....	49
Obrázek 28 - Výkon signálu.....	49
Obrázek 29 - Normovaný výkon signálu s vyznačenou detekční úrovní.....	50
Obrázek 30 - Upravený signál pro všechny čtyři senzory.....	51
Obrázek 31 - Sensorové pole v prostředí laboratoře EL101.....	52
Obrázek 32 - Schematický plán s uspořádáním učebny EL101.....	53
Obrázek 33 - Rozmístění sensorového pole 0,5 m x 0,5 m s výchylkou 0°	54
Obrázek 34 - Rozmístění sensorového pole 0,5 m x 0,5 m s výchylkou 45°	55
Obrázek 35 - Graf vyjádření chyby naměřeného úhlu od skutečného úhlu.....	57
Obrázek 36 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole, pro pole 0,5 m x 0,5 m, 0°	57
Obrázek 37 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole, pro pole 0,5 m x 0,5 m, 45°	58
Obrázek 38 - Rozmístění sensorového pole 1 m x 1 m s výchylkou 0°	59
Obrázek 39 - Rozmístění sensorového pole 1 m x 1 m s výchylkou 45°	60

Obrázek 40 - Vyjádření chyby naměřeného úhlu od skutečného úhlu pro pole 1 m x 1 m	62
Obrázek 41 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole, pro pole 1 m x 1 m, 0 °	63
Obrázek 42 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole, pro pole 1 m x 1 m, 45 °	63
Obrázek 43 - Schématický plán měřicího pracoviště na chodbě	64
Obrázek 44 - Měření na chodbě	65
Obrázek 45 - Graf porovnání naměřeného úhlu a skutečného úhlu pro pole 0,5 m x 0,5 m	69
Obrázek 46 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole, pro pole 0,5 m x 0,5 m, 0 °	69
Obrázek 47 - Graf vyjádření chyby naměřeného úhlu od skutečného úhlu pro pole 0,3 m x 0,3 m	72
Obrázek 48 - Graf závislost chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole pro pole 0,3 m x 0,3 m, 0 °	73

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Rychlosti šíření zvukových vln pro různá prostředí	17
Tabulka 2 - Popis parametrů hyperboly[11]	29
Tabulka 3 - Parametry vysílače/přijímače [17]	45
Tabulka 4 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými přijímači pro pole 0,5 m x 0,5 m s výchylkou 0 °	54
Tabulka 5 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými přijímači pro pole 0,5 m x 0,5 m s výchylkou 45 °	55
Tabulka 6 - Vypočítané úhly pro pole 0,5 m x 0,5 m	56
Tabulka 7 - Chyby úhlů ve stupních pro pole 0,5 m x 0,5 m	56
Tabulka 8 - Chyby úhlů v procentech pro pole 0,5 m x 0,5 m	56
Tabulka 9 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými přijímači pro pole 1 m x 1 m s výchylkou 0 °	59
Tabulka 10 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými přijímači pro pole 1 m x 1 m s výchylkou 45 °	60
Tabulka 11 - Vypočítané úhly pro pole 1 m x 1 m	61
Tabulka 12 - Chyby úhlů ve stupních pro pole 1 m x 1 m	61
Tabulka 13 - Chyby úhlů v procentech pro pole 1 m x 1 m	62
Tabulka 14 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými senzory pro pole 0,5 m x 0,5 m	66
Tabulka 15 - Vypočítané úhly pro pole 0,5 m x 0,5 m	67
Tabulka 16 - Chyba ve stupních pro pole 0,5 m x 0,5 m	67
Tabulka 17 - Chyba v procentech pro pole 0,5 m x 0,5 m	68
Tabulka 18 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými senzory pro pole 0,3 m x 0,3 m	70
Tabulka 19 - Spočítané úhly pro pole 0,3 m x 0,3 m	70
Tabulka 20 - Chyba ve stupních pro pole 0,3 m x 0,3 m	71

Tabulka 21 - Chyba v procentech pro pole 0,3 m x 0,3 m	71
Tabulka 22 - Celkové porovnání chyb	73

Úvod

Problematika lokalizace pomocí ultrazvuku patří v dnešní době k aktuálním tématům. Její využití má široký význam uplatnění v mnoha aplikacích. V odborných publikacích nebo na internetu je mnoho prací, které se zabývají využitím lokalizace za pomoci slyšitelného zvuku. Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu a praktické ověření využití ultrazvuku pro lokalizaci (určení směru příchodu) zdroje signálu, tedy zdroje mechanického vlnění od 20kHz až stovky MHz.

V první kapitole je vyložen úvod do šíření ultrazvukového signálu prostředím. Dále se tato kapitola zabývá popisem důležitých vlastností ultrazvuku, s kterými je třeba při praktické realizaci lokalizačního zařízení počítat.

Druhá kapitola se zabývá teoretickým popisem elektroakustických měničů a sensorového pole. Jsou zde popsány vlastnosti a dělení elektroakustických měničů a je analyzováno dělení sensorových polí podle jejich uspořádání a vlastností.

Ve třetí kapitole jsou analyzovány metody lokalizace zdroje ultrazvukového signálu. Důraz je kladen na metodu Time Differentiation of Arrival (TDOA), jejíž součástí je i výpočet a přesnost určení polohy cíle.

Čtvrtá kapitola se zabývá popisem technického řešení zdroje signálu a sensorového pole. V první části kapitoly je popsán návrh a praktická realizace vysílače. Dále je popsán návrh a praktická realizace přijímače signálu. V této diplomové práci jsou použity čtyři oddělené přijímače uspořádané do čtvercového pole. Poslední podkapitola se zabývá popisem a vlastnostmi ultrazvukového senzoru.

V páté kapitole je popsán záznam a zpracování signálu, kde proces zpracování zaznamenaného signálu je doprovázen obrázky signálu po dílčích úpravách.

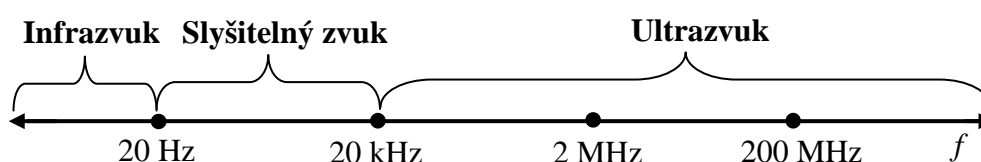
Šestá kapitola se zabývá měřením v prostředích s odrazy. Tato kapitola je rozdělena na dvě podkapitoly, a to na měření v laboratoři s velkým množstvím předmětů (nábytek, vybavení) a na měření na chodbě s členitou strukturou stěn. Pro každé měření je nakresleno schéma a uspořádání měřicího pracoviště a je popsáno umístění a vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

V sedmé kapitole jsou shrnuty výsledky použití ultrazvuku pro určování směru příchodu ultrazvukového signálu v prostředí s odrazy.

1 Ultrazvuk

Věda, která se zabývá studiem a měřením mechanického vlnění, se nazývá akustika. Toto mechanické vlnění můžeme rozdělit do následujících skupin:

- 0,7 Hz až 20 Hz infrazvuk,
- 20 Hz až 20 kHz slyšitelný zvuk,
- 20 kHz až stovky MHz ultrazvuk.



Obrázek 1 - Dělení mechanického vlnění

Podélné akustické vlny se mohou šířit v látkách všech skupenství: v kapalinách, plynech, pevných látkách i v plazmatu. V oboru akustiky se v hojné míře využívá poznatků a postupů nauky o vlnění. Mezi základní oblasti akustiky patří: fyzikální akustika, teoretická akustika, akustika ultrazvuku, fyziologická akustika, prostorová akustika, molekulová akustika, akustika hudebních nástrojů, atd. Samostatnou skupinu dnes tvoří zpracování akustických signálů.

Ultrazvukové vlny vyvolané zdrojem ultrazvuku se šíří prostředím a vytvářejí ultrazvukové pole. Tvar ultrazvukového pole je ovlivněn interferenčními jevy, které v reálném případě závisí na rozměrech vyzářovací plochy zářiče, vlastnostech prostředí, ve kterém se ultrazvukové vlny šíří a na vlnové délce λ .

Průchodem ultrazvukových vln prostředím dochází k jejich interferenci. Interference je děj, při kterém dochází k superpozici dvou a více ultrazvukových vln se stejnou frekvencí. Výsledný efekt závisí na fázovém posuvu těchto vln. Ke vzniku interferenčních jevů dochází při aplikacích ultrazvuku v praxi téměř vždy, a to například v důsledku odrazu vln od stěn, zařízení nebo od hladiny v případě šíření vln v kapalině. V takovém ultrazvukovém poli vznikají body, případně místa, s minimální až nulovou intenzitou, což je způsobeno tím, že se vlny sejdou v opačné fázi. Ovšem mohou se vyskytnout i oblasti s maximální intenzitou ultrazvukového pole.

1.1 Šíření ultrazvuku

Ultrazvuk je akustické vlnění s frekvencí ležící nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha, tedy nad hranicí zvuku cca 20 kHz. Tato hranice je individuální. Z tohoto důvodu je tedy pro lidské ucho neslyšitelný, byť má stejnou fyzikální podstatu jako zvuk, ale řada živočichů je schopna část ultrazvukového spektra vnímat (netopýři, delfíni, psi). Ultrazvuk má kratší vlnovou délku než zvukové vlnění, proto je ultrazvuk méně ovlivněn ohybem. Výrazný je odraz ultrazvuku od překážek. Na rozdíl od slyšitelného zvuku je méně pohlcován kapalinami a pevnými látkami.

1.2 Rychlost šíření ultrazvuku

Zvuková vlna je určena střídavým zhušťováním (komprese) a zředováním částic prostředí. V tomto prostředí je rychlost šíření závislá na podmínkách okolí, jako je teplota, tlak, vlhkost, atd. Rychlost šíření zvuku je tedy rychlost toho vlnění. Rychlost šíření vlny je pro různá prostředí různá, přičemž jejich intenzita slábne. Zvuk se šíří podélným typem vlnění. U podélného typu vlnění částice kmitají přímočaře ve směru šíření vlny. Pro výchylku, která vznikne při tomto kmitání, lze napsat vztah, který platí pro harmonický pohyb:

$$a = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (1.1)$$

kde A je amplituda výchylky [m],
 $\omega = 2\pi f$ je úhlová rychlost [rad.s⁻¹],
 c je rychlost šíření vlny [m s⁻¹],
 x je souřadnice polohy [m].

Nedojde-li k absorpci rovinné vlny s rostoucí vzdáleností od zvukového zdroje, je amplituda akustické výchylky konstantní. Akustickou (zvukovou) rychlostí nazýváme proměnnou rychlost v , kterou uspořádaně kmitají částice kolem svých středních poloh. Derivací okamžité výchylky a je dána rychlost kmitání částic kolem rovnovážné polohy. Pro vyjádření této rychlosti platí vztah:

$$v = \frac{da}{dt} = \omega A \cos(\omega t - \varphi), \quad (1.2)$$

kde t je čas [s],
 φ fáze vlny [rad].

1.3 Rychlost šíření ultrazvuku v kapalinách

Rychlost šíření ultrazvukových vln v čistých kapalinách je závislá na hustotě prostředí, ve kterém se šíří, a na tlaku. Zhušťování a zředování částic probíhá za dokonalé tepelné izolace, tedy bez výměny tepla s okolím. Poté pro výpočet rychlosti šíření ultrazvukových vln v kapalinách platí vzorec:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad}\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa}{\beta_{iz}\rho}}, \quad (1.3)$$

kde K je adiabatický (děj probíhající za dokonalé tepelné izolace, bez výměny tepla s okolím) modul objemové pružnosti [Pa],

β_{ad} je adiabatická stlačitelnost [Pa^{-1}],

β_{iz} je izometrická stlačitelnost [Pa^{-1}],

κ je Poissonova konstanta.

S měnící se teplotou se mění i rychlost šíření ultrazvukových vln v kapalinách. Pro rychlost šíření ultrazvukových vln v kapalinách v závislosti na teplotě platí vztah:

$$c = c_0 + b(\vartheta - \vartheta_0), \quad (1.4)$$

kde c_0 je rychlost šíření při počáteční teplotě ϑ_0 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

b je teplotní součinitel [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],

Rychlost šíření ultrazvukových vln ve vodě se zvyšuje se stoupajícím tlakem, a to přibližně o 0,1% na 1MPa.[1].

1.4 Rychlost šíření ultrazvuku v plynech

Pro rychlost šíření ultrazvukové vlny v ideálním plynu lze použít výraz [1], [2]:

$$c = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \left(1 + \frac{1}{2} \gamma \cdot t\right)}, \quad (1.5)$$

kde p_0 je tlak plynu při teplotě 0°C [Pa],

ρ_0 je hustota plynu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

κ je Poissonova konstanta - zde poměr měrných tepel,

γ je součinitel teplotní rozpínivosti plynu [K^{-1}].

Pro tuto diplomovou práci stačí použití vzorce pro rychlost šíření ultrazvuku ve vzduchu:

$$c = (331,57 + 0,607 \cdot t), \quad (1.6)$$

kde t je teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$].

1.5 Rychlost šíření ultrazvuku v pevných látkách

V pevných látkách dochází k příčnému a podélnému vlnění na rozdíl od kapalin a plynů, kde není možné vytvořit smyková napětí. Proto v kapalinách a plynech nemůže vzniknout příčné vlnění, ale pouze podélné. Fyzikální parametry prostředí, ve kterém se vlna šíří, značně ovlivňují rychlost tohoto šíření. Pro rychlost šíření příčné vlny v pevném prostředí platí vztah:

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (1.7)$$

kde G je modul pružnosti ve smyku,

ρ je hustota prostředí [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

Pro výpočet rychlosti šíření podélných vln v pevných látkách je třeba použít vztah:

$$c = \sqrt{\frac{2G}{\rho} \frac{\kappa - 1}{2\kappa - 1}}. \quad (1.8)$$

Poissonovo číslo udává u pevné látky namáhané v tahu souvislost mezi poměrným podélným prodloužením ε a poměrným příčným zkrácením η [3].

V následující tabulce je uveden příklad rychlostí šíření zvukových vln pro různá prostředí [4]:

Tabulka 1- Rychlosti šíření zvukových vln pro různá prostředí

Látka	Rychlost zvuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
Voda (25°C)	1500
Rtuť (20°C)	1400
Beton	1700
Led (-4°C)	3200
Ocel (20°C)	5000
Sklo	5200

1.6 Šíření zvuku

Převážná část metod k lokalizaci zdroje akustických signálů, které jsou doposud popsány v technické literatuře, dokáže bez velkých problémů a s ucházející přesností lokalizovat zdroje akustického signálu v bezodrazovém (volném) prostředí nebo v tzv. bezodrazové komoře. Problém nastane při aplikaci metod lokalizace v reálných podmínkách, kde se uplatní negativní faktory - odraz zvuku, doba dozvuku, ohyb zvuku a šum.

1.6.1 Odraz a lom ultrazvukových vln

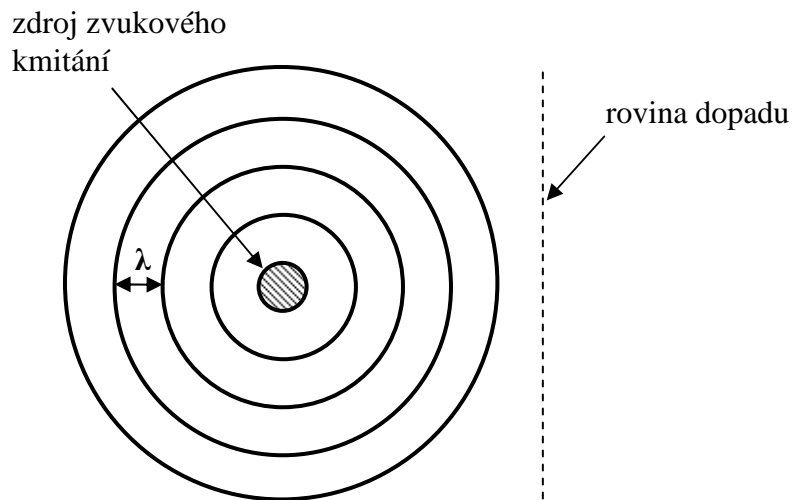
Vlnová délka je charakteristickou veličinou zvukové vlny, která se označuje jako λ . Vlnovou délku můžeme definovat jako:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.9)$$

kde c je rychlost šíření podélných ultrazvukových vln,

f je kmitočet ultrazvukového vlnění.

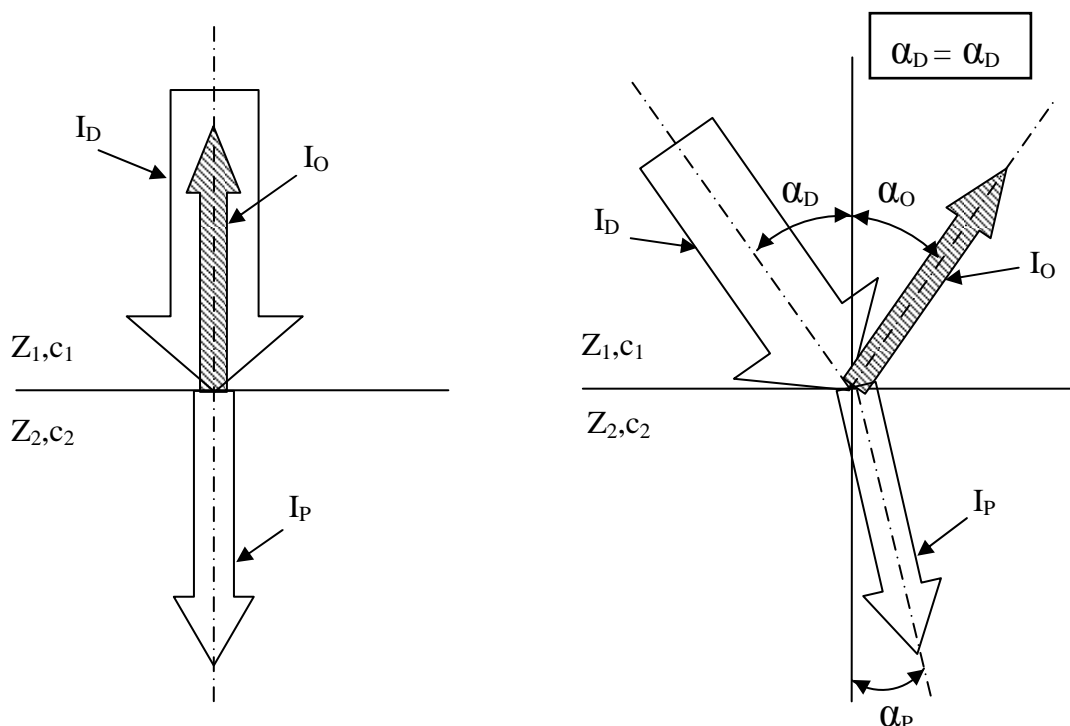
Vlnová délka ultrazvuku je velmi důležitá právě pro diagnostické aplikace pomocí ultrazvuku. Určuje nejmenší vzdálenost mezi dvěma objekty, které leží na ose ultrazvukového svazku a mohou být od sebe rozlišeny. Z této vlastnosti tedy vyplývá, že vlnová délka určuje dosažitelnou limitní prostorovou rozlišovací schopnost systému. Ultrazvukové kmitání se šíří ve volném prostoru všemi směry v tzv. vlnoplochách (tato situace je zachycena na obrázku číslo 2). Tyto vlnoplochy mají tvar koule, ovšem při dostatečně velké vzdálenosti od zdroje ultrazvukového kmitání, je možné kulové vlnoplochy nahradit částí roviny.



Obrázek 2 - Šíření ve volném prostředí

1.6.2 Vznik odrazu zvuku

V homogenním prostředí se ultrazvukové kmitání šíří přímočaře. Pokud zvuková vlna při svém směru šíření dopadne na rozhraní dvou prostředí s různými akustickými vlastnostmi, dojde k jejímu odrazu a část zvukové energie pronikne do prostředí druhého nebo se přemění v teplo. K lomu dochází v situaci, kdy při přechodu z jednoho prostředí do druhého mění vlnění svůj směr šíření (pokud nejde o kolmý dopad). Lom a odraz nastává však pouze tehdy, pokud jsou rozměry rozhraní (resp. překážky) větší než je vlnová délka ultrazvukového vlnění. Pokud jsou rozměry překážky a vlnové délky řádově stejné, je lom provázen difrakcí (ohybem).



Z_1, Z_2 jsou akustická impedance prostředí,
 c_1, c_2 jsou rychlosti šíření podélných ultrazvukových vln,
 I_D, I_O, I_P jsou intenzity ultrazvukového vlnění,
 $\alpha_D, \alpha_O, \alpha_P$ je úhel dopadu, úhel odrazu, úhel lomu.

Obrázek 3 - Odraz a lom zvukového vlnění

Amplitudový reflexní koeficient r_a je poměr amplitudy ultrazvukové vlny po odrazu k amplitudě ultrazvukové vlny před dopadem na rozhraní, od kterého se ultrazvuková vlna odrazí (viz. obr. 3). Reflexní koeficient pro dopad ve směru normály k rovině akustického rozhraní může být vypočten podle vztahu:

$$r_a = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad [-] \quad (1.10)$$

Častěji se používá tzv. intenzivní reflexní koeficient r_i , který je definován následujícím vztahem:

$$r_i = r_a^2. \quad [-] \quad (1.11)$$

Dvě předešlé rovnice (1.10) a (1.11) platí jen pro kolmý dopad na akustické rozhraní.

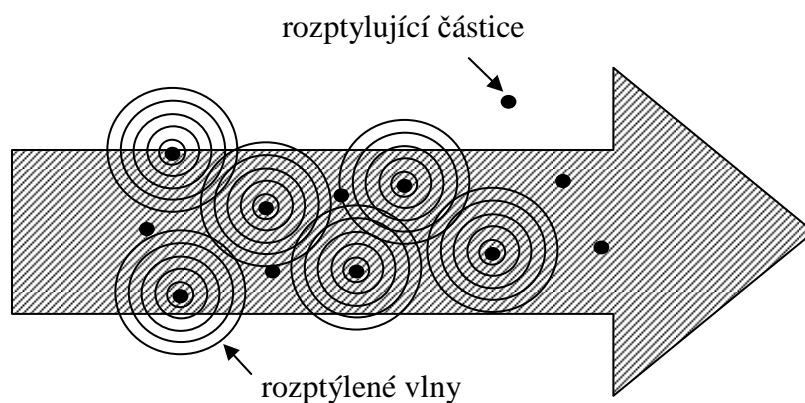
Úhel lomu α_p závisí na rychlosti šíření ultrazvukové vlny v obou prostředích. Snellův zákon udává poměr *sinu* úhlu dopadu a úhlu lomu, tento poměr definuje index lomu n ultrazvukové vlny [5], [6], [7], [8]:

$$\frac{\sin \alpha_D}{\sin \alpha_p} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad [-] \quad (1.12)$$

.

1.6.3 Rozptyl ultrazvukových vln

Rozptyl neboli disperze ultrazvukových vln nastává zejména v prostředí, ve kterém jsou geometrické rozměry rozptýlených částic srovnatelné s vlnovou délkou ultrazvukové vlny. Malé částice část ultrazvukové energie absorbují a opět jí generují do všech směrů jako sférické pole, viz obr. 4.



Obrázek 4 - Schématické znázornění rozptylu ultrazvukových vln

Rayleighovým rozptylem je označován mechanismus rozptylu. Tento rozptyl není závislý na změnách akustické impedance rozptylujících částic ani na jejich velikosti [8].

1.6.4 Dozvuk

Pod pojmem dozvuk si lze představit prodloužení původního zvuku. Dozvuk nastává v případě, kdy je překážka vzdálena méně než vlnová délka λ . Tedy např. pro ultrazvukový signál o frekvenci 40 kHz musí být tato vzdálenost menší než 8,5mm (při uvažované rychlosti šíření podélných ultrazvukových vln 340 m s^{-1}), viz vzorec 1.9. V oblasti ultrazvukové lokalizace se tedy tento jev neuplatní, důležitý může být u zvukových signálů.

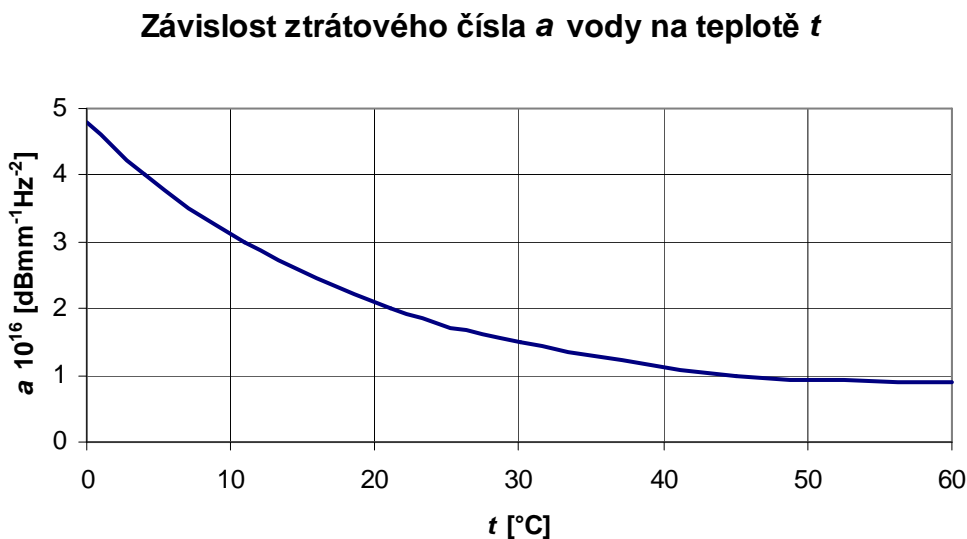
1.6.5 Útlum ultrazvukových vln

Průchodem ultrazvukové vlny prostředím klesá její energie, a tím i její akustický tlak v závislosti na vlastnostech prostředí. V důsledku vnitřního tření kmitajících částic se mechanická energie mění v tepelnou - tento proces se nazývá pohlcování (absorpce) ultrazvukových vln. Dalšími útlumovými faktory, jejichž příčinou je dopad ultrazvukových vln na jednotlivá rozhraní, jsou odraz, lom, ohyb a rozptyl. Pro plyny a kapaliny je útlum závislý na ztrátách α_V , které jsou způsobeny vnitřním třením (viskozitou) a na ztrátách α_T , které vznikají vlivem tepelné vodivosti kapalin.

Veličina charakterizující útlum je ztrátové číslo, které se vypočítá:

$$a = \frac{\alpha}{f^2} \quad (1.13)$$

Pro kapaliny platí, že $\alpha_V \gg \alpha_T$, tedy ztrátové číslo, závisí převážně na ztrátách viskozitních. Pro plyny jsou obě hodnoty řádově shodné, $\alpha_V \approx \alpha_T$. Útlum ultrazvuku je závislý na teplotě prostředí, a to pro většinu případů opačně než závisí na rychlosti šíření ultrazvukových vln. Na obrázku č. 5 je vyobrazena závislost útlumu ultrazvuku ve vodě na teplotě [1].



Obrázek 5 - Graf závislosti ztrátového čísla a vody na teplotě t [1]

1.7 Využití ultrazvuku

Ultrazvuk je v současné době v technické praxi využíván k velkému množství aplikací:

- **obrábění** – je založené na rozkmitávání brusiva v suspenzi pomocí ultrazvuku a následným vyražením částic obráběného materiálu [9],
- **lékařství** – v tomto oboru nachází ultrazvuk široké uplatnění a dochází k neustálému rozvoji využití ultrazvuku pro tento obor,
- **čištění a odmašťování** – pro tento proces se využívá působení nadzvukového vlnění v tekutém prostředí jako příčina akustické kavitace, tj. vznikají dutiny v kapalině s jejich následnou implozí, čímž dochází k narušování okolního materiálu, a tím k odlučování nečistot,
- **metrologie** – v tomto oboru se ultrazvuk používá pro měření vzdálenosti hlavně díky své směrovosti. Samotné měření je nepřímé. Principem tohoto měření je měření časové prodlevy mezi vysláním ultrazvukového pulzu a jeho přijetím po odrazu od překážky. Pro toto měření je potřeba znát rychlost šíření zvuku v daném prostředí. Pohybuje-li se překážka, o kterou se signál odráží, a provádí-li se více měření za sebou, je možné z naměřených vzdáleností vypočítat rychlost překážky [10],
- **kontaktování** – rozmítáním mikrodrátku pomocí ultrazvuku vzniká tepelná energie, pomocí které se vytváří svár,
- **diagnostika** – je založena na odrazu ultrazvuku odraženého od rozhraní dvou materiálů. Množství odražené energie je funkcí rozdílu akustických impedancí látek, které tvoří rozhraní. Ze získaných informací je vykonstruovaný obraz.

1.8 Normy pro využití ultrazvuku

Pro využití ultrazvuku a ultrazvukových senzorů existuje několik norem, které se zabývají především měřením výkonu signálu a definují principy, jak zjistit i ostatní parametry signálu. Normy pocházejí často z angličtiny, nejsou ani překládány. O omezeních pro použití ultrazvuku pro různé aplikace se normy nezmiňují. Určitá omezení se vztahují zejména na využití v lékařství.

2 Elektroakustické měniče a senzorová pole

2.1 Elektroakustické měniče

Jedná se o zařízení, které převádí elektrickou energii na akustickou, tedy reproduktor, nebo naopak se jedná o mikrofon. K převodu mezi mechanickým vlněním a elektrickým signálem se běžně využívá membrána nebo piezoelektrický krystal.

2.1.1 Hlavní parametry akustických měničů:

- **frekvenční odezva** – je přenesený výkon signálu pro danou frekvenci,
- **vyzařovací charakteristika** – zachycuje zobrazení směru šíření zvuku z elektroakustického měniče,
- **citlivost** – je průměrný akustický tlak v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1m,
- **účinnost** – je poměr příkonu a vyzářeného výkonu,
- **maximální příkon** – udává maximální hodnoty proudu a napětí, při kterých nedojde k poškození měniče.

2.1.2 Dělení elektroakustických měničů

- **elektrodynamické** – základem těchto měničů je cívka a permanentní magnet. Cívka je umístěna mezi pólovými nástavci magnetického obvodu, protéká jí proud a cívka se v závislosti na něm pohybuje. Tento pohyb je přenášen na membránu, ta způsobí zvukový vzruch. Provedení reproduktorů je páskové, plošné nebo s ohybovou vlnou. Horní mez frekvenčního rozsahu těchto elektroakustických měničů se blíží k 20 kHz. Používají se zejména pro reprodukci slyšitelného zvuku.,
- **elektromagnetické** – dnes se již tolik nepoužívají. Základem těchto měničů je membrána, která je přitahována pevně umístěnou cívkou s jádrem, nebo malý magnet, který je v poli budící cívky a pohybuje membránou. Za výhodu lze považovat relativně jednoduchou konstrukci. Za nevýhodu pak velké zkreslení a malý frekvenční rozsah.,
- **magnetostrikční** – využívají toho, že se některé feromagnetické látky dokáží deformovat vlivem magnetického pole. Deformace materiálu závisí přímo úměrně na velikosti řídicího proudu protékajícího magnetickým obvodem budícím magnetické pole. Tento typ měničů lze použít pro reprodukci ultrazvuku.,
- **elektrostatické** – provedení těchto měničů je podobné jako deskový kondenzátor, který má pohyblivou jednu z elektrod. Mění se napětí připojeného signálu pak působí na pohybující elektrodu, a ta mění svoji polohu a působí zvukový rozruch.,

- **piezoelektrické** – tyto měniče pracují na základě piezoelektrického jevu, tzn. využívají změny rozměrů krystalu úměrně ku přiváděnému napětí. Toto kmitání krystalu se dále šíří prostředím jako zvuk. Piezoelektrické měniče mají velký frekvenční rozsah použití pro reprodukci ultrazvukových signálů.

Z uvedených elektroakustických měničů mají pro reprodukci ultrazvukových signálů význam pouze piezoelektrický a magnetostrikční. V těchto měničích dochází k přeměně energie na úrovni molekul, k čemuž dochází prostřednictvím elektromagnetických a elastických vazeb. To je velkou výhodou oproti elektroakustickým měničům, které využívají k přeměně elektrické energie na akustickou energii membránu, která je pro vyšší přenášené frekvence limitována daleko dříve.

2.2 Senzorové pole

Senzorové pole je uskupení několika senzorů situovaných do geometrických útvarů. Tato pole jsou převážně používána k řešení několika zásadních problémů:

- redukce ozvěn a šumu,
- lokalizace jednoho zdroje šumu,
- lokalizace více zdrojů zvuku,
- estimace počtu zdrojů zvuku,
- separace zdrojů signálu.

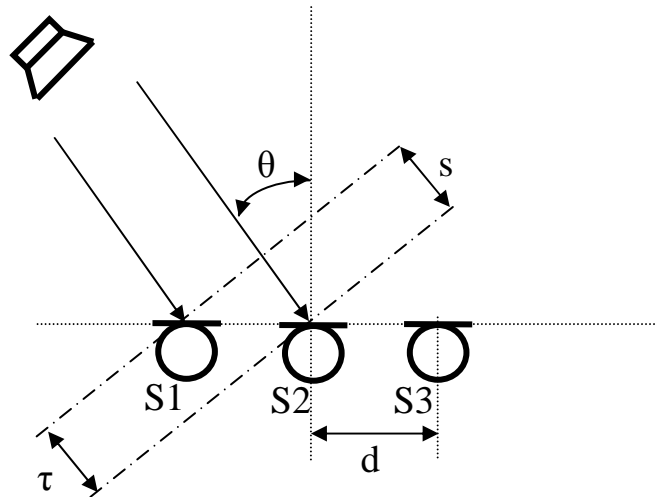
Senzorové pole přináší mnoho poznatků, které jsou využívány například při:

- telekonferencích,
- diktovacích systémech,
- počítačových hrách,
- akustické analýze místnosti.

2.2.1 Vlastnosti senzorového pole

Senzorové pole musí být navrhováno podle námi požadovaných parametrů, tedy musíme definovat, o jaký tvar pole půjde.

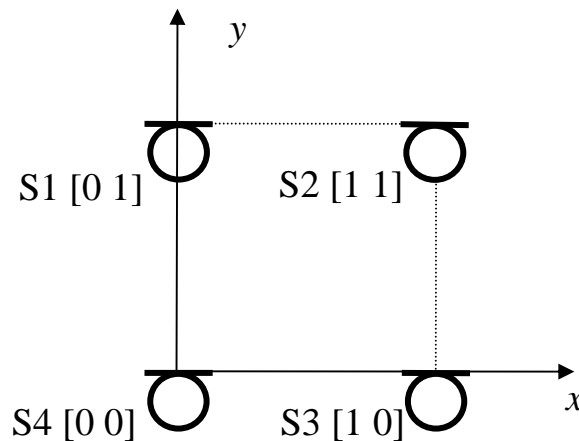
- **Lineární** – všechny senzory leží v jedné přímce, úhel určení zdroje je 0° až 180° .



- θ je úhel, pod který dopadá signál na jednotlivé senzory, tedy úhel určení zdroje,
- τ je časové zpoždění mezi příchodem signálu na sousední senzory,
- S1, S2, S3 jsou jednotlivé senzory,
- d je vzdálenost mezi sousedními senzory,
- s je dráha rozdílu příchodu signálu na sousední senzory.

Obrázek 6 - Lineární uspořádání sensorového pole

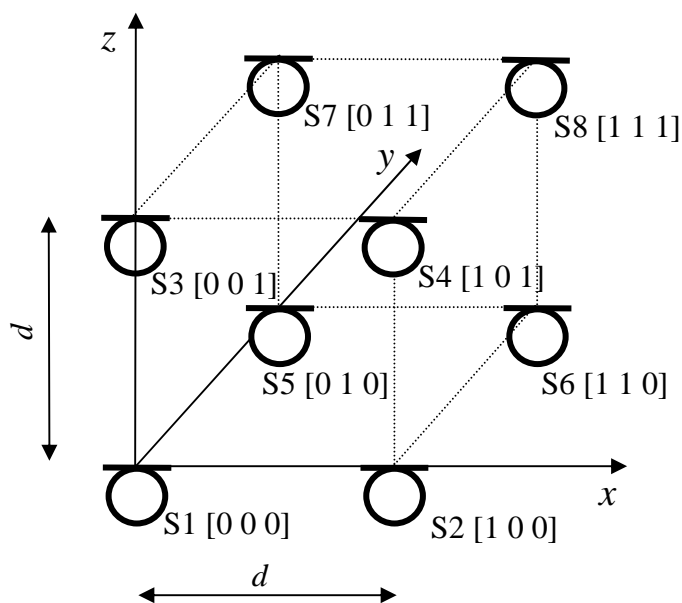
- **Rovinné** – senzory ležící v jedné rovině s nejčastěji kruhovým nebo pravoúhlým uspořádáním. Takové rozmístění senzorů nám dokáže poskytnout informaci o celém 2-D prostoru.



- S1, S2, S3, S4 jsou jednotlivé senzory,
- x, y jsou kartézské souřadnice.

Obrázek 7 - Rovinné uspořádání sensorového pole

- **Prostorové** – při tomto uspořádání senzorů zjistíme azimut a zároveň i elevaci. Při známé elevaci a azimutu můžeme následně získat informaci o poloze v 3-D prostoru.



S1-S8 jsou jednotlivé senzory,
 d je vzdálenost sousedních senzorů,
 x, y, z jsou souřadnice systému.

Obrázek 8 - Prostorové uspořádání sensorového pole

Dalšími parametry sensorového pole jsou spodní a horní kmitočet zpracovávaného kmitočtového pásma, vzdálenost mikrofonního pole od měřeného zdroje, velikost mapovaného prostoru, maximální úroveň postranních laloků přijímací charakteristiky, která nám definuje dynamické vlastnosti pole a prostorové rozlišení. Všechny tyto veličiny jsou spolu úzce propojeny.

Posledním krokem je návrh takové geometrie pole, aby nevznikal prostorový aliasing, který je obměnou aliasingu nastávajícího při vzorkování v čase.

V této diplomové práci je použito rovinné uspořádání pole, kde jednotlivé senzory jsou rozmístěny do čtverce.

3 Metody lokalizace zdroje ultrazvukového signálu

Metody pro odhad směru příchodu vlnění (DOA, z angl. Direction of Arrival) lze v zásadě rozdělit do tří skupin:

- **Time Differentiation of Arrival (TDOA)** - metody založené na měření rozdílů v časovém zpoždění signálů.
- **Beamforming** - metody založené na tvarování přijímací charakteristiky.
- **High resolutions spectral estimation** - metody založené na spektrálních odhadech vysokého rozlišení.

3.1 Time Differentiation of Arrival (TDOA)

TDOA (Time Differentiation of Arrival) je metodou vycházející z měření časových rozdílů v příchodech signálů. Princip této lokalizační metody je založen na zjištění časového zpoždění mezi jednotlivými sensorovými páry, přičemž poloha sensorů je známá. Z určeného zpoždění a znalosti rozložení sensorů se stanoví hyperbolické křivky (v 3-D lokalizaci jsou to hyperboloidy), které se protnou v bodě, který odpovídá pozici vysílače. Pro řešení této lokalizační metody bylo vyvinuto několik algoritmů. Odlišnosti jednotlivých algoritmů jsou ve způsobu derivace a v rozsahu použitelnosti pro 2-D metody, 3-D metody nebo lokalizace v blízké a vzdálené zóně, atd. Zárukou efektivity TDOA je přesný a robustný odhad rozdílů příchodu signálu na jednotlivé senzory. Přesný odhad je komplikován několika faktory, přičemž mezi hlavní faktory patří:

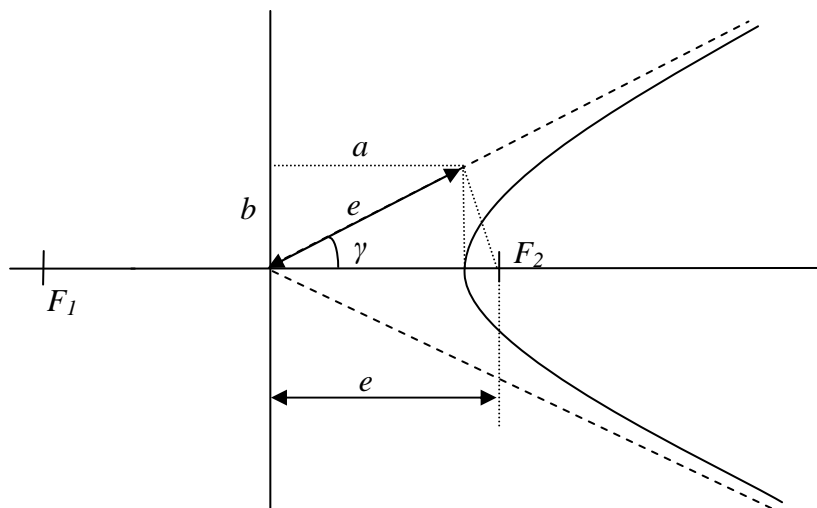
- šum na pozadí,
- mnohocestné šíření, které vzniká např. v zástavbě nebo místnostech [4].

Pro určení časového rozdílu se převážně používají korelační metody, kde se pro odhad časových odchylek používají jednotlivá maxima. Výpočet polohy zdroje zvuku se provádí podle mnoha metod, např. lokalizací pomocí mnohočetné interpolace korelační funkce z více sensorových párů nebo maximalizací korelační funkce.

Metodu TDOA je možné rozdělit do dvou kroků. V prvním kroku se určí časový rozdíl v příchodu mezi jednotlivými senzory a ve druhém kroku se na základě znalosti geometrie rozložení sensorů vypočítá poloha zdroje zvuku. Zvuk přicházející na jednotlivé senzory s konstantním rozdílem pseudovzdáleností $\rho_{12} = c \cdot \tau_{12}$ odpovídá geometrickému popisu hyperboly. Hyperbola je tedy množina všech bodů v rovině s daným rozdílem vzdáleností

od dvou pevných ohnisek. Ohniska této hyperboly odpovídají místu příjmu signálu. Hyperbolu můžeme popsat následujícím vzorcem:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (3.1)$$



Obrázek 9 – Hyperbola s popisem parametrů

V tabulce je popsán vztah dalších parametrů hyperboly s konfigurací měřicího systému [5].

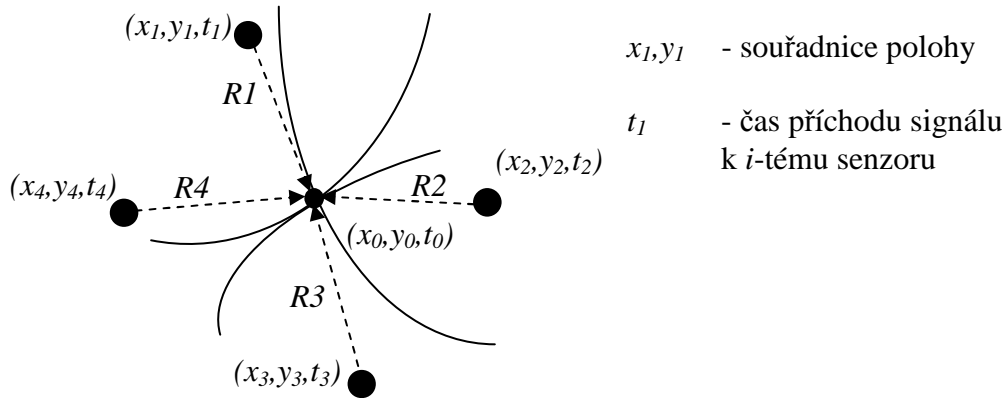
Tabulka 2 - Popis parametrů hyperboly [11]

	Hyperbola	Měřicí systém
a	Reálná poloosa hyperboly	$2a = c \cdot \Delta\tau_{12} = \Delta\rho_{12}$
b	Imaginární poloosa hyperboly	
e	Délková výstřednost hyperboly	poloviční vzdálenost stanic
γ	Úhel asymptoty $\text{tg}(\gamma) \text{tg}(\gamma) = \frac{b}{a}$	
F1,F2	Ohniska hyperboly	Stanoviště přijímačů

3.1.1 Výpočet polohy pro metodu TDOA:

V pasivních TDOA radarových systémech obdržíme na vstupu algoritmu množinu bodů, která se skládá z určených časových rozdílů ze zpožděných signálů. Tato množina má konstantní rozdíl vzdáleností ke dvěma známým přijímačům (senzorům), což je

pro dvourozměrné řešení hyperbola a pro prostorové trojrozměrné hyperboloid. K odhadu polohy ve 2-D prostoru nestačí dva senzory, proto se používají tři pro jednoznačnost. Pro 3-D prostor je pak minimální počet senzorů pro určení polohy roven čtyřem. Zvýšené přesnosti lokalizace se dosahuje zvětšením počtu senzorů než je minimální počet. Obrázek číslo 10 zachycuje možné rozložení sensorového pole pro systém lokalizace ve 2-D prostoru [12].



Obrázek 10 - Lokalizace polohy pro čtyři senzory

$$\rho_i = c \cdot t_i = \|x_i - x_t\| + c \cdot t_t, \quad (3.2)$$

Kde ρ_i [m] je pseudovzdálenost i -té stanice,
 t_i [m] je čas příjmu na i -té stanici,
 t_t [m] je čas vysílání signálu cílem,
 $x_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ je vektor souřadnic i -té stanice,
 $x_t = [x_t \ y_t \ z_t]^T$ je vektor souřadnic cíle,
 c je rychlost šíření.

Vzhledem k tomu, že se jedná o nelineární model, tak se hledaná pozice cíle x_t a čas vysílání signálu t_t získává pomocí iteračního řešení linearizace tohoto modelu ve zvoleném bodě počátečního odhadu \hat{x}_t a \hat{t}_t podle následujícího vztahu:

$$\Delta \rho = \rho - \hat{\rho} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial \hat{x}_t} & \frac{\partial \rho_1}{\partial \hat{y}_t} & \frac{\partial \rho_1}{\partial \hat{z}_t} & \frac{\partial \rho_1}{\partial \hat{t}_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_N}{\partial \hat{x}_t} & \frac{\partial \rho_N}{\partial \hat{y}_t} & \frac{\partial \rho_N}{\partial \hat{z}_t} & \frac{\partial \rho_N}{\partial \hat{t}_t} \end{bmatrix}}_H \cdot \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_t \\ c \cdot (t_t - \hat{t}_t) \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

kde $\Delta \hat{x}_t = x_t - \hat{x}_t,$ (3.4)

ρ [m] je vektor naměřených pseudovzdáleností,
 $\hat{\rho}$ [m] odpovídá hodnotám, které byly zvoleny pro vektor \hat{x}_t .

Převodní maticovou konstantu H lze zvolit v bodě \hat{x}_t podle vztahu:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - \hat{x}_t}{\hat{r}_1} & \frac{y_1 - \hat{y}_t}{\hat{r}_1} & \frac{z_1 - \hat{z}_t}{\hat{r}_1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_N - \hat{x}_t}{\hat{r}_N} & \frac{y_N - \hat{y}_t}{\hat{r}_N} & \frac{z_N - \hat{z}_t}{\hat{r}_N} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

kde
$$\hat{r}_i = \|x_i - \hat{x}_t\| = \sqrt{(x_i - \hat{x}_t)^2 + (y_i - \hat{y}_t)^2 + (z_i - \hat{z}_t)^2} \quad (3.6)$$

Následující kroky udávají postup určení polohy cíle:

- Ověření přijatých signálů – všechny pseudovzdálenosti (časy příchodu) použité k výpočtu musí patřit k jedinému vysílanému signálu,
- přepočet naměřených časů příchodu na pseudovzdálenosti,
- volba počátečního odhadu \hat{x}_t a výpočet odpovídajících pseudovzdáleností $\hat{\rho}$,
- výpočet korekce odhadu polohy Δx_t z rozdílů naměřených pseudovzdáleností a pseudovzdáleností $\hat{\rho}$.

„Postup určení korekce odhadu Δx_t závisí na počtu stanic systému. Pokud není systém přeürčený (matice H je čtvercová) a H je regulární, což je pro obvyklé konfigurace systému splněno, lze získat řešení násobením rovnice 2.2 zleva maticí H^{-1} . Pokud je systém přeürčený, lze korekci odhadu polohy $\Delta \hat{x}_t$ získat metodou nejmenších čtverců rovnice 2.7.“ [11]

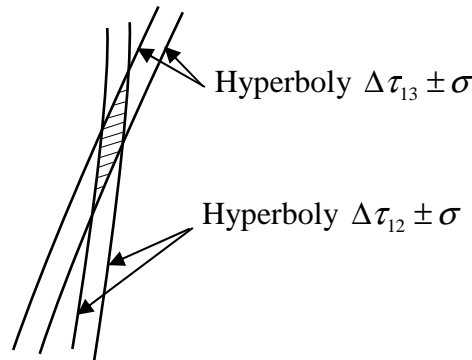
$$\Delta \hat{x}_t = H^{-1} \Delta \rho, \quad (3.7)$$

$$\Delta \hat{x}_t = (H^T H)^{-1} H^T \Delta \rho. \quad (3.8)$$

3.1.2 Přesnost polohy určení cíle

Tak jako je každé měření zatíženo chybou, je tomu tak i v případě měření rozdílů časů a určené polohy cíle. Vznik této chyby lze snadno zachytit rozštěpením hyperboly na oblast vymezenou dvojicí hyperbol. Vzniklá oblast odpovídá rozdílu pseudovzdáleností $\Delta \rho_i \pm$ chyba. Hodnota odpovídá zvolené pravděpodobnosti údaje – například 99 % výskytu cíle. Pro takový případ, tedy průsečíkem dvou takových oblastí, již není bod, ale jistá oblast. Velikost vzniklé oblasti závisí na velikosti chyby měřených rozdílů časů a na umístění stanic.

Pomocí grafické ilustrace můžeme znázornit chyby jako průnik čtyř křivek (v našem případě dvě dvojice hyperbol), ovšem i toto grafické znázornění nebude přesně vystihovat chybu měření. Tato nepřesnost je určena tím, že chyba měření času je spojitá náhodná veličina a jakákoliv pevná hranice ji nemůže popsat přesně. Vzniklý průnik dvou dvojic hyperbol vymezuje ohraničenou oblast, kde se cíl nachází s určitou pravděpodobností.



Obrázek 11 - Zobrazení vzniku chyby

Použitím více měřících stanic lze chybu potlačit. Zvýšení celkové přesnosti lze dosáhnout průměrováním většího množství vstupních hodnot s nezávislými chybami.

Další často používaný způsob popisu náhodné veličiny je rozptyl, který popisuje „výkon“ chyby. Pro popis této chyby použijeme kovariační matici souřadnic $\text{cov}(x)$, která obsahuje rozptyly (na diagonále) a obsahuje i kovariance, které popisují vzájemnou závislost chyb jednotlivých souřadnic určené polohy cíle. Velikost chyby se pak vypočítá z chyby vstupních proměnných podle vztahu 2.8, kde matice \mathbf{H} je linearizací modelu měření.

$$\text{cov}(x) = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \text{cov}(\rho) \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \quad (3.9)$$

Za předpokladu, že statistické vlastnosti rozdílů časů měřených na všech stanicích jsou stejné, a že chyby měření ρ_i jsou nezávislé, bude matice $\text{cov}(\rho)$ diagonální. σ_i^2 označuje rozptyl měření času.

$$\text{cov}(\rho) = c^2 \cdot \sigma_i^2 \cdot \mathbf{I} \quad (3.10)$$

Platí-li tento předpoklad, potom lze vztah pro kovariační matici polohy zjednodušit:

$$\text{cov}(x) = c^2 \cdot \sigma_{TOA}^2 \cdot \underbrace{(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}}_D \quad (3.11)$$

K praktickému popisu vlastností systému se používají charakteristiky zhoršení přesnosti DOP (Dilution of precision). Tyto charakteristiky zhoršení přesnosti jsou definovány jako poměr směrodatné odchylky polohy určené systémem a odchylky vstupního měření pseudovzdálenosti. Velmi často se definují tyto charakteristiky pro jednotlivé směry – pro horizontální polohu (HDOP) a vertikální souřadnici (VDOP). Tyto vlastnosti závisí vždy na poloze cíle. Parametry HDOP a VDOP lze vyjádřit pomocí prvků rozptylové matice D (definována v předchozím vzorci číslo 3.11) následujícím způsobem [11]:

$$HDOP = \sqrt{D_{1,1} + D_{2,2}} \quad (3.12)$$

$$VDOP = \sqrt{D_{3,3}} \quad (3.13)$$

3.2 Beamforming

Beamforming se používá v oblastech získání směru příchodu (DOA), detekování přítomnosti určitých signálů, zvýraznění signálu v záznamu ovlivněném šumem, ostatními nežádoucími zdroji signálu a odrazy. Bývá popsán jako prostorový filtr, který je zařazen na vstupu sensorového pole a má za úkol zajistit určitý vzor směrovosti. Prostorová filtrace se provádí podle následujících kroků:

- synchronizace,
- vážené sčítání.

Proces synchronizace spočívá ve zpoždění či urychlení výstupu každého senzoru o vhodnou hodnotu času tak, aby části signálu přicházející z požadovaného směru byly synchronizovány. V tomto kroku je zapotřebí určit časový rozdíl příchodů jednotlivých signálů (TDOA). Tyto časové rozdíly se určují z měření na sensorovém poli za použití k tomu určených technik odhadu časového zpoždění.

V procesu váženého sčítání se váží sladěné signály, a následně se sčítají dohromady, aby ve výsledku vytvořily jediný výstup.

Oba předchozí procesy významně ovlivňují vytváření výsledné přijímací charakteristiky. Směr natočení řídí synchronizační část a šířku hlavního laloku řídí vážené součty. Velká pozornost je často věnována právě váženým součtům a obzvláště stanovení váhovacích koeficientů. Pro mnoho aplikací jsou váhovací koeficienty získány na základě požadované přijímací charakteristiky. Obvykle je ale výhodnější pro odhad koeficientů využít adaptivní způsob založený na charakteru konkrétního signálu a šumu.

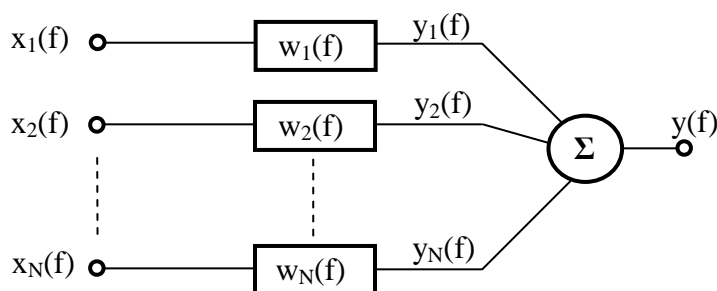
Beamformery, tedy tvarovače paprsku založené na prostorové filtraci, byly navrženy pro úzkopásmové signály, které mohou být charakterizovány jediným kmitočtem. Beamformery pro širokopásmové signály s bohatým kmitočtovým obsahem

(např. širokopásmový šum, nebo řeč) nebudou poskytovat stejnou přijímací charakteristiku na různých kmitočtech a šířka paprsku se bude snižovat s rostoucím kmitočtem – jde tedy o nepřímou úměru. Tato nepřímá úměra je zapříčiněna vzájemnou vzdáleností senzorů v poli vůči velikosti vlnové délky na různých kmitočtech, které signál obsahuje. Při použití tohoto systému pro jiný směr natočení paprsku, než je úhel dopadajícího signálu, dojde k filtraci nízkých kmitočtů spektra signálu. Dalším zkreslujícím problémem je šum, který přichází z odlišného směru, než je natočení tvarovače paprsku. Tento šum nebude potlačen stejnoměrně v celém jeho spektru, což vede k rušivým efektům na výstupu sensorového pole. Z tohoto důvodu byly vyvinuty metody širokopásmového beamformingu s neměnnou odezvou [14].

Pomocí fixního či adaptivního tvarovače je dosaženo selektivity paprsku. Pro oba tyto tvarovače platí, že mohou mít jak úzkospektrální, tak širokospektrální vlastnosti. Ziskem rozumíme zlepšení směrovosti oproti všesměrové charakteristice.

Odhad příchodu signálu se určuje pomocí několika úzkospektrálních tvarovačů a z těchto tvarovačů dostaneme následně jednotlivými kombinacemi odhad příchodu signálu.

Rozdělení tvarovačů je možné do dvou základních skupin. První skupinu tvoří fixní tvarovače, pro které je charakteristické, že používají pro všechny senzory v poli stejné váhy či koeficienty. Po dobu operace se signálem je u této skupiny časové zpoždění ze všech senzorů stejné. Dalšími důležitými vlastnostmi je, že fixní tvarovač musí znát polohu senzoru a příchod akustické vlny. Jednotlivé váhy jsou nastavené stejně. Proto energie, která dopadá na jednotlivé kanály tvarovače, klesá pozvolna. Výhoda fixního tvarovače spočívá v jeho jednoduchosti, viz obrázek číslo 12.



Obrázek 12 - Schématické znázornění fixního tvarovače

Druhou skupinou jsou adaptivní tvarovače, které obecně kombinují informaci o přijímaném signálu. Podle toho aktuálně nastavují filtraci na jednotlivých prvcích, a tím se snaží zlepšit vlastnosti přijímaného signálu. Důležitou vlastností je, že ve směru

přijímaného signálu musí být konstantní frekvenční charakteristika. Dalším omezením tohoto typu tvarovače je nemožnost přijímat nekoherentní difusní šum. V opačném případě se tvarovač chová jako fixní.

Pro tvarovače je specifické, že zpracování signálu se provádí v kmitočtové oblasti, což znamená, že každý signál přijatý senzorem se transformuje do frekvenční oblasti. Tento převod signálu do frekvenční oblasti je proveden pomocí diskrétní Fourierovy transformace. Po transformaci je signál upraven jednotlivými vahami filtru. Poté dochází k sečtení signálů, a následně ze součtového členu dostáváme výsledný signál.

Výstup (delay and sum) tvarovače popisuje rovnice:

$$y(f) = \sum_{n=1}^N w_n(f)x_n(f) \quad (3.14)$$

Ovšem častěji se pro zápis používá maticový tvar, který je popsán v následující rovnici:

$$y(f) = \sum_{n=1}^N w_n(f)x_n(f), \quad (3.15)$$

kde $w(f)$ jsou váhy vektoru a $x(f)$ je datový vektor. Tyto vektory vyjádříme pomocí transponované matice:

$$w(f) = [w_1(f) \dots w_n(f) \dots w_N(f)]^T \quad (3.16)$$

$$x(f) = [x_1(f) \dots x_n(f) \dots x_N(f)]^T \quad (3.17)$$

Pro použití popisované metody je zapotřebí dokonalá znalost spektrálních vlastností zdroje i šumu na pozadí. Ty ovšem velmi často neznáme. Fyzická realizace odhadu metodou maximální věrohodnosti vyžaduje nelineární řešení optimalizace problému. V odborné literatuře je možné dohledat celou řadu iteračních metod, jako jsou metoda Newton-Raphsonova nebo metoda největšího spádu. Tvarovač nachází uplatnění zejména v aplikacích zachycení řeči. Vzhledem k účinnosti a dostačující výkonnosti ostatních metod bývá tvarovač použit pouze zřídka. Tato metoda bývá nepřesná a citlivá na počáteční hledání, proto je její uplatnění spíše porovnávací než vyhledávací. Z výše zmíněných důvodů lze tuto metodu shrnout jako nevhodnou pro aplikace v reálném čase [11], [12].

3.3 High resolutions spectral estimation

Metody spektrálního odhadu vysokého rozlišení využívají spektrální analýzu vysokého rozlišení, jakou je například spektrální odhad minimální odchylky (MV – z anglického „Minimum Variance“), autoregresivní modelování nebo jednu z nejrozšířenějších metod vícenásobné klasifikace signálu (MUSIC – z anglického „Multiple Signal Classification“). Vhodné využití algoritmů implementujících metody MV a MUSIC je pro pole jak

prostorové i rovinné. Tyto algoritmy dokáží lokalizovat i zdroje, které jsou umístěné blízko sensorového pole. Ovšem metoda využívající autoregresivní modelování je vhodná pouze k lokalizaci vzdáleného pole. V praxi nejsou metody využívající spektrálního odhadu vysokého rozlišení využívány k lokalizaci řečových signálů, a to z důvodů využití korelační matice. Ta vznikne průměrováním dat v intervalu, ve kterém jsou šum a parametry odhadu neměnné zdroje.

Výhodou této metody založené na spektrálním odhadu vysokého rozlišení je schopnost lokalizovat více zdrojů signálu i v případě, že jsou zdroje velmi blízko sebe. Pro tento případ metoda vykazuje znatelně lepší výsledky než metody založené na tvarování přijímací charakteristiky. Oproti předešlým metodám tyto metody vykazují mnohem ostřejší špičky odezvy pole v místech, kde se vyskytuje zdroj signálu. Také oproti metodám tvarování přijímací charakteristiky jsou tyto metody znatelně méně výpočetně náročné. Protože většina lokalizačních technik založená na odhadu vysokého rozlišení je vyvinuta pouze pro aplikaci na úzkopásmových signálech, je metoda uplatňována například v radarové lokalizaci. V případě, že by tato metoda byla aplikována na širokopásmový signál, došlo by k razantnímu zvýšení jejích výpočetních nároků [7].

4 Technické řešení zdroje signálu a sensorového pole

4.1 Vysílač

Vysílaný signál má jisté specifikace, které jsou dány vzdáleností, kterou chceme měřit, potřebným kmitočtem, a je ovlivněn rychlostí šíření ultrazvuku ve vzduchu. Celý vysílač je tvořen třemi obvody, a to dvěma časovači pomocí IO 555 a zesilovačem z několika invertorů.

První integrovaný obvod IO 555 zajišťuje vysílání impulzů. Kdyby se vysílalo nepřetržitě, nebylo by možné přijímaný signál vyhodnocovat. Délka pulzů je nastavena podle vzdálenosti, kterou chceme tímto senzorem vykrývat. Pro pokrytí vzdálenosti 20m je zapotřebí vyslat signál a čekat minimálně 60 ms. Tento poměr je dán rychlostí zvuku, která je při teplotě 22 °C $c = 345,24 \text{ ms}^{-1}$, tedy 1m urazí signál za 0,0028965 s. Dále je podstatná vzdálenost, kterou musí urazit. Pro 20m vzdálenost dostaneme tedy dobu letu signálu 0,05793 s, což je zhruba 60 ms. Tyto parametry zpětně vypočítáme ze vzorců pro výpočet doby impulzů IO 555 4.1 a 4.2. Ze vzorce 4.1 získáme požadovanou délku signálu 1 ms a ze vzorce 4.2 získáme potřebných 64 ms. R_1 a R_2 jsou rezistory a C je kondenzátor.

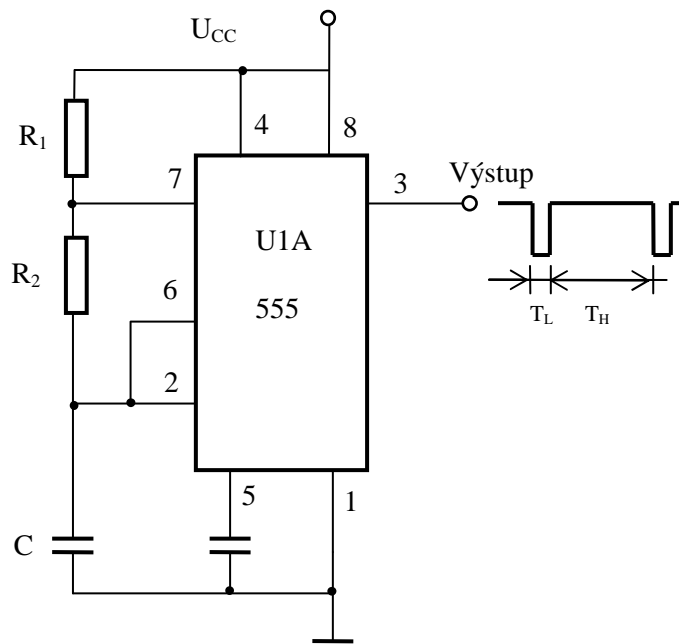
Pro rezistory byly zvoleny tyto hodnoty $R_1 = 9,1 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 150 \text{ k}\Omega$ a kondenzátor $C = 100 \text{ nF}$.

$$T_L = 0,69 \cdot R_2 \cdot C \quad (4.1)$$

$$T_H = 0,69 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C \quad (4.2)$$

$$T_L = 0,69 \cdot 150 \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-3} = 1 \text{ ms}$$

$$T_H = 0,69 \cdot (9100 \cdot 10^3 + 150 \cdot 10^3) \cdot 0,01 \cdot 10^{-6} = 64 \cdot 10^{-3} = 64 \text{ ms}$$



Obrázek 13 - Schéma zapojení první 555

Druhým integrovaným obvodem IO 555 je vytvářen požadovaný ultrazvukový signál. Z důvodu snadné a cenové dostupnosti vysokofrekvenčních reproduktorů je volen kmitočet okolo 40 kHz, který je pro naše účely dostačující. Abychom získali tento kmitočet, použijeme stejný postup jako v případě prvního IO 555, tedy správným zvolením hodnot dosazených do vzorců 4.1 a 4.2. Po dosazení do těchto vzorců získáme dva pulzy o velikosti 12,42 μ s a 12,58 μ s. Pro požadovanou frekvenci byly zvoleny hodnoty rezistorů $R_1 = 1,8 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 220 \text{ }\Omega$ a hodnota kondenzátoru $C = 1000 \text{ pF}$. Po dosazení těchto hodnot do vzorců 4.1 a 4.2 dostaneme časy impulsů. Tyto časy dosadíme do vzorce 4.3 a získáme požadovaný kmitočet.

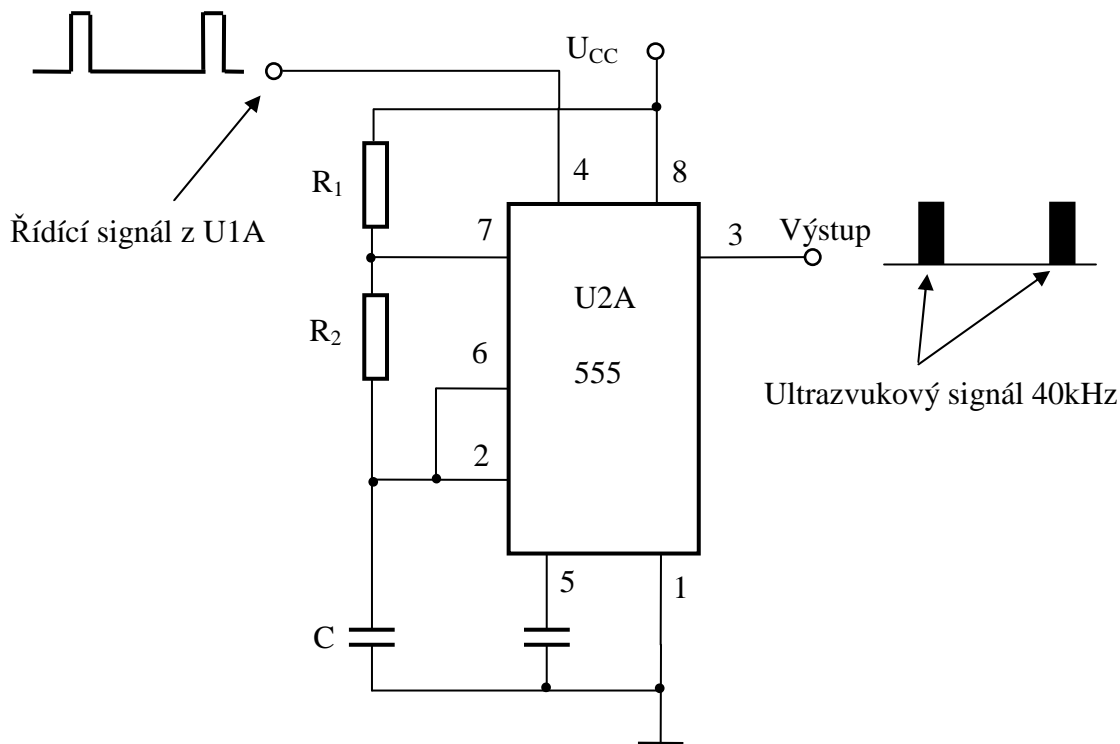
$$T_L = 0,69 \cdot 18 \cdot 10^3 \cdot 1000 \cdot 10^{-12} = 12,42 \cdot 10^{-6} = 12,42 \mu\text{s}$$

$$T_H = 0,69 \cdot (18 \cdot 10^3 + 220) \cdot 1000 \cdot 10^{-12} = 12,58 \cdot 10^{-6} = 12,58 \mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{(T_L + T_H)} \quad (4.3)$$

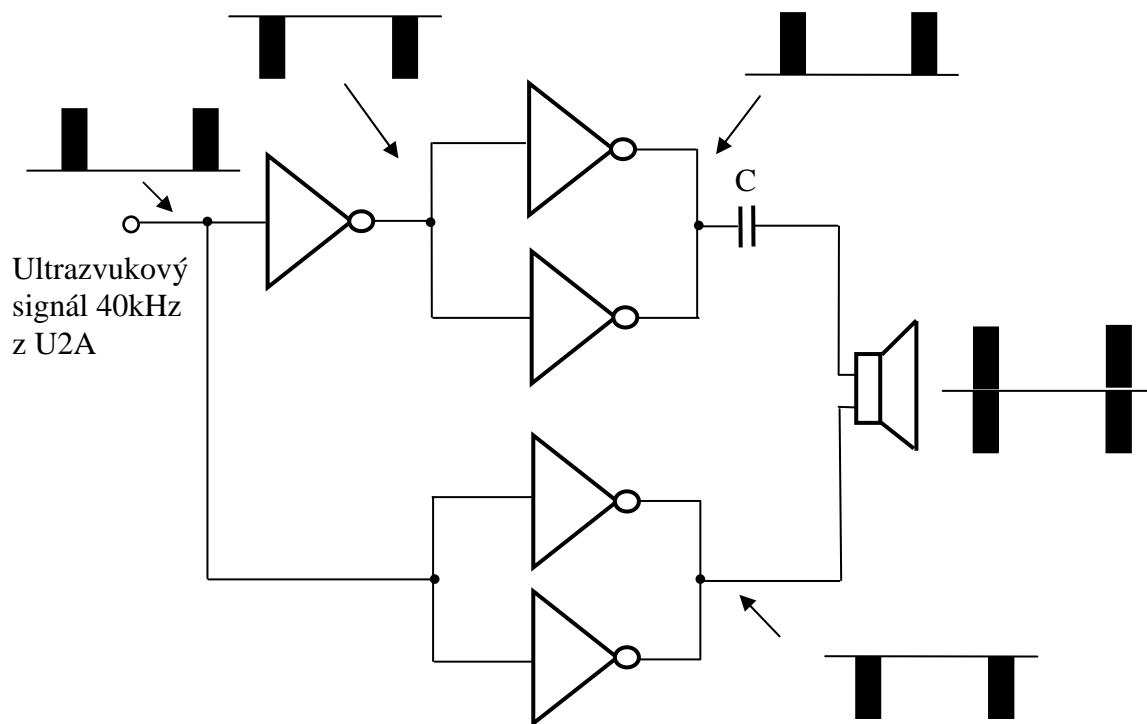
$$f = \frac{1}{(12,42 + 12,58) \cdot 10^{-6}} = 40,016 \cdot 10^3 = 40 \text{ kHz}$$

Pro zaručení pulsního vysílání je na vstup druhého IO 555 přiveden invertovaný signál z výstupu prvního IO 555. Díky tomu získáme vysílání ultrazvukového signálu o kmitočtu 40 kHz po dobu 1 ms, poté následuje 64 ms odmlka pro příjem odraženého signálu. Schéma tohoto obvodu je na následujícím obrázku.



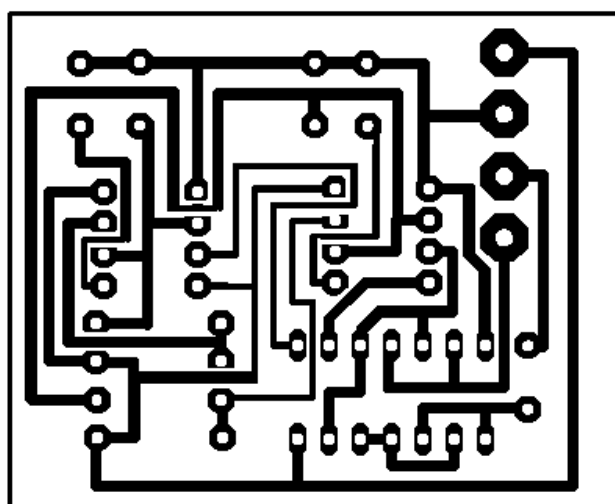
Obrázek 14 - Schéma zapojení druhé 555

Další součástí vysílače je invertor, který díky svému zapojení slouží jako zesilovač výstupního signálu. Signál měl doposud charakter obdélníkového pulsu s rozsahem 0-9 V. Díky integrovanému obvodu 4069, který je tvořen 6 hradly invertorů, můžeme tento signál otočit či fázově posunout. Správným zapojením jednotlivých hradel tedy dostaneme signál s charakterem obdélníkového pulsu o dvojnásobné amplitudě s rozsahem -9 V až +9 V. Touto úpravou signálu je zvětšen výkon výstupního signálu, a tím se značně zlepšila i možnost detekce. Signál je do prostoru vyzářen pomocí ultrazvukového reproduktoru. Tento ultrazvukový reproduktor je schopen vyzářit vysokofrekvenční kmitočet 40 kHz [15].



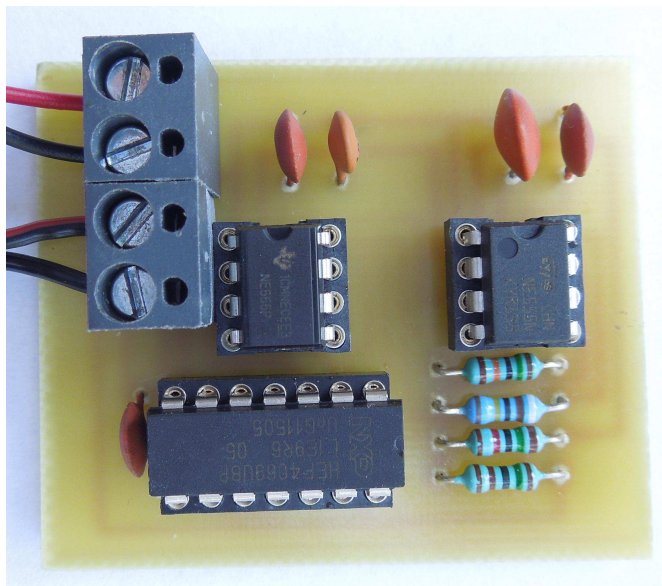
Obrázek 15 - Schéma zapojení hradlového zesilovače

4.1.1 DPS vysílače



Obrázek 16 - DPS vysílače ze strany spojů

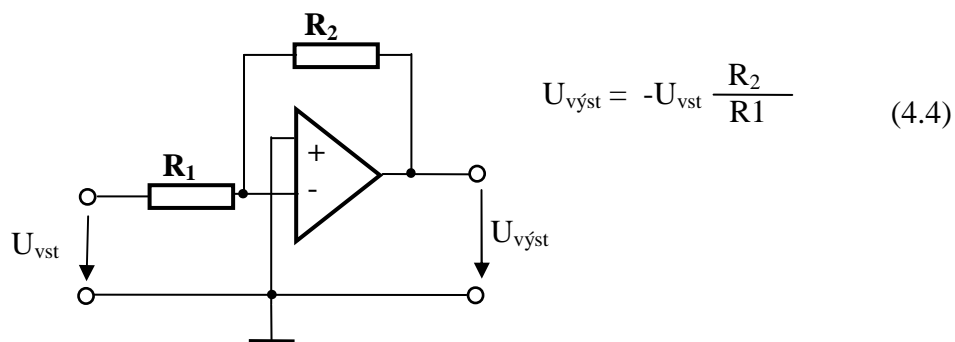
Výsledná podoba vysílače je na obrázku 17, kde první svorka je +9 V, druhá 0 V, pro napájení byla použita 9V baterie. Třetí svorka je +výstup na ultrazvukový senzor a čtvrtá svorka je –výstup na ultrazvukový senzor.



Obrázek 17 - Vysílač - DPS osazená součástkami

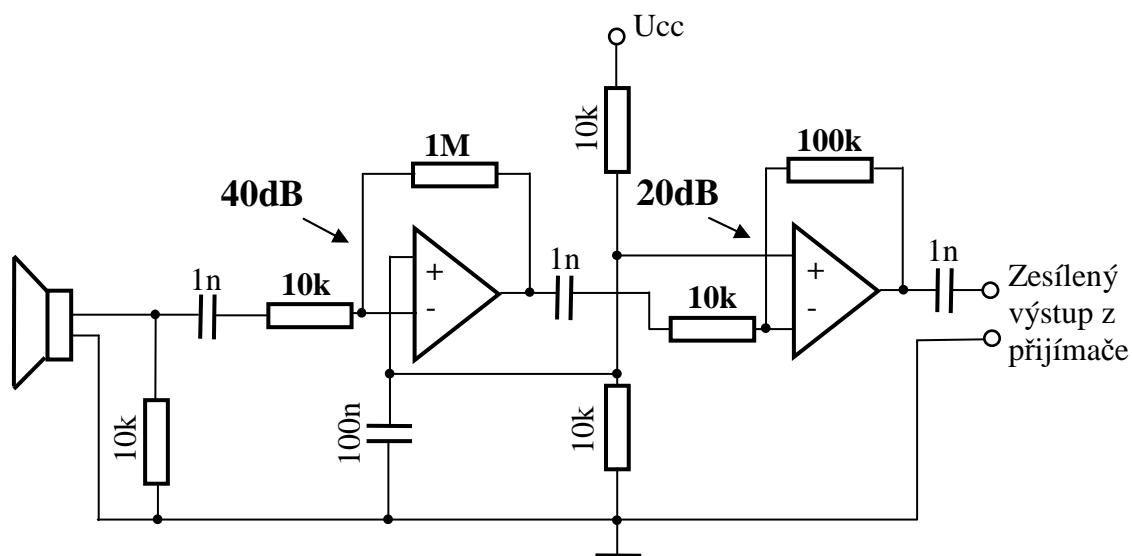
4.2 Přijímač

Pro příjem přímého signálu vyslaného vysílačem je použita stejná ultrazvuková vložka, jako je použita pro vysílání. Signál, který prochází od vysílače k přijímači, je postupně zeslabován průchodem prostředím a ztrácí tedy na své intenzitě. Aby byl tento zeslabený signál použitelný pro další zpracování, je zapotřebí ho zesílit o 60 dB, tedy 1000 krát. Zesílení je provedeno pomocí nízkošumového operačního zesilovače NJM4580L, který obsahuje dvojici operačních zesilovačů. Pomocí vhodné volby hodnot odporů je dosaženo zesílení prvního operačního zesilovače 100krát, tedy 40 dB, a zesílení druhého operačního zesilovače 10krát, tedy 20 dB. Hodnoty odporů byly voleny podle vzorce pro invertující zapojení operačního zesilovače [18].



Obrázek 18 - Invertující zapojení operačního zesilovače [18]

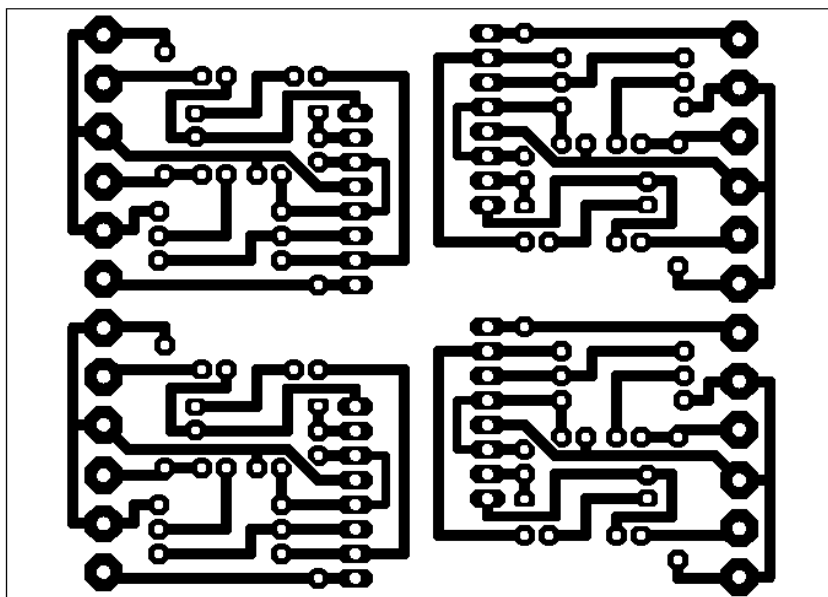
V zesilovačích se obecně používá kladné a záporné napětí. U tohoto zapojení je použito jednotné napájecí napětí $U_{cc} = +9\text{ V}$. Z tohoto důvodu je tedy přivedeno kladné napětí na kladný vstup. Přijímač je znázorněn na obrázku.



Obrázek 19 - Schéma přijímače pro jeden kanál

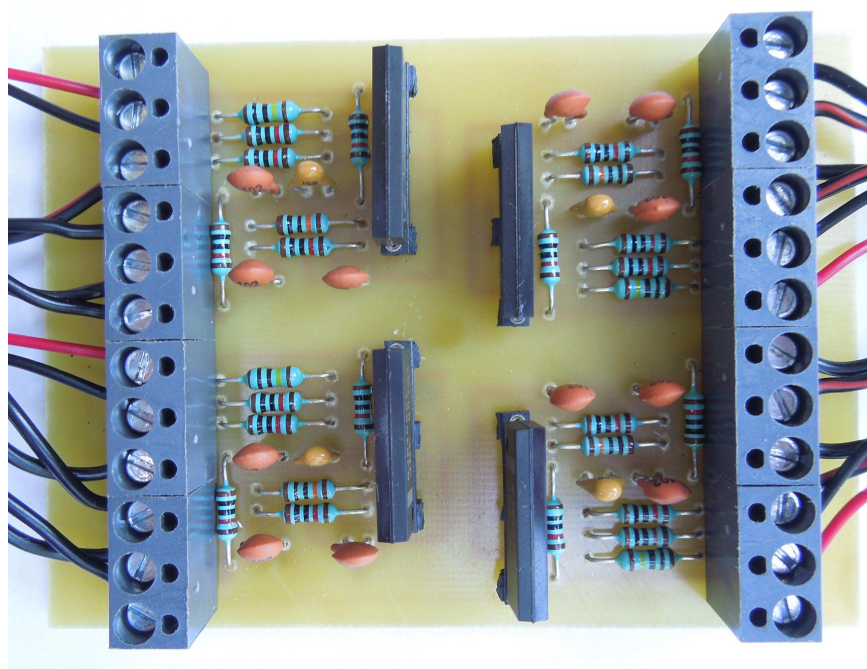
V kapitole 4.2 byl popsán jeden přijímač. Pro tuto diplomovou práci byly použity čtyři přijímače, které jsou na jedné DPS, ovšem vzájemně oddělené. Aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování jednotlivých přijímačů, je pro napájení každého zesilovače použita 9V baterie.

4.2.1 DPS přijímačů



Obrázek 20 - DPS přijímačů ze strany spojů

Výsledná podoba přijímačů je na obrázku 21. Popis svorek na levé straně: první svorka je +9 V, druhá 0 V, třetí svorka je +vstup na ultrazvukový senzor, čtvrtá svorka je -vstup na ultrazvukový senzor, pátá svorka je +výstup z přijímače a šestá svorka je -výstup z přijímače. Těchto šest svorek tvoří jeden přijímač, popis zbývajících svorek na levé straně je shodný s předchozím popisem. Na pravé straně je popis svorek totožný s popisem svorek na levé straně s tím rozdílem, že pro pravou stranu je popis v opačném pořadí než na levé straně (tedy zespoda nahoru).



Obrázek 21 - Přijímače - DPS osazená součástkami

4.3 Ultrazvukový senzor

Pro tuto práci byl zvolen univerzální ultrazvukový přijímač/vysílač. Jedná se o ultrazvukový senzor BPU-1640IOAWH12 od společnosti BESTAR ELECTRONICS INDUSTRY CO.



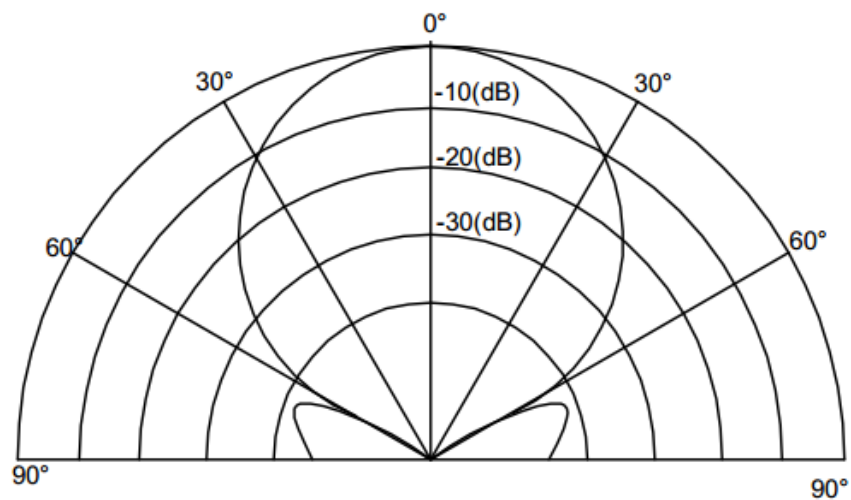
Obrázek 22 - Ultrazvukový senzor [19]

Parametry pro tento univerzální vysílač/přijímač jsou v následující tabulce.

Tabulka 3 - Parametry vysílače/přijímače [17]

Technické údaje	Hodnota
Frekvence	40kHz
Výkon vysílače	min 115dB (30cm/10Vrms sinusový signál)
Citlivost přijímače	min -74dB/V/μ bar
Kapacita	2000pF ± 20% na 1kHz
Pracovní teplota	-30 až 85 °C
Přípustné vstupní napětí	120 Vp-p (40kHz)

Z vyřazovací charakteristiky (obrázek 23) je zřejmé, že používané senzory v této diplomové práci jsou poměrně směrové. Při pootočení přijímače přibližně o 10 ° se úroveň přijímaného signálu sníží o 3 dB.



Obrázek 23 - Vyřazovací charakteristika ultrazvukového senzoru [17]

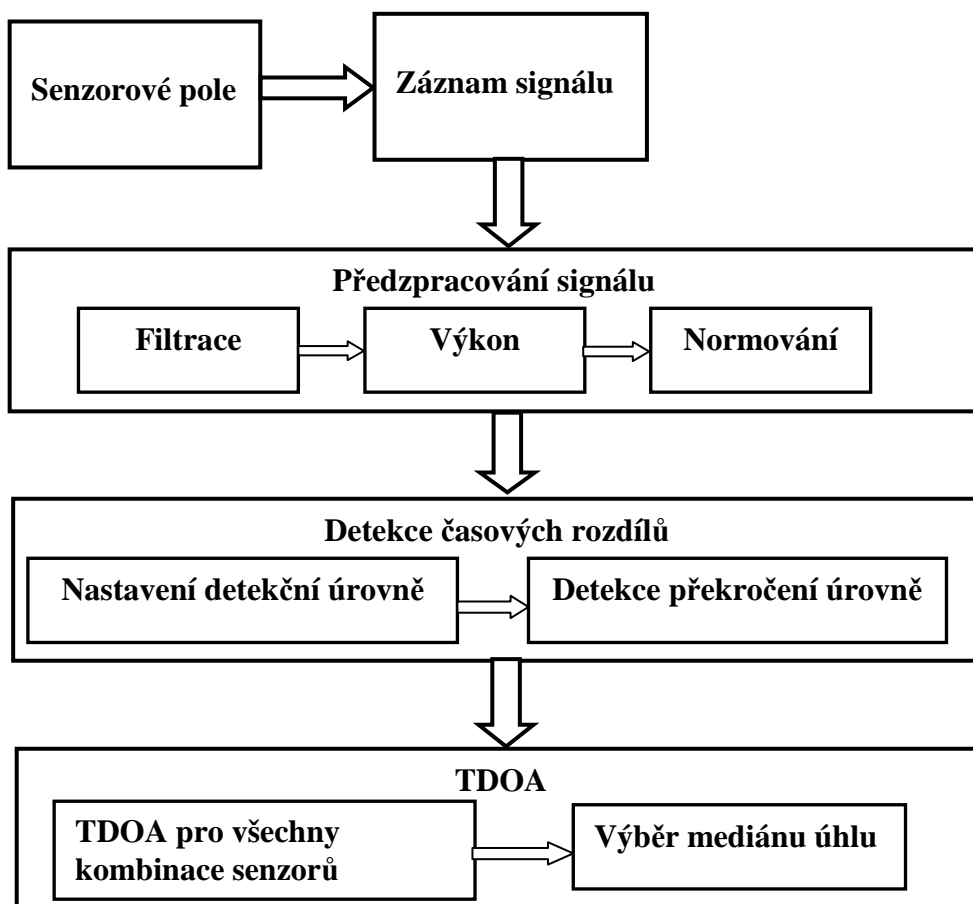
5 Záznam a zpracování signálu

Záznam a zpracování signálu probíhalo odděleně. Pro záznam signálů byl použit čtyřkanálový osciloskop, zpracování signálu probíhalo v Matlabu.

Signál z pole čtyř senzorů je nejprve zaznamenán s dostatečnou vzorkovací frekvencí. Pro správnou detekci časů příchodu signálu je signál nejprve zbaven šumu, následně je vypočten výkon signálu, který po normování umožní jednodušší detekci počátku signálů, a také zvýrazní užitečný signál proti zbylému šumu.

Po nastavení vhodné detekční úrovně jsou nalezeny počátky přijímaných signálů. Vzhledem k tomu, že senzory v poli jsou oproti zdroji signálu prakticky v jednom místě, lze detekční úroveň nastavit stejnou pro všechny kanály.

Pomocí metody TDOA se určí úhel příchodu. Využit je model ideálního chování systému a hledání největší shody mezi simulovanými a měřenými hodnotami časových rozdílů.



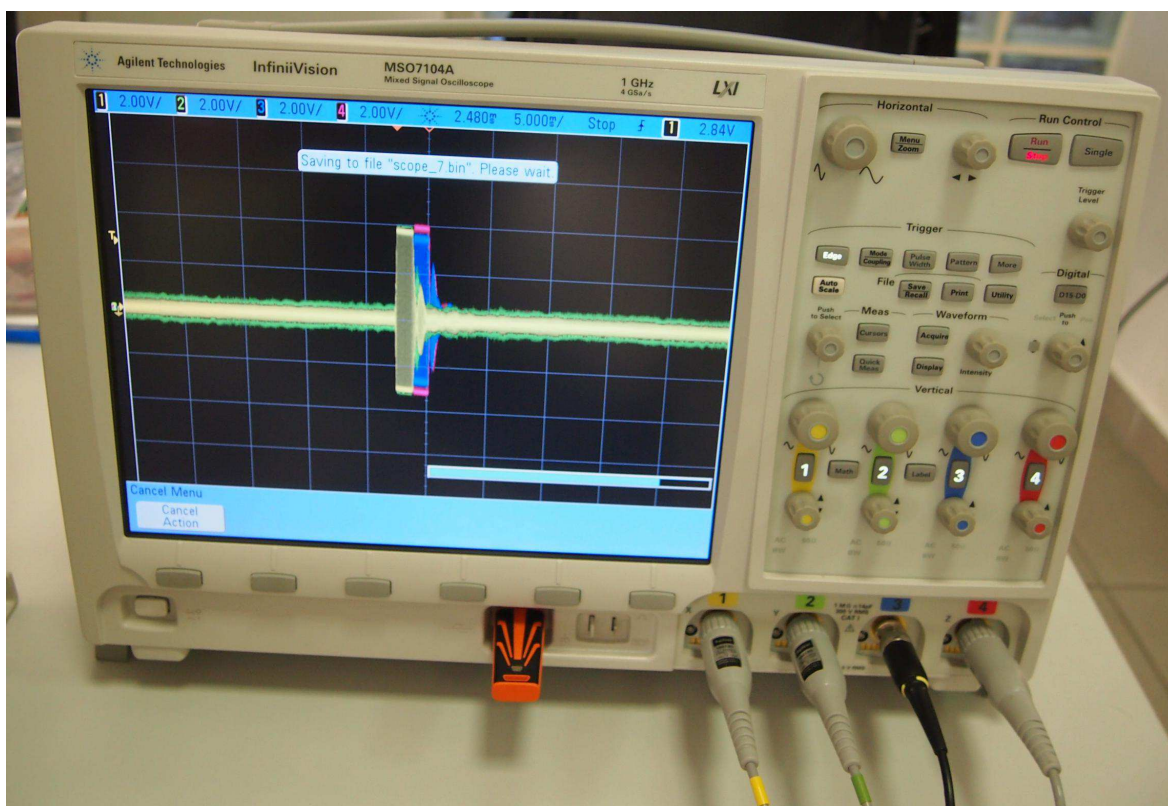
Obrázek 24 - Blokové schéma zpracování

5.1 Popis blokového schéma průběhu zpracování

V následujících podkapitolách jsou podrobněji popsány dílčí operace naznačené v blokovém schématu z obrázku č. 24.

5.1.1 Záznam signálu

Záznam jednotlivých kanálů musí být synchronní. Zpracovávaný datový tok zaznamenaných signálů by měl pak být optimálně paralelní. Záznam byl proveden pomocí digitálního osciloskopu MSO7104A 1GHz 4+16CH 4GSa/s od firmy Agilent Technologies. Specifikace přístroje je na adrese <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?pn=MSO7104A>.



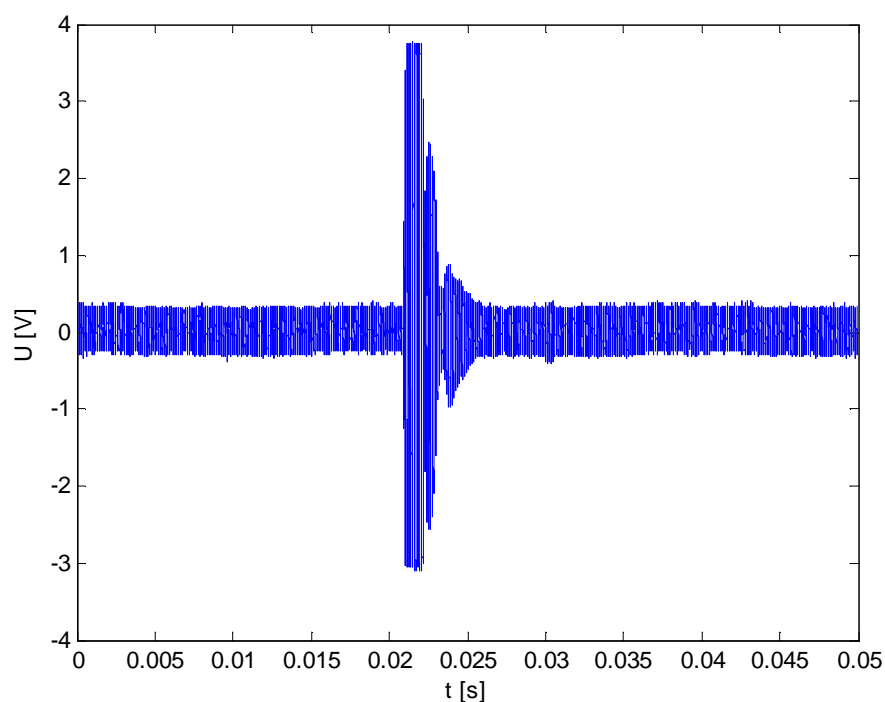
Obrázek 25 - Záznam signálu pomocí digitálního osciloskopu

Na tomto obrázku číslo 25 je vidět paralelní synchronní záznam signálů pro všechny čtyři senzory.

V rámci diplomové práce bylo provedeno více než 30 testovacích záznamů signálů. Po odladění hardwaru, správném nastavení kmitočtů a referenčním určování úhlu bylo provedeno 51 záznamů, které jsou dále vyhodnoceny v kapitole 6.

Senzorové pole může být využito k určení polohy zdroje/zdrojů vlnění v rovině nebo v prostoru, zjištění spektrálních vlastností vlnění, jež zdroj vyzařuje a zjištění druhu zdroje. Pro účely této diplomové práce je použito senzorové pole pouze pro určení směru zdroje.

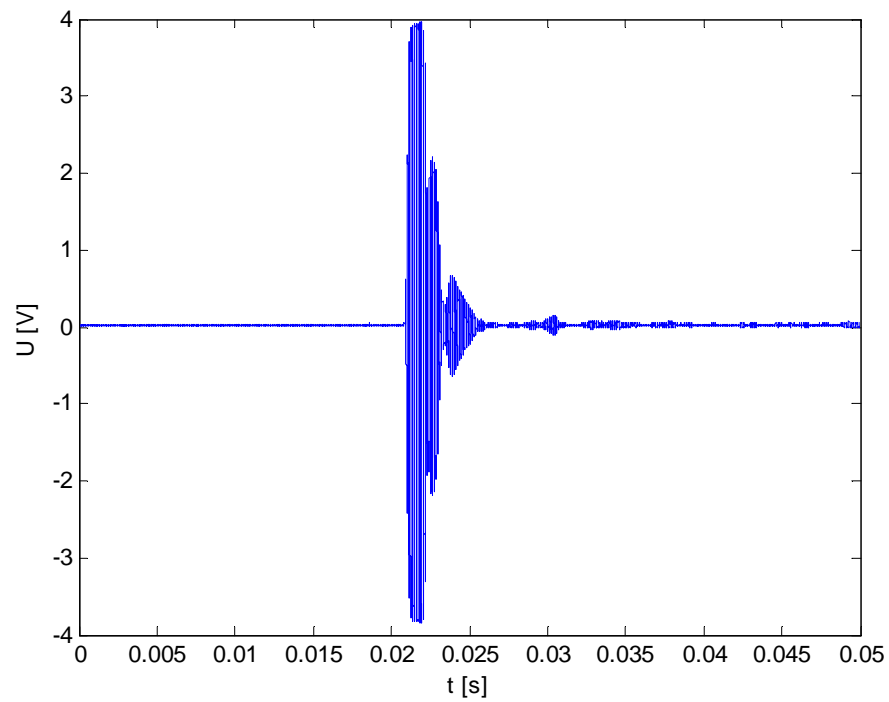
Pro demonstraci dalšího zpracování zaznamenaného signálu byl použit signál z prvního čidla pro zaznam_10.mat. Na dalším obrázku číslo 26 je zobrazený záznam signálu pro jedno čidlo.



Obrázek 26 - Zaznamenaný signál

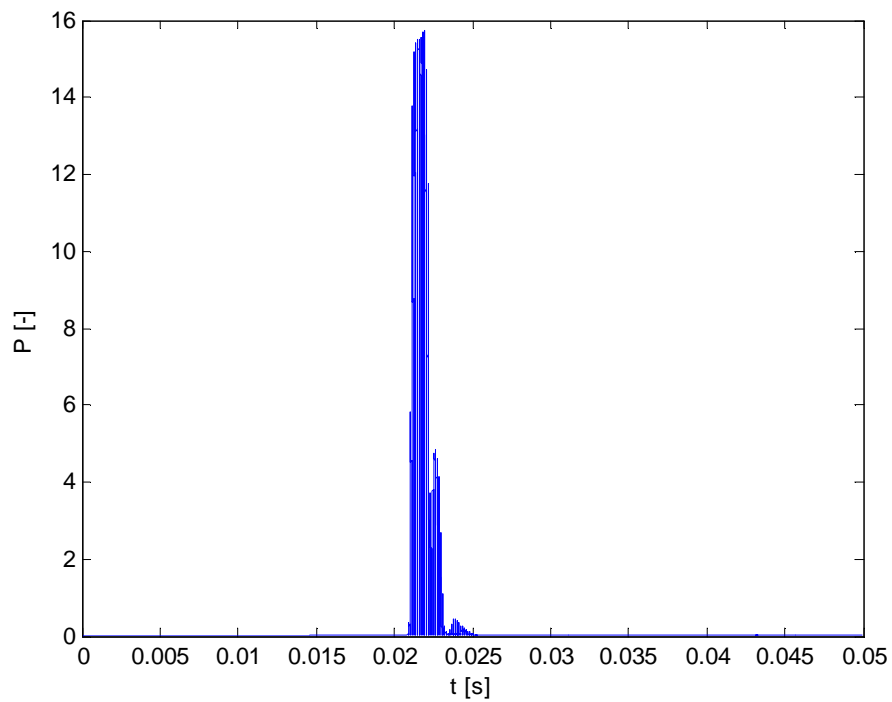
5.1.2 Předzpracování signálu

Prvním krokem předzpracování signálu je filtrace signálu, která je uskutečněná dolní propustí pomocí Chebyševova filtru 1 s počtem řádů 5. Touto filtrací se do značné míry odstraní šum.



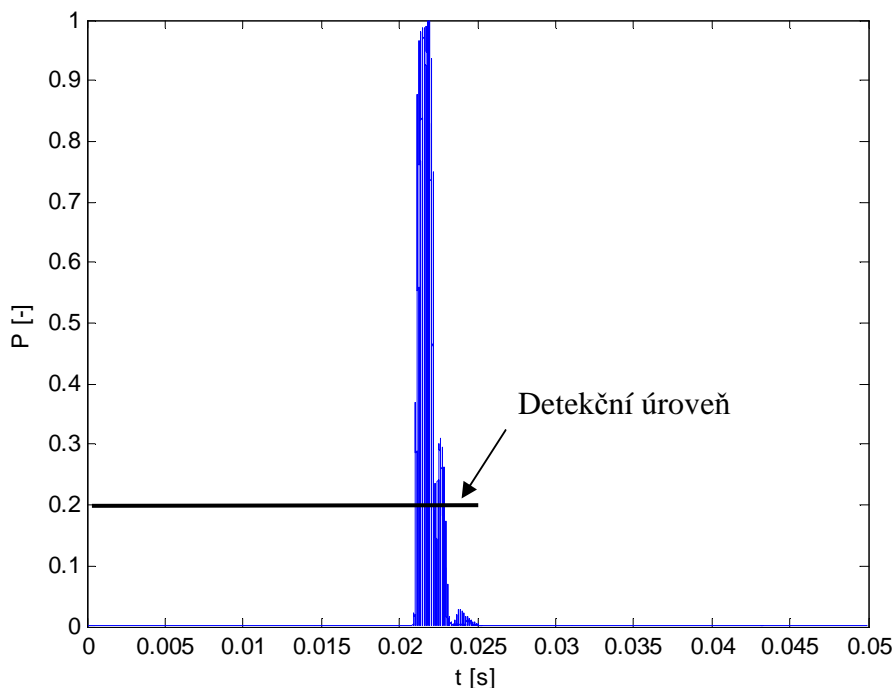
Obrázek 27 - Filtrovaný signál

Druhým krokem je výpočet výkonu z vyfiltrovaného signálu, čímž se odstraní záporné hodnoty signálu a zvýrazní se důležitá složka užitečného signálu oproti šumu.



Obrázek 28 - Výkon signálu

Posledním krokem předzpracování signálu je normování signálu, kdy dojde k podělení jednotlivých vzorků signálu jejich maximem.

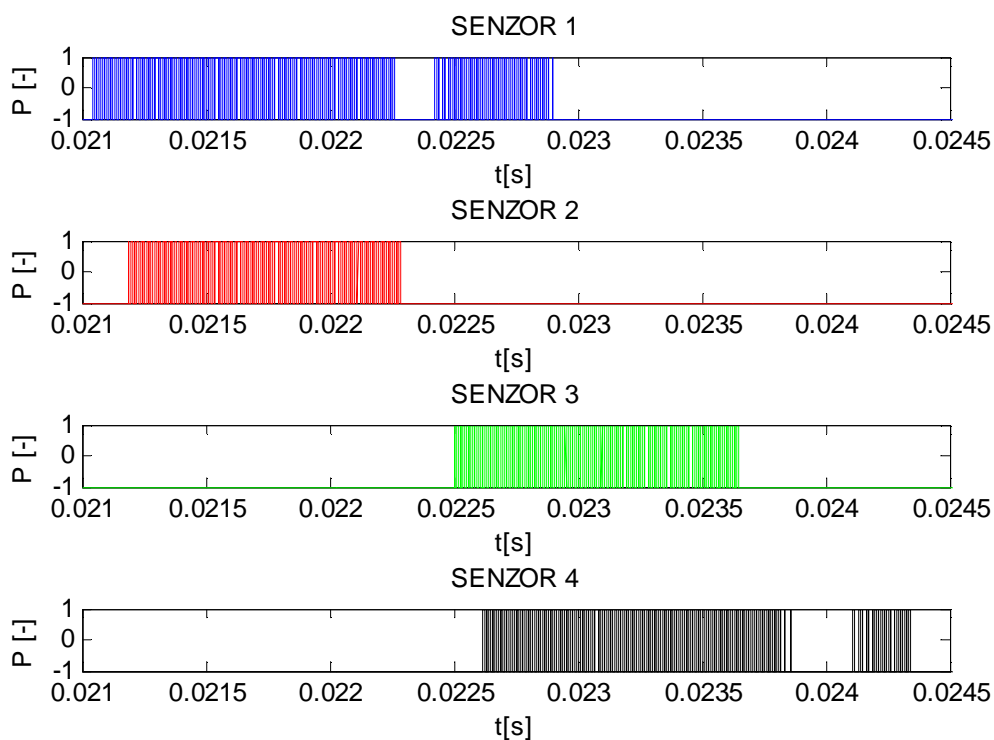


Obrázek 29 - Normovaný výkon signálu s vyznačenou detekční úrovní

5.1.3 Detekce časových rozdílů

V této sekci dochází k nastavení detekční úrovně. Pro tuto práci byla použita detekční úroveň 0,2 V normovaného napětí. Tato úroveň se osvědčila jako nejlepší řešení. Po nastavení detekční úrovně došlo k detekci překročení této úrovně. Jakmile tedy signál překročil detekční úroveň, zaznamenal se záznam z časové osy, tedy začátek signálu. Tímto postupem probíhalo zpracování pro signály ze všech čtyř čidel. Na obrázku číslo 30 je signál ze všech čtyř senzorů pro zaznam_10.mat, který prošel zpracováním popsáním v předešlých odstavcích kapitoly 5.

Operace normování spolu s pevným nastavením detekční úrovně jsou proveditelné při zpracování bez požadavku na zpracování v reálném čase. Při reálné aplikaci by musela být sledována průměrná hodnota šumu ve všech kanálech. Při překročení určité hodnoty nad úrovní šumu by se spustil záznam ve všech kanálech a probíhal by test, zda došlo ke skutečnému příjmu ultrazvukového signálu.



Obrázek 30 - Upravený signál pro všechny čtyři senzory

5.1.4 TDOA

Dalším krokem je pomocí metody TDOA určit úhly příchodu ultrazvukového signálu vysílače pro všechny kombinace senzorů. Z těchto úhlů se mediánem vybere nejpravděpodobnější hodnota úhlu, která je využívána pro další statistické vyhodnocení výsledků. Pokud by se výsledný úhel určoval pouze z jedné kombinace senzorů nebo průměrem ze všech možných kombinací, byl by výsledek zatížen chybnými hodnotami, které vzniknou např. při nesprávné detekci signálu v jednom z kanálů (senzorů).

6 Měření v prostředích s odrazy

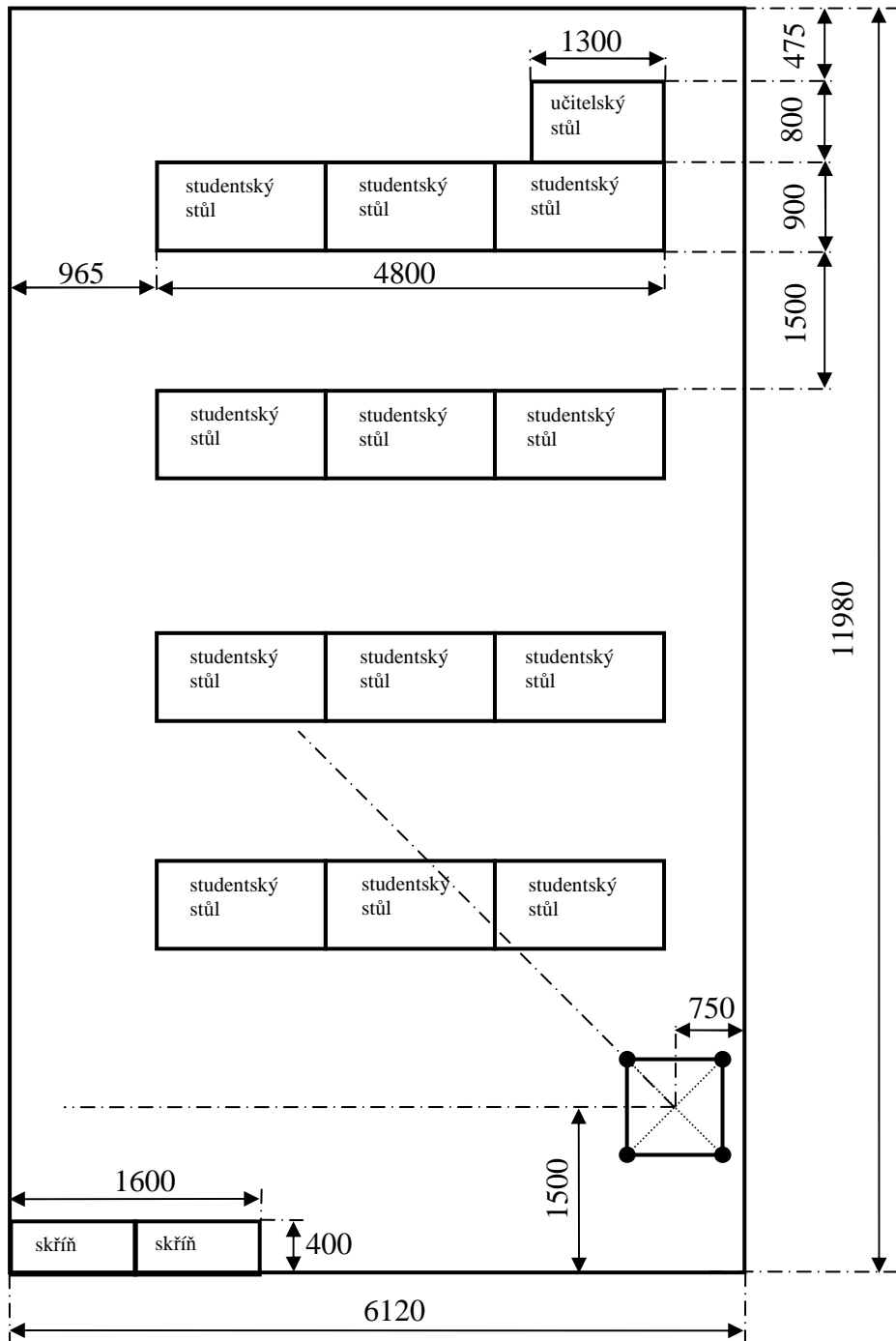
6.1 Měření v učebně EL101

První měření probíhalo v učebně EL101, která se nachází v přízemí Fakulty elektrotechniky a informatiky. Na obrázku číslo 32 je nakreslený schématický plán s uspořádáním učebny. Ve schématu je v levém dolním rohu umístěné sensorové pole čtvercového tvaru. Měření probíhalo pro dva typy pole - jedno s velikostí strany 0,5 m a druhé s velikostí strany 1 m. Vysílač byl umístěn vždy buď v rovnoběžné poloze se sensorovým polem nebo na ose, která byla vychýlená oproti vodorovné poloze pole o 45° směrem k čelu učebny – tak jak je zakresleno ve schématickém plánu učebny. Vysílač se tedy pohyboval po těchto dvou osách pro různé vzdálenosti, které jsou zaznamenané v tabulkách číslo 4 a číslo 5.

Na obrázku číslo 31 je vyfocená reálná situace měření a prostředí učebny.



Obrázek 31 - Sensorové pole v prostředí laboratoře EL101



Obrázek 32 – Schematický plán s uspořádáním učebny EL101

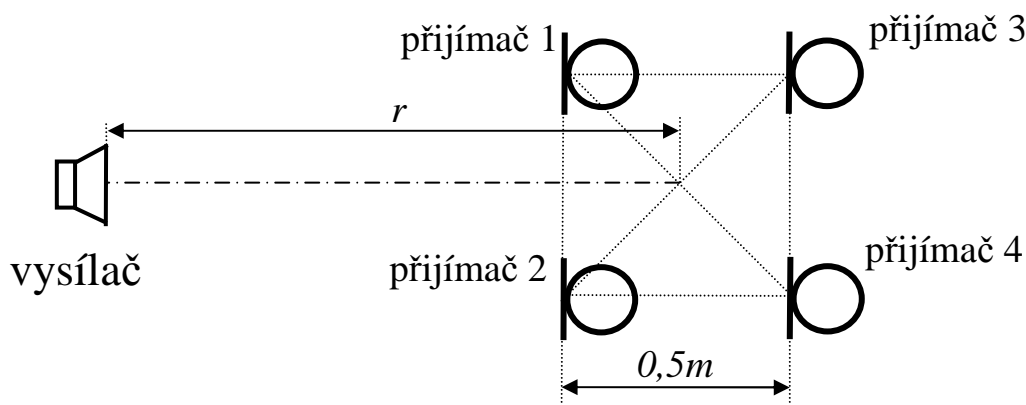
Rozměry místnosti a vybavení jsou vynášené v milimetrech.

Na dalších obrázcích je již pouze výřez pro samotné rozmístění sensorového pole a vysílače. Zaznamenané hodnoty byly pro čtyři následující případy:

6.1.1 Rozmístění pole 0,5 m x 0,5 m

První případ

První konfigurace sensorového pole byla s rozmístěním senzorů 0,5 m x 0,5 m a pohyb vysílače po ose rovnoběžné se základnou sensorového pole. Tato situace je vyobrazena na obrázku číslo 33, kde se vysílač pohyboval ve vzdálenostech 2, 3, 4 a 5 m od středu sensorového pole. Větší vzdálenosti učebna neumožňovala.



Obrázek 33 - Rozmístění sensorového pole 0,5 m x 0,5 m s výhylkou 0°

V následující tabulce jsou název zaznamenaného signálu (název souboru), zpoždění mezi jednotlivými přijímači a vzdálenost vysílače od středu sensorového pole. Vzájemné časové rozdíly se s vzdáleností mírně mění podle vzájemné polohy mezi vysílačem a senzory.

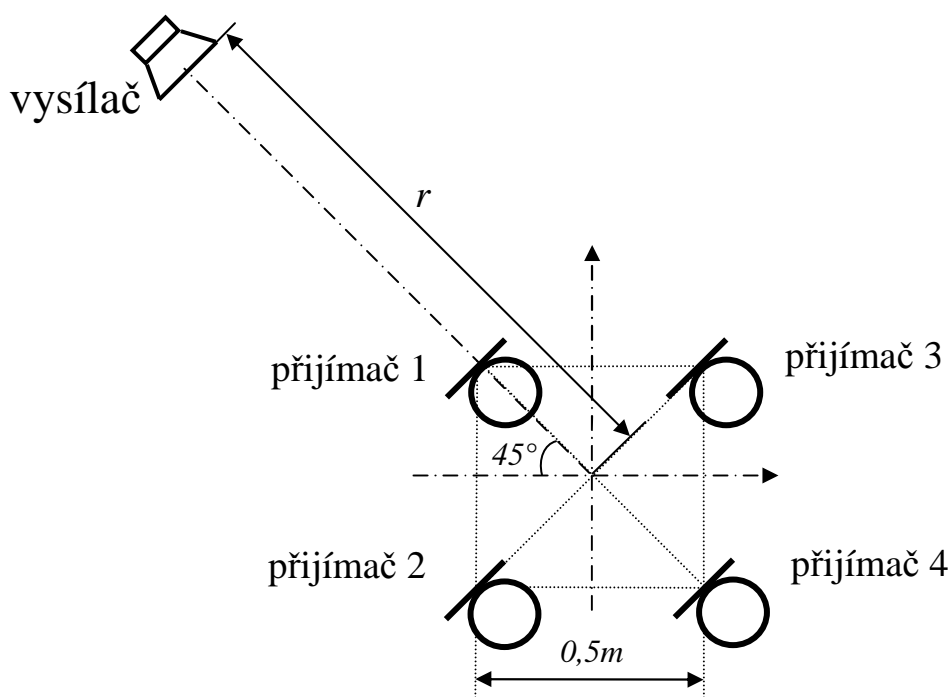
Tabulka 4 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými přijímači pro pole 0,5 m x 0,5 m s výhylkou 0°

Tabulka změřených zpoždění mezi jednotlivými přijímači				
název signálu	$n_2 - n_1$ [ms]	$n_3 - n_1$ [ms]	$n_4 - n_1$ [ms]	r [m]
signal_8.mat	0,031	1,496	1,632	2
signal_9.mat	0,030	1,506	1,666	3
signal_10.mat	-0,113	1,409	1,424	4
signal_11.mat	0,025	1,513	1,562	5

n_1, n_2, n_3, n_4 jsou začátky signálů na jednotlivých přijímačích,
 r je vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Druhý případ

Druhá konfigurace sensorového pole byla s rozmístěním senzorů 0,5 m x 0,5 m a pohyb vysílače po ose, která je vychýlená o 45° oproti předchozímu případu. Tato situace je vyobrazena na obrázku číslo 34, kde se vysílač pohyboval ve vzdálenostech 1,5, 3, 4 a 5 m od středu sensorového pole.



Obrázek 34 - Rozmístění sensorového pole 0,5 m x 0,5 m s výchytkou 45 °

V následující tabulce jsou tyto údaje - název zaznamenaného signálu, zpoždění mezi jednotlivými přijímači, a vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Tabulka 5 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými přijímači pro pole 0,5 m x 0,5 m s výchytkou 45 °

Tabulka změřených zpoždění mezi jednotlivými přijímači				
název signálu	n_2-n_1 [ms]	n_3-n_1 [ms]	n_4-n_1 [ms]	r [m]
signal_12.mat	1,134	1,143	2,134	1,5
signal_13.mat	1,129	0,972	2,063	3
signal_14.mat	1,111	1,037	2,067	4
signal_15.mat	1,088	0,972	2,066	5

n_1, n_2, n_3, n_4 jsou začátky signálů na jednotlivých přijímačích,
 r je vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Vyhodnocení výsledků

V tabulce číslo 6 jsou vypočítané úhly pomocí metody TDOA. Dalším údajem je aritmetický průměr z těchto vypočítaných úhlů a medián určený také z těchto úhlů. V posledním sloupcu je pro porovnání uvedený skutečný úhel.

Tabulka 6 - Vypočítané úhly pro pole 0,5 m x 0,5 m

název signálu	spočítaný úhel [°]					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
signal_8.mat	-0,2	-0,2	0,8	0,1	-0,2	0
signal_9.mat	0,8	0,8	1,1	0,9	0,8	0
signal_10.mat	-0,8	-0,5	3,8	0,8	-0,5	0
signal_11.mat	0,8	0,8	-0,2	0,5	0,8	0
signal_12.mat	44,8	48,0	39,7	44,2	44,8	45
signal_13.mat	50,7	50,8	50,7	50,7	50,7	45
signal_14.mat	44,8	49,6	44,3	46,2	44,8	45
signal_15.mat	47,9	48,2	47,8	48,0	47,9	45

V tabulce číslo 7 jsou vypočítané chyby úhlů ve stupních, dalším údajem je aritmetický průměr a medián. Obě tyto hodnoty jsou určeny z chyb jednotlivých úhlů. I tyto hodnoty jsou ve stupních. V posledním sloupcu je pro porovnání uvedený skutečný úhel.

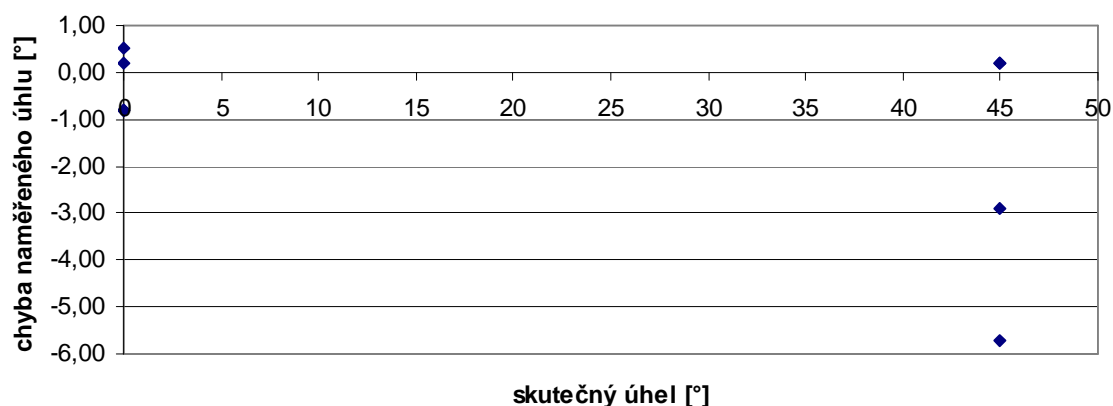
Tabulka 7 - Chyby úhlů ve stupních pro pole 0,5 m x 0,5 m

název signálu	chyba ve stupních pro					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
signal_8.mat	0,20	0,20	-0,80	-0,13	0,20	0
signal_9.mat	-0,80	-0,80	-1,10	-0,90	-0,80	0
signal_10.mat	0,80	0,50	-3,80	-0,83	0,50	0
signal_11.mat	-0,80	-0,80	0,20	-0,47	-0,80	0
signal_12.mat	0,20	-3,00	5,30	0,83	0,20	45
signal_13.mat	-5,70	-5,80	-5,70	-5,73	-5,70	45
signal_14.mat	0,20	-4,60	0,70	-1,23	0,20	45
signal_15.mat	-2,90	-3,20	-2,80	-2,97	-2,90	45
signal_16.mat	0,20	-4,40	3,60	-0,20	0,20	45

V tabulce číslo 8 jsou uvedeny chyby v určení úhlu v procentech tyto údaje podobně jako v tabulce 7.

Tabulka 8 - Chyby úhlů v procentech pro pole 0,5 m x 0,5 m

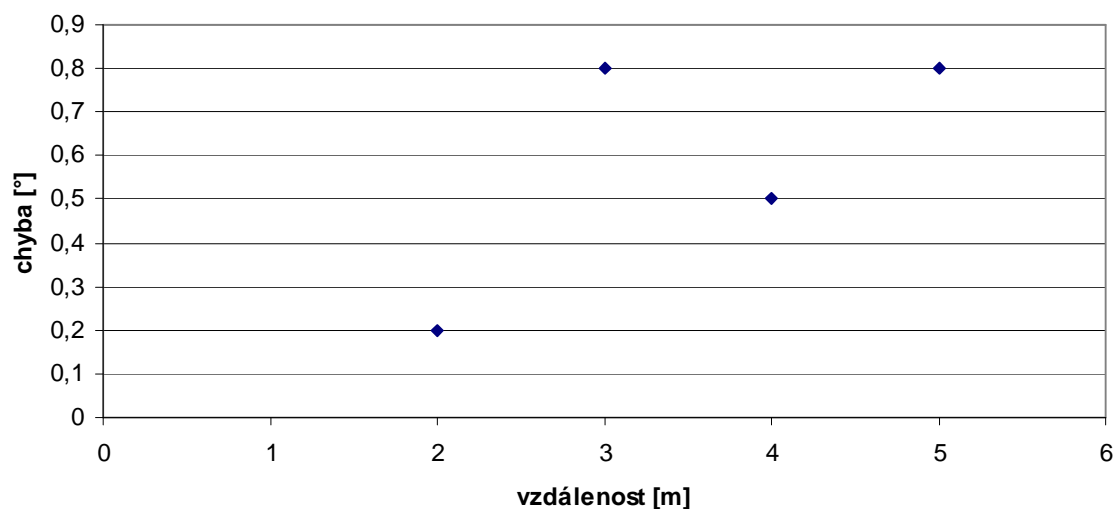
název signálu	chyba v procentech pro					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
signal_8.mat	0,06	0,06	0,22	0,04	0,06	0
signal_9.mat	0,22	0,22	0,31	0,25	0,22	0
signal_10.mat	0,22	0,14	1,06	0,23	0,14	0
signal_11.mat	0,22	0,22	0,06	0,13	0,22	0
signal_12.mat	0,06	0,83	1,47	0,23	0,06	45
signal_13.mat	1,58	1,61	1,58	1,59	1,58	45
signal_14.mat	0,06	1,28	0,19	0,34	0,06	45
signal_15.mat	0,81	0,89	0,78	0,82	0,81	45



Obrázek 35 - Graf vyjádření chyby naměřeného úhlu od skutečného úhlu

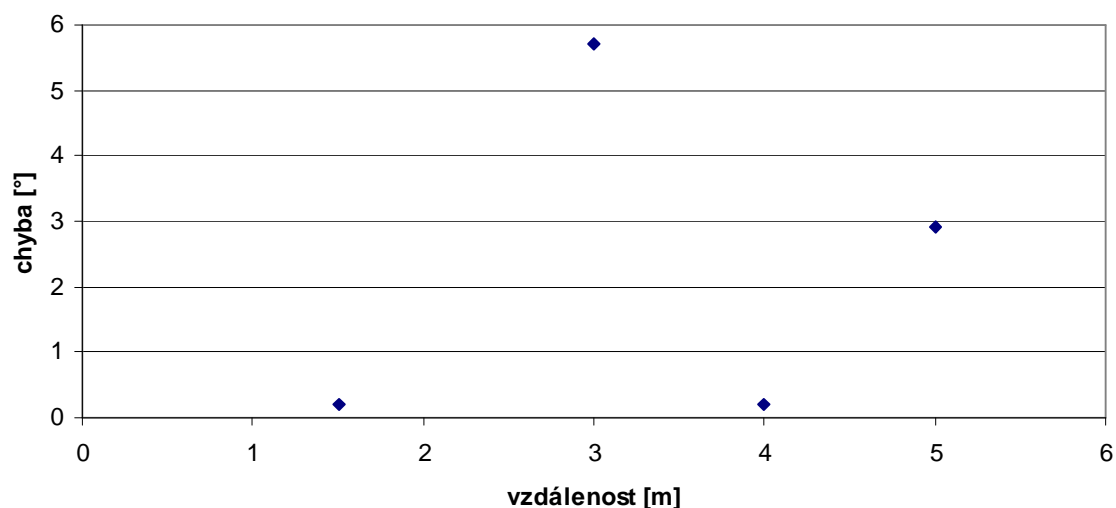
Z grafu číslo 35 je patrné, že menších odchylek od skutečného úhlu bylo dosaženo pro měření, kdy se vysílač pohyboval po rovnoběžné ose se základnou (tedy pro úhel 0°), než když se pohyboval po ose, která je vychýlená o 45° oproti předchozímu případu. Pro věrohodnější statistické vyhodnocení by však bylo potřeba provést několik desítek měření v každém směru.

Další dva grafy vyjadřují závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole. První graf číslo 36 je pro případ, kdy velikost sensorového pole byla $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ a pro nulové vychýlení dráhy, po které se pohyboval vysílač (0°). Tyto podmínky splňují signal_8.mat, signal_9.mat, signal_10.mat, signal_11.mat.



Obrázek 36 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole, pro pole $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$, 0°

Druhý graf číslo 37 je pro případ, kdy velikost sensorového pole byla 0,5 m x 0,5 m a pro 45 ° vychýlení dráhy, po které se pohyboval vysílač. Tyto podmínky splňují signal_12.mat, signal_13.mat, signal_14.mat, signal_15.mat. Z obou grafů je patrná tendence ke zvětšení chyby s rostoucí vzdáleností.

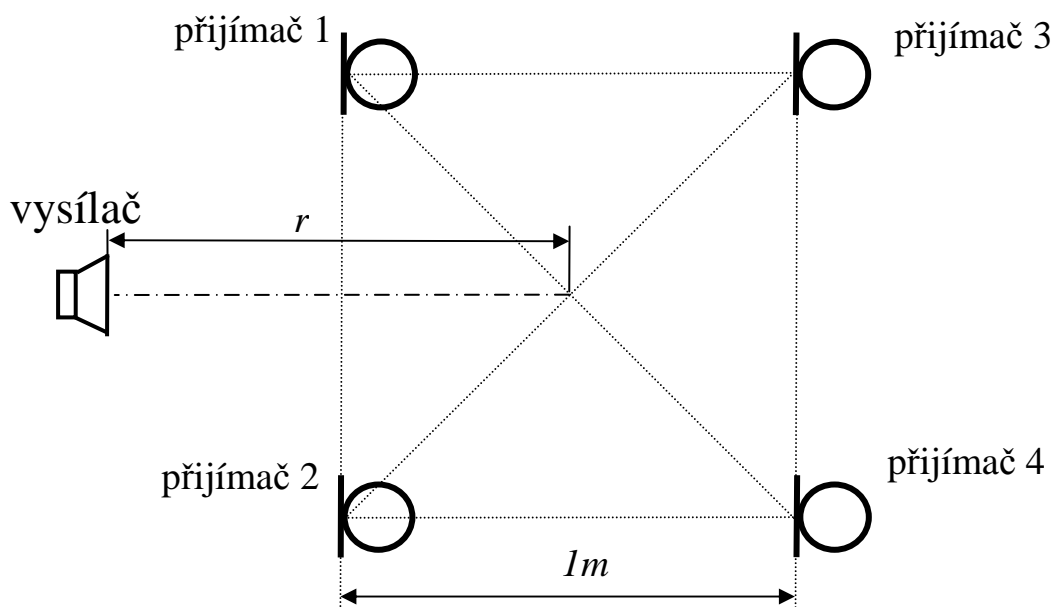


Obrázek 37 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole, pro pole 0,5 m x 0,5 m, 45 °

6.1.2 Rozmístění pole 1 m x 1 m

První případ

Prvním případem je sensorové pole s rozmístěním sensorů 1 m x 1 m a pohyb vysílače po ose rovnoběžné se základnou sensorového pole. Tato situace je vyobrazena na obrázku číslo 38, kde se vysílač pohyboval ve vzdálenostech 1, 2, 3, 4 a 5 m od středu sensorového pole.



Obrázek 38 - Rozmístění sensorového pole 1 m x 1 m s výchylkou 0 °

V následující tabulce jsou uvedeny tyto údaje - název zaznamenaného signálu, zpoždění mezi jednotlivými přijímači a vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

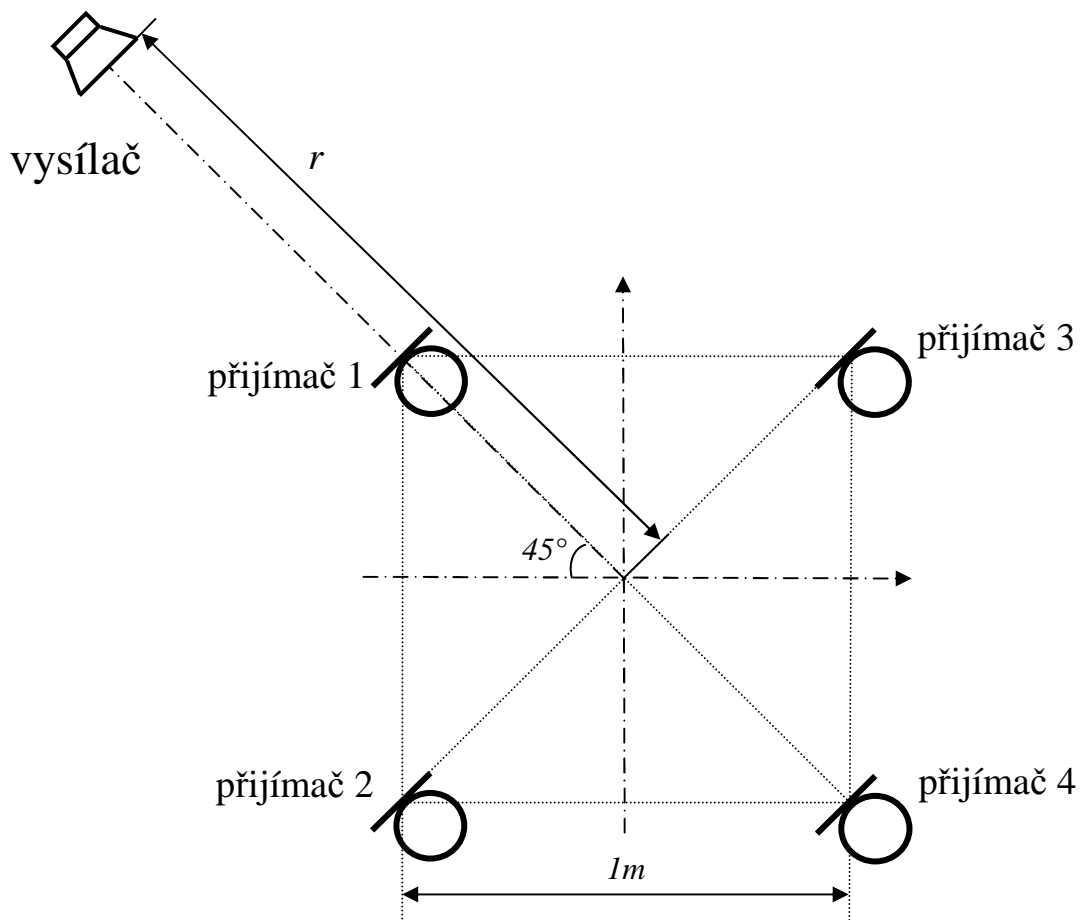
Tabulka 9 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými přijímači pro pole 1 m x 1 m s výchylkou 0 °

Tabulka změřených zpoždění mezi jednotlivými přijímači				
	$n_2 - n_1$ (ms)	$n_3 - n_1$ (ms)	$n_4 - n_1$ (ms)	r [m]
signal_20.mat	0,125	2,407	2,508	1
signal_21.mat	0,022	2,878	2,836	2
signal_22.mat	0,062	2,866	0,215	3
signal_23.mat	0,001	2,878	0,532	4
signal_24.mat	-0,026	2,862	2,919	5

n_1, n_2, n_3, n_4 jsou začátky signálů na jednotlivých přijímačích,
r je vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Druhý případ

Druhým případem je sensorové pole s rozmístěním sensorů 1 m x 1 m a pohyb vysílače po ose, která je vychýlená o 45 ° oproti předchozímu případu. Tato situace je vyobrazena na obrázku číslo 39, kde se vysílač pohyboval ve vzdálenostech 1,5, 3, 4 a 5 m od středu sensorového pole.



Obrázek 39 - Rozmístění sensorového pole 1 m x 1 m s výchylkou 45 °

V následující tabulce jsou uvedeny tyto údaje - název zaznamenaného signálu, zpoždění mezi jednotlivými přijímači a vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Tabulka 10 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými přijímači pro pole 1 m x 1 m s výchylkou 45 °

Tabulka změřených zpoždění mezi jednotlivými přijímači				
	n_2-n_1 (ms)	n_3-n_1 (ms)	n_4-n_1 (ms)	r [m]
signal_19.mat	2,537	2,806	4,112	1,5
signal_18.mat	2,355	2,435	4,450	3
signal_17.mat	2,286	2,347	4,188	4
signal_16.mat	2,216	2,177	4,022	5

n_1, n_2, n_3, n_4 jsou začátky signálů na jednotlivých přijímačích,
 r je vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Vyhodnocení výsledků

V tabulce číslo 11 jsou vypočítané úhly pomocí metody TDOA, dalším údajem je aritmetický průměr z těchto vypočítaných úhlů a medián určený také z těchto úhlů. V posledním sloupcu je pro porovnání uvedený skutečný úhel. Při sérii těchto testů nebyl u záznamu signal_19.mat proces určení úhlu úspěšný.

Tabulka 11 - Vypočítané úhly pro pole 1 m x 1 m

název signálu	spočítaný úhel [°]					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
signal_20.mat	-0,2	-6,9	-7,0	-4,7	-6,9	0
signal_21.mat	-0,2	-1,7	-1,8	-1,2	-1,7	0
signal_22.mat	1,2	1,1	-0,2	0,7	1,1	0
signal_23.mat	-0,2	0,8	12,2	4,3	0,8	0
signal_24.mat	-1,0	-0,8	-0,2	-0,7	-0,8	0
signal_16.mat	44,8	49,4	41,4	45,2	44,8	45
signal_17.mat	44,8	47,7	38,5	43,7	44,8	45
signal_18.mat	44,8	49,8	35,6	43,4	44,8	45
signal_19.mat	-0,1	57,2	-0,1	19,0	-0,1	45

V tabulce číslo 12 jsou uvedeny tyto údaje - vypočítané chyby úhlů ve stupních, dalším údajem je aritmetický průměr a medián. Obě tyto hodnoty jsou určené z chyb jednotlivých úhlů. I tyto hodnoty jsou ve stupních. V posledním sloupcu je pro porovnání uvedený skutečný úhel.

Tabulka 12 - Chyby úhlů ve stupních pro pole 1 m x 1 m

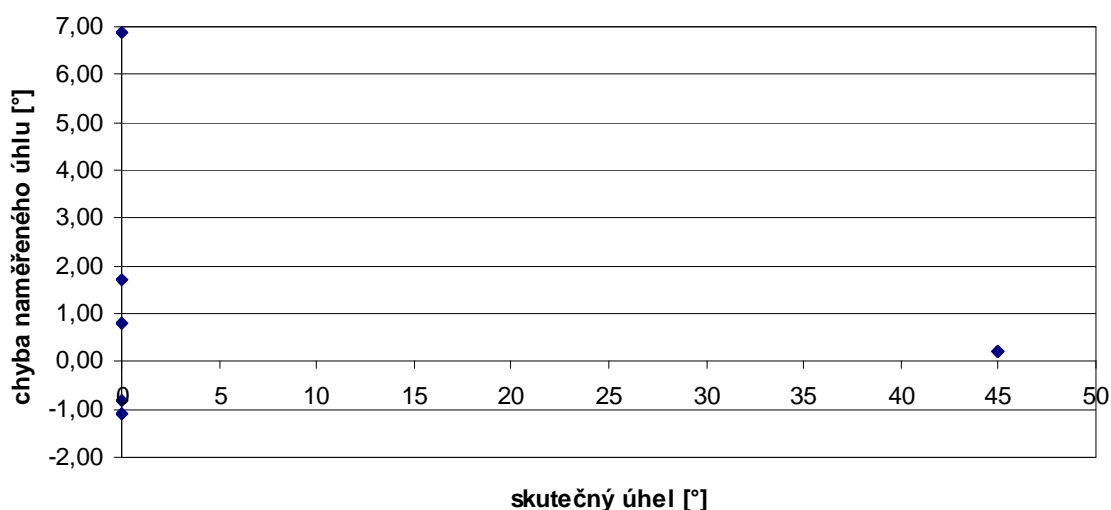
název signálu	chyba ve stupních pro					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	med	
signal_20.mat	0,20	6,90	7,00	4,70	6,90	0
signal_21.mat	0,20	1,70	1,80	1,23	1,70	0
signal_22.mat	-1,20	-1,10	0,20	-0,70	-1,10	0
signal_23.mat	0,20	-0,80	-12,20	-4,27	-0,80	0
signal_24.mat	1,00	0,80	0,20	0,67	0,80	0
signal_16.mat	0,20	-4,40	3,60	-0,20	0,20	45
signal_17.mat	0,20	-2,70	6,50	1,33	0,20	45
signal_18.mat	0,20	-4,80	9,40	1,60	0,20	45
signal_19.mat	45,10	-12,20	45,10	26,00	45,10	45

V tabulce číslo 13 jsou uvedeny chyby v určení úhlu v procentech tyto údaje podobně jako v tabulce 12.

Tabulka 13 - Chyby úhlů ve procentech pro pole 1 m x 1 m

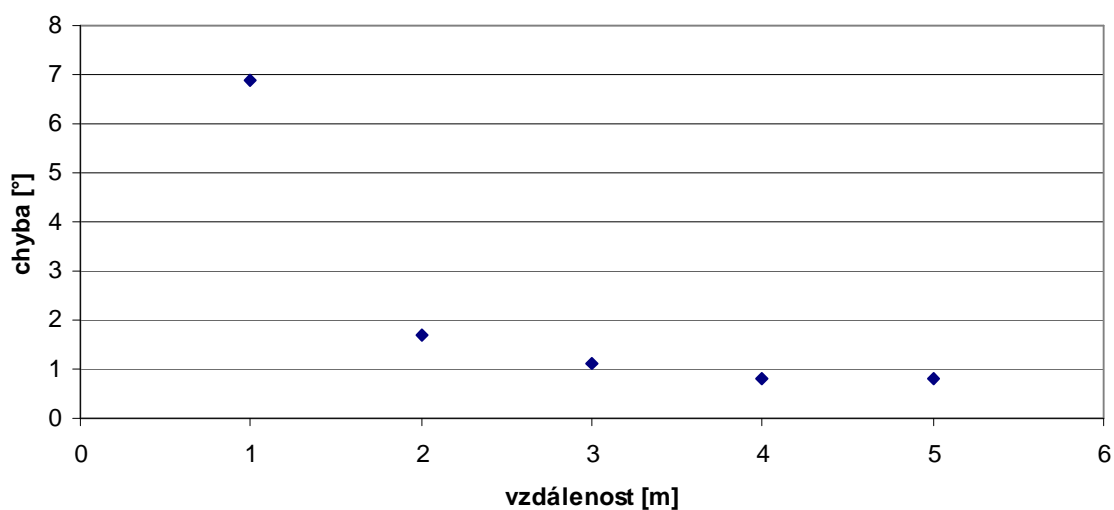
název signálu	chyba v procentech pro			průměr	medián	skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3			
signal_20.mat	0,06	1,92	1,94	1,31	1,92	0
signal_21.mat	0,06	0,47	0,50	0,34	0,47	0
signal_22.mat	0,33	0,31	0,06	0,19	0,31	0
signal_23.mat	0,06	0,22	3,39	1,19	0,22	0
signal_24.mat	0,28	0,22	0,06	0,19	0,22	0
signal_16.mat	0,06	1,22	1,00	0,06	0,06	45
signal_17.mat	0,06	0,75	1,81	0,37	0,06	45
signal_18.mat	0,06	1,33	2,61	0,44	0,06	45
signal_19.mat	12,53	3,39	12,53	7,22	12,53	45

Z grafu číslo 40 je patrné, že menších odchylek od skutečného úhlu bylo dosaženo pro měření, kdy se vysílač pohyboval po ose, která je vychýlená o 45 ° oproti předchozímu případu, tedy kdy se vysílač pohyboval po rovnoběžné ose se základnou (pro úhel 0 °).



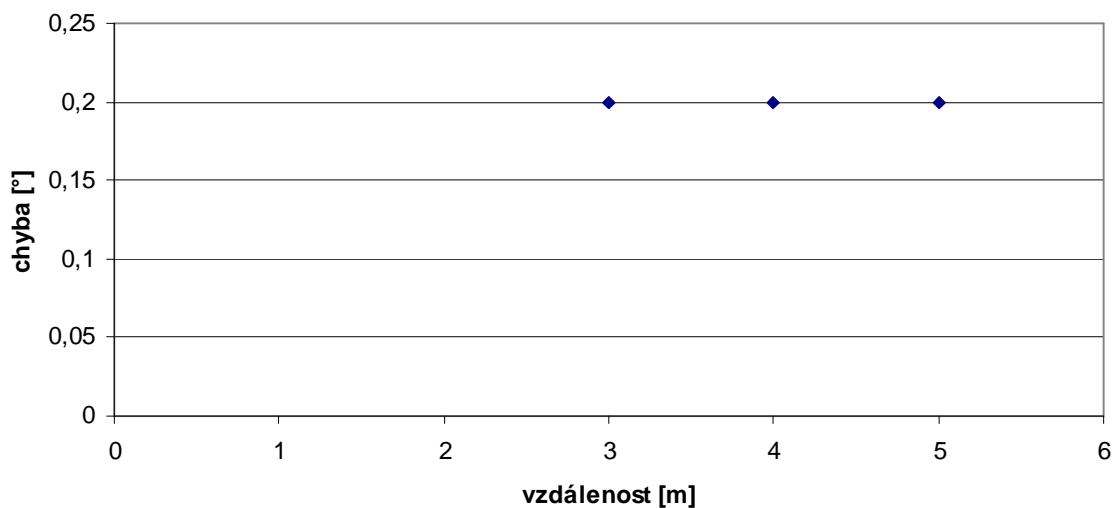
Obrázek 40 - Vyjádření chyby naměřeného úhlu od skutečného úhlu pro pole 1 m x 1 m

Další dva grafy vyjadřují závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole. První graf číslo 41 je pro případ, kdy velikost sensorového pole byla 1 m x 1 m a pro nulové vychýlení dráhy, po které se pohyboval vysílač (0 °). Tyto podmínky splňují signal_20.mat, signal_21.mat, signal_22.mat, signal_23.mat, signal_24.mat.



Obrázek 41 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole, pro pole 1 m x 1 m, 0°

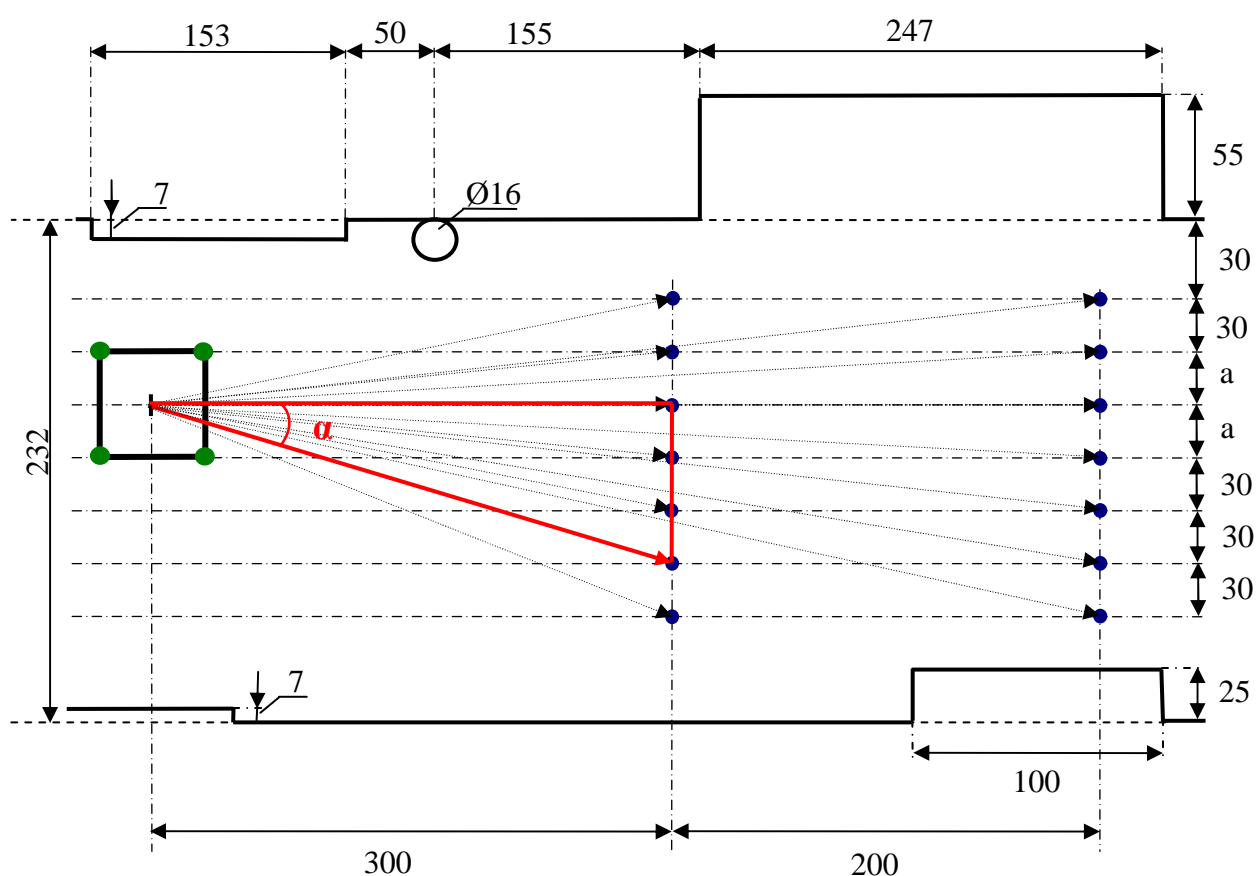
Druhý graf číslo 42 je pro případ, kdy velikost sensorového pole byla 1m x 1m a pro 45° vychýlení dráhy, po které se pohyboval vysílač. Tyto podmínky splňují signal_19.mat, signal_18.mat, signal_17.mat, signal_16.mat. Jedno z měření (signal_19.mat) nebylo do grafu zaneseno, protože u tohoto záznamu nebyly správně detekovány časy příchoďů signálů, a tím ani úhel.



Obrázek 42 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole, pro pole 1 m x 1 m, 45°

6.2 Měření na chodbě

Další měření probíhalo na chodbě v přízemí Fakulty elektrotechniky a informatiky a bylo zaměřeno na prokázání možnosti rozeznávání malých rozdílů v úhlech. Na obrázku číslo 43 je nakreslený schématický plán s uspořádáním pracoviště. Sensorové pole mělo opět tvar čtverce. Měření probíhalo pro dva typy pole, a to pro pole s velikostí strany 0,5 m a pro pole s velikostí 0,3 m. Polohy umístění vysílače jsou znázorněny modrými body. Vysílač byl tedy umístěn ve vodorovné poloze od středu sensorového pole ve dvou vzdálenostech, a to ve 3 m a 5 m. Svislé vychýlení vysílače se měnilo podle tabulky číslo 14.



Obrázek 43 - Schématický plán měřicího pracoviště na chodbě

Na výše uvedeném obrázku parametr a vyjadřuje vzdálenost poloviny strany sensorového pole. Modré body značí umístění vysílače a zelené body znázorňují umístění přijímačů. Odvěsny červeného trojúhelníku vyznačují vzdálenost vysílače od středu sensorového pole ve vodorovné poloze a velikost svislého vychýlení vysílače. Na základě těchto dvou hodnot je dopočítán úhel α , který udává skutečný úhel, pod kterým dopadá signál od vysílače na jednotlivé senzory sensorového pole. Pro každé měření byly tyto senzory

natočeny rovnoběžně s osou paprsku vysílače. Na obrázku číslo 44 je fotografie reálné situace měření na chodbě.



Obrázek 44 - Měření na chodbě

6.2.1 Rozmístění pole 0,5 m x 0,5 m

V následující tabulce jsou uvedeny tyto údaje - název zaznamenaného signálu, zpoždění mezi jednotlivými přijímači a vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Tabulka 14 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými senzory pro pole 0,5 m x 0,5 m

Tabulka změřených zpoždění mezi jednotlivými přijímači					
	n_2-n_1 [ms]	n_3-n_1 [ms]	n_4-n_1 [ms]	r [m]	skutečný úhel [°]
zaznam_2.mat	0,017	1,583	1,441	5	0,00
zaznam_4.mat	0,325	1,812	1,824	4	0,00
zaznam_5.mat	0,366	1,938	1,860	3	0,00
zaznam_6.mat	-0,019	1,445	1,419	2	0,00
zaznam_7.mat	0,037	1,394	1,428	1	0,00
zaznam_8.mat	0,264	1,684	1,862	10	0,00
zaznam_9.mat	0,236	1,482	1,582	7	0,00
zaznam_11.mat	0,445	1,825	1,853	5	2,86
zaznam_10.mat	0,204	2,002	1,635	3	4,76
zaznam_13.mat	0,445	1,798	1,950	5	5,14
zaznam_15.mat	-0,283	1,381	1,565	5	8,53
zaznam_12.mat	0,319	1,462	2,207	3	8,53
zaznam_17.mat	-0,186	1,421	2,194	5	11,86
zaznam_14.mat	0,399	1,932	2,207	3	14,04
zaznam_16.mat	0,503	1,395	1,831	3	19,29
zaznam_19.mat	-0,026	1,403	1,351	5	-2,86
zaznam_18.mat	-0,062	1,907	1,466	3	-4,76
zaznam_21.mat	-0,254	1,347	1,248	5	-5,14
zaznam_20.mat	-0,275	1,346	1,158	3	-8,53

n_1, n_2, n_3, n_4 jsou začátky signálů na jednotlivých přijímačích,
 r je vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Vyhodnocení výsledků

V tabulce číslo 15 jsou uvedeny tyto údaje - vypočítané úhly pomocí metody TDOA, aritmetický průměr z těchto vypočítaných úhlů a medián určený také z těchto úhlů. V posledním sloupcu je pro porovnání uvedený skutečný úhel.

Tabulka 15 - Vypočítané úhly pro pole 0,5 m x 0,5 m

název signálu	spočítaný úhel [°]					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
zaznam_2.mat	-1,2	-1,2	-1,3	-1,23	-1,2	0,00
zaznam_4.mat	-0,6	-1,8	-1,8	-1,40	-1,8	0,00
zaznam_5.mat	-0,2	-0,2	-0,3	-0,23	-0,2	0,00
zaznam_6.mat	-1,5	-1,5	-1,6	-1,53	-1,5	0,00
zaznam_7.mat	1,6	1,6	-0,8	0,80	1,6	0,00
zaznam_8.mat	-1,0	-0,5	0,9	-0,20	-0,5	0,00
zaznam_9.mat	-3,0	-1,2	-1,2	-1,80	-1,2	0,00
zaznam_11.mat	6,1	6,1	3,5	5,23	6,1	2,86
zaznam_10.mat	5,3	5,2	4,7	5,07	5,2	4,76
zaznam_13.mat	5,1	5,2	6,7	5,67	5,2	5,14
zaznam_15.mat	3,6	3,6	6,6	4,60	3,6	8,53
zaznam_12.mat	8,8	8,8	9,8	9,13	8,8	8,53
zaznam_17.mat	7,0	7,1	7,8	7,30	7,1	11,86
zaznam_14.mat	13,1	13,0	12,4	12,83	13	14,04
zaznam_16.mat	17,9	17,8	16,5	17,40	17,8	19,29
zaznam_19.mat	-4,5	-3,3	-3,3	-3,70	-3,3	-2,86
zaznam_18.mat	-5,3	-4,7	-4,6	-4,87	-4,7	-4,76
zaznam_21.mat	-7,9	-7,1	-7,0	-7,33	-7,1	-5,14
zaznam_20.mat	-11,8	-11,0	-11,0	-11,27	-11	-8,53

Tabulka 16 - Chyba ve stupních pro pole 0,5 m x 0,5 m

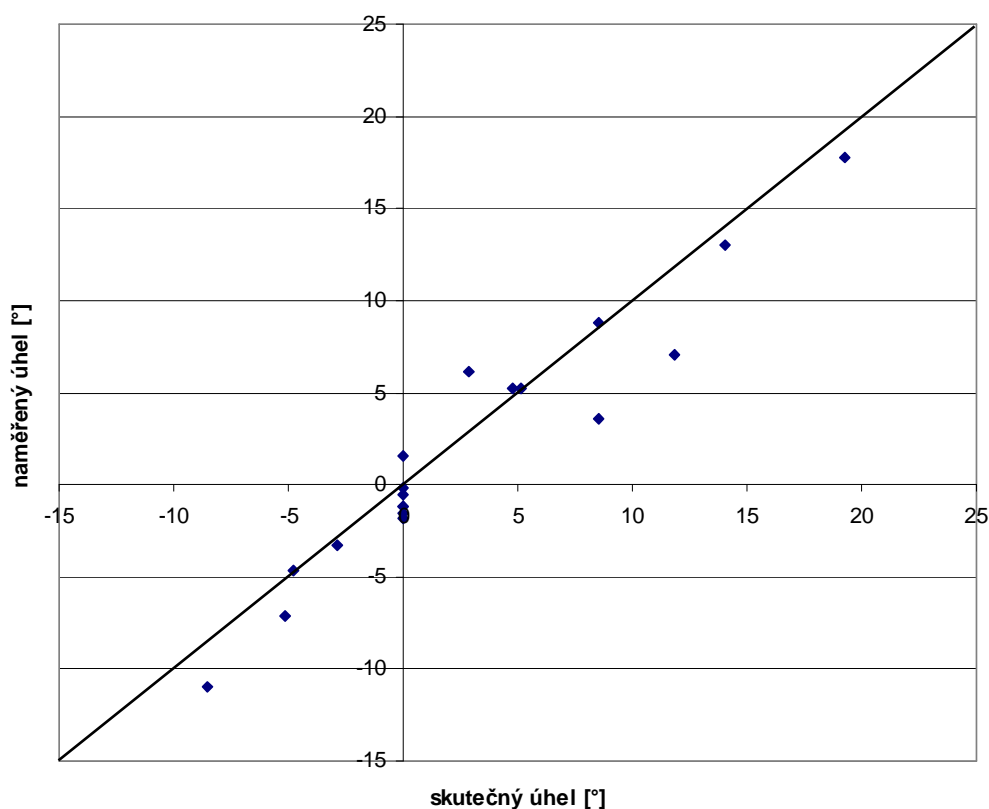
název signálu	chyba ve stupních pro					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
zaznam_2.mat	1,20	1,20	1,30	1,23	1,20	0,00
zaznam_4.mat	0,60	1,80	1,80	1,40	1,80	0,00
zaznam_5.mat	0,20	0,20	0,30	0,23	0,20	0,00
zaznam_6.mat	1,50	1,50	1,60	1,53	1,50	0,00
zaznam_7.mat	-1,60	-1,60	0,80	-0,80	-1,60	0,00
zaznam_8.mat	1,00	0,50	-0,90	0,20	0,50	0,00
zaznam_9.mat	3,00	1,20	1,20	1,80	1,20	0,00
zaznam_11.mat	-3,24	-3,24	-0,64	-2,37	-3,24	2,86
zaznam_10.mat	-0,54	-0,44	0,06	-0,31	-0,44	4,76
zaznam_13.mat	0,04	-0,06	-1,56	-0,53	-0,06	5,14
zaznam_15.mat	4,93	4,93	1,93	3,93	4,93	8,53
zaznam_12.mat	-0,27	-0,27	-1,27	-0,60	-0,27	8,53
zaznam_17.mat	4,86	4,76	4,06	4,56	4,76	11,86
zaznam_14.mat	0,94	1,04	1,64	1,21	1,04	14,04
zaznam_16.mat	1,39	1,49	2,79	1,89	1,49	19,29
zaznam_19.mat	1,64	0,44	0,44	0,84	0,44	-2,86
zaznam_18.mat	0,54	-0,06	-0,16	0,11	-0,06	-4,76
zaznam_21.mat	2,76	1,96	1,86	2,19	1,96	-5,14
zaznam_20.mat	3,27	2,47	2,47	2,74	2,47	-8,53

V tabulce číslo 16 jsou uvedeny tyto údaje - vypočítané chyby úhlů ve stupních, aritmetický průměr a medián chyb. Obě tyto hodnoty jsou určeny z chyb jednotlivých úhlů. I tyto hodnoty jsou ve stupních. V posledním sloupcu je pro porovnání uvedený skutečný úhel.

V tabulce číslo 17 jsou uvedeny chyby v určení úhlu v procentech tyto údaje podobně jako v tabulce 16.

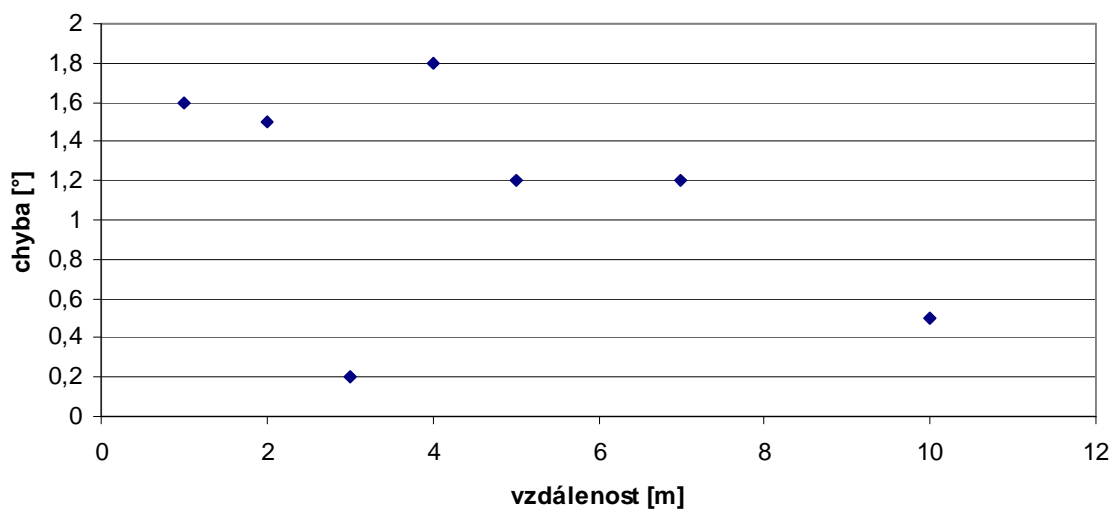
Tabulka 17 - Chyba v procentech pro pole 0,5 m x 0,5 m

název signálu	chyba v procentech pro					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
zaznam_2.mat	0,33	0,33	0,36	0,34	0,33	0,00
zaznam_4.mat	0,17	0,50	0,50	0,39	0,50	0,00
zaznam_5.mat	0,06	0,06	0,08	0,06	0,06	0,00
zaznam_6.mat	0,42	0,42	0,44	0,43	0,42	0,00
zaznam_7.mat	0,44	0,44	0,22	0,22	0,44	0,00
zaznam_8.mat	0,28	0,14	0,25	0,06	0,25	0,00
zaznam_9.mat	0,83	0,33	0,33	0,50	0,33	0,00
zaznam_11.mat	0,90	0,90	0,18	0,66	0,90	2,86
zaznam_10.mat	0,15	0,12	0,02	0,09	0,12	4,76
zaznam_13.mat	0,01	0,02	0,43	0,15	0,02	5,14
zaznam_15.mat	1,37	1,37	0,54	1,09	1,37	8,53
zaznam_12.mat	0,08	0,08	0,35	0,17	0,08	8,53
zaznam_17.mat	1,35	1,32	1,13	1,27	1,32	11,86
zaznam_14.mat	0,26	0,29	0,46	0,34	0,29	14,04
zaznam_16.mat	0,39	0,41	0,78	0,53	0,41	19,29
zaznam_19.mat	0,46	0,12	0,12	0,23	0,12	-2,86
zaznam_18.mat	0,15	0,02	0,04	0,03	0,04	-4,76
zaznam_21.mat	0,77	0,54	0,52	0,61	0,54	-5,14
zaznam_20.mat	0,91	0,69	0,69	0,76	0,69	-8,53



Obrázek 45 - Graf porovnání naměřeného úhlu a skutečného úhlu pro pole 0,5 m x 0,5 m

Následující graf vyjadřuje závislost chyby na vzdálenosti vysílače od středu senzorového pole pro nulové vychýlení (0°). Tyto podmínky splňují zaznam_2.mat, zaznam_4.mat, zaznam_5.mat, zaznam_6.mat, zaznam_7.mat, zaznam_8.mat a zaznam_9.mat.



Obrázek 46 - Graf závislosti chyby na vzdálenosti vysílače od středu senzorového pole, pro pole 0,5 m x 0,5 m, 0°

6.2.2 Rozmístění pole 0,3m x 0,3m

V následující tabulce jsou uvedeny tyto údaje - název zaznamenaného signálu, zpoždění mezi jednotlivými přijímači a vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Tabulka 18 - Změřená zpoždění mezi jednotlivými senzory pro pole 0,3 m x 0,3 m

Tabulka změřených zpoždění mezi jednotlivými přijímači					
	n_2-n_1 [ms]	n_3-n_1 [ms]	n_4-n_1 [ms]	r [m]	skutečný úhel [°]
zaznam_22.mat	-0,022	0,849	0,864	1	0,00
zaznam_23.mat	0,116	1,371	1,459	3	0,00
zaznam_24.mat	0,120	1,117	0,446	5	0,00
zaznam_26.mat	-0,067	0,732	0,794	5	1,72
zaznam_25.mat	0,074	0,858	1,416	3	2,86
zaznam_28.mat	-0,023	0,728	0,843	5	5,14
zaznam_27.mat	0,193	1,335	1,572	3	8,53
zaznam_30.mat	0,587	0,828	1,428	5	8,53
zaznam_32.mat	0,637	0,767	1,491	5	11,86
zaznam_29.mat	0,282	0,843	1,077	3	14,04
zaznam_31.mat	0,683	1,283	1,071	3	19,30
zaznam_34.mat	0,398	0,837	1,275	5	-1,72
zaznam_33.mat	-0,023	0,851	0,841	3	-2,86
zaznam_36.mat	-0,357	0,424	1,378	5	-5,14
zaznam_35.mat	-0,115	1,075	1,342	3	-8,53

n_1, n_2, n_3, n_4 jsou začátky signálů na jednotlivých přijímačích,
r je vzdálenost vysílače od středu sensorového pole.

Vyhodnocení výsledků

Tabulka 19 - Spočítané úhly pro pole 0,3 m x 0,3 m

název signálu	spočítaný úhel [°]					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
zaznam_22.mat	-1,7	-0,7	-0,7	-1,03	-0,7	0,00
zaznam_23.mat	-0,2	0,8	1,6	0,73	0,8	0,00
zaznam_24.mat	-0,6	-4,6	-4,7	-3,30	-4,6	0,00
zaznam_26.mat	-4,7	-5,1	-5,2	-5,00	-5,1	1,72
zaznam_25.mat	1,3	1,4	2,2	1,63	1,4	2,86
zaznam_28.mat	-1,8	-2,0	-2,1	-1,97	-2,0	5,14
zaznam_27.mat	8,4	8,4	10,1	8,97	8,4	8,53
zaznam_30.mat	8,9	8,9	17,5	11,77	8,9	8,53
zaznam_32.mat	13,1	13,2	18,9	15,07	13,2	11,86
zaznam_29.mat	16,0	16,0	17,0	16,33	16,0	14,04
zaznam_31.mat	19,0	19,0	15,4	17,80	19,0	19,30
zaznam_34.mat	-3,0	-4,8	-4,9	-4,23	-4,8	-1,72
zaznam_33.mat	-1,8	-2,2	-2,2	-2,07	-2,2	-2,86
zaznam_36.mat	-7,0	-9,2	-9,3	-8,50	-9,2	-5,14
zaznam_35.mat	-9,5	-8,9	-8,8	-9,07	-8,9	-8,53

V tabulce číslo 19 jsou uvedeny tyto údaje - vypočítané úhly pomocí metody TDOA, aritmetický průměr z těchto vypočítaných úhlů a medián určený také z těchto úhlů. V posledním sloupcu je pro porovnání uvedený skutečný úhel.

V tabulce číslo 20 jsou uvedeny tyto údaje - vypočítané chyby úhlů ve stupních, aritmetický průměr a medián chyb. Obě tyto hodnoty jsou určeny z chyb jednotlivých úhlů. I tyto hodnoty jsou ve stupních. V posledním sloupcu je pro porovnání uvedený skutečný úhel.

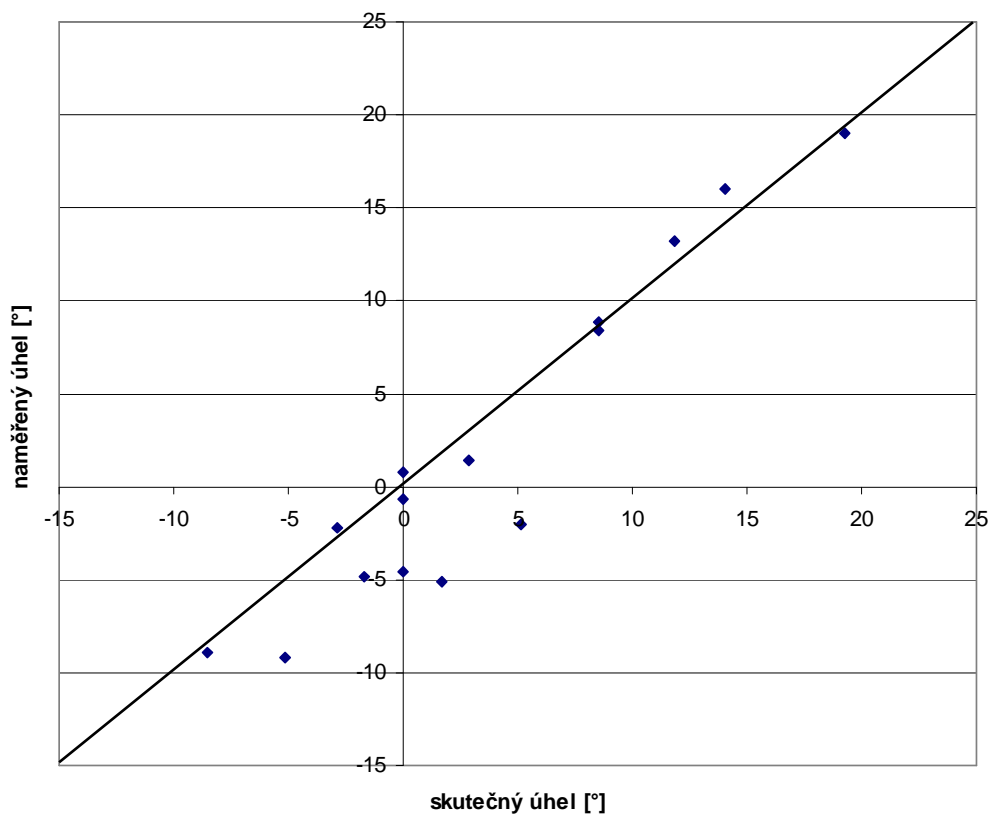
Tabulka 20 - Chyba ve stupních pro pole 0,3 m x 0,3 m

název signálu	chyba ve stupních pro					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
zaznam_22.mat	1,70	0,70	0,70	1,03	0,70	0,00
zaznam_23.mat	0,20	-0,80	-1,60	-0,73	-0,80	0,00
zaznam_24.mat	0,60	4,60	4,70	3,30	4,60	0,00
zaznam_26.mat	6,42	6,82	6,92	6,72	6,82	1,72
zaznam_25.mat	1,56	1,46	0,66	1,23	1,46	2,86
zaznam_28.mat	6,94	7,14	7,24	7,11	7,14	5,14
zaznam_27.mat	0,13	0,13	-1,57	-0,44	0,13	8,53
zaznam_30.mat	-0,37	-0,37	-8,97	-3,24	-0,37	8,53
zaznam_32.mat	-1,24	-1,34	-7,04	-3,21	-1,34	11,86
zaznam_29.mat	-1,96	-1,96	-2,96	-2,29	-1,96	14,04
zaznam_31.mat	0,30	0,30	3,90	1,50	0,30	19,30
zaznam_34.mat	1,28	3,08	3,18	2,51	3,08	-1,72
zaznam_33.mat	-1,06	-0,66	-0,66	-0,79	-0,66	-2,86
zaznam_36.mat	1,86	4,06	4,16	3,36	4,06	-5,14
zaznam_35.mat	0,97	0,37	0,27	0,54	0,37	-8,53

Tabulka 21 - Chyba v procentech pro pole 0,3 m x 0,3 m

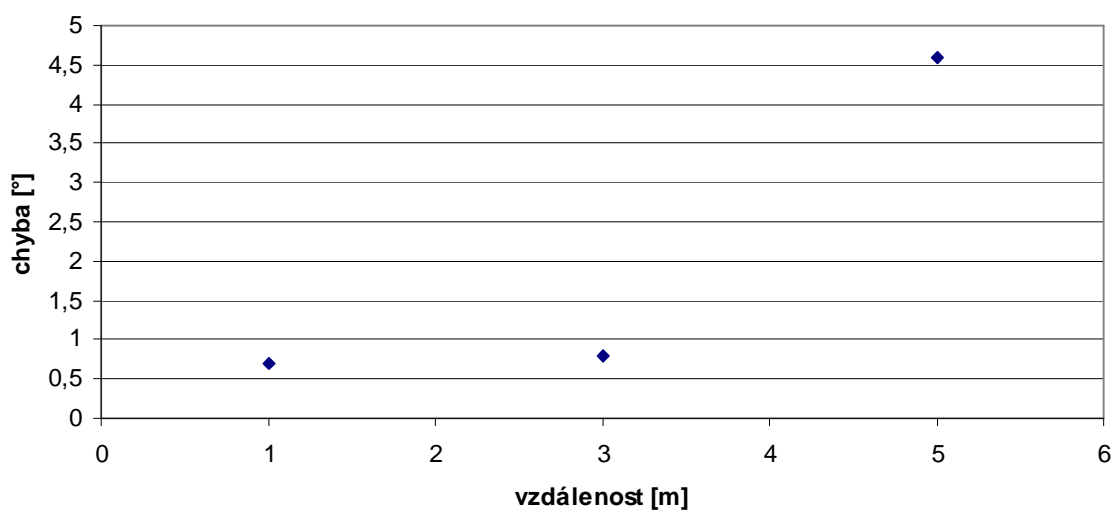
název signálu	chyba v procentech pro					skutečný úhel [°]
	úhel 1	úhel 2	úhel 3	průměr	medián	
zaznam_22.mat	0,47	0,19	0,19	-1,03	-0,70	0,00
zaznam_23.mat	0,06	0,22	0,44	0,73	0,80	0,00
zaznam_24.mat	0,17	1,28	1,31	-3,30	-4,60	0,00
zaznam_26.mat	1,78	1,89	1,92	-5,00	-5,10	1,72
zaznam_25.mat	0,43	0,41	0,18	1,63	1,40	2,86
zaznam_28.mat	1,93	1,98	2,01	-1,97	-2,00	5,14
zaznam_27.mat	0,04	0,04	0,44	8,97	8,40	8,53
zaznam_30.mat	0,10	0,10	2,49	11,77	8,90	8,53
zaznam_32.mat	0,34	0,37	1,96	15,07	13,20	11,86
zaznam_29.mat	0,54	0,54	0,82	16,33	16,00	14,04
zaznam_31.mat	0,08	0,08	1,08	17,80	19,00	19,30
zaznam_34.mat	0,36	0,86	0,88	-4,23	-4,80	-1,72
zaznam_33.mat	0,29	0,18	0,18	-2,07	-2,20	-2,86
zaznam_36.mat	0,52	1,13	1,16	-8,50	-9,20	-5,14
zaznam_35.mat	0,27	0,10	0,08	-9,07	-8,90	-8,53

V tabulce číslo 21 jsou uvedeny chyby v určení úhlu v procentech tyto údaje podobně jako v tabulce 20.



Obrázek 47 - Graf vyjádření chyby naměřeného úhlu od skutečného úhlu pro pole 0,3 m x 0,3 m

Následující graf vyjadřuje závislost chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole pro nulové vychýlení (0°). Tyto podmínky splňují zaznam_22.mat, zaznam_23.mat, zaznam_24.mat.



Obrázek 48 - Graf závislost chyby na vzdálenosti vysílače od středu sensorového pole pro pole 0,3 m x 0,3 m, 0 °

6.3 Celkové porovnání

V tabulce č. 22 je porovnání pro všechna provedená měření, která probíhala v učebně EL101 a na chodbě v přízemí Fakulty elektrotechniky a informatiky.

Tabulka 22 - Celkové porovnání chyb

velikost sensorového pole [m]	měření v EL101		měření na chodbě	
	0,5 x 0,5	1 x 1	0,5 x 0,5	0,3 x 0,3
průměrná chyba [°]	1,41	1,49	1,53	2,25
maximální chyba [°]	5,70	6,90	4,93	7,14
minimální chyba [°]	0,20	0,20	0,06	0,13
medián [°]	0,65	0,8	1,2	1,34

Průměrné chyby ze všech typů provedených měření jsou v intervalu 1,41 ° až 2,25 °. Tyto průměrné chyby jsou ale zatíženy maximálními chybami. Provedené testy a určení chyb jednoznačně ukazuje, že ultrazvukové sensorové pole je možné využít i na rozlišení malých změn v úhlech, a to v řádu jednotek stupňů.

7 Závěr

Diplomová práce analyzuje možnosti detekce polohy ultrazvukového zdroje na základě příchodu ultrazvukového signálu na sensorové pole. Zabývá se návrhem metody vhodné pro vyhodnocení polohy a zkonstruováním systému pro ověření navržené metody. Pro určení odhadu polohy je využívána metoda určení časových rozdílů v příchodech signálů na jednotlivé senzory. V práci jsou teoreticky rozebrány principy detekce polohy zdroje akustického signálu spolu s vlastnostmi ultrazvuku, popisem a rozložením sensorových polí a popisem ultrazvukových vysílačů a přijímačů.

Ze zaznamenaných signálů detekuje navržená softwarová metoda časové odchylky mezi příchody signálu na jednotlivé senzory sensorového pole. Dostatečně přesným určením časových odchylek je možné odhadnout směr (azimut) zdroje ultrazvuku. Pro ověření navržené metody určení zdroje ultrazvuku byla použita sensorová pole čtvercového tvaru s velikostí strany 30 centimetrů, 50 centimetrů a 1 metr. Testování systému bylo prováděné v reálném vnitřním prostředí s odrazy. První měřící pracoviště bylo v laboratoři Fakulty elektrotechniky a informatiky, kde bylo použito čtvercové sensorové pole s délkou strany 1 metr a 0,5 metru. Druhým měřícím pracovištěm byla chodba Fakulty elektrotechniky a informatiky, kde bylo použito čtvercové sensorové pole s délkou strany 0,5 metru a 0,3 metru. Zdroj zvuku se pohyboval v různých vzdálenostech a úhlech, ovšem nejdále 10 m od středu sensorového pole a největší úhel vychýlení byl 45 °. Jednotlivé signály byly přijímány ultrazvukovými senzory, poté zesíleny nízkošumovými zesilovači, a posléze převedeny do digitální podoby. Testováním se potvrdila vysoká směrovost ultrazvukových senzorů.

Z vypočítaných odchylek úhlů oproti skutečnému úhlu, můžeme metodu považovat za efektivní a přesnou. Průměrné chyby v určení směru příchodu dosahují maximálně hodnot okolo pěti stupňů, průměrné chyby jsou pro různé konfigurace sensorového pole 1,41° až 2,25°. Pro aplikace např. automatického natáčení kamery by takováto realizace sensorového pole a navrženého zpracování signálu byla dostatečná.

8 Literatura

- [1] **ČVUT FAKULTA DOPRAVNÍ. 2012** [online]. Ultrazvuk v robotice. [cit. 2012-08-06]. Dostupné z WWW:
<<http://www.fd.cvut.cz/departament/k620/ROD/CVICENI/texty/uzvkrob.pdf>>.
- [2] **BENESTY, J.; CHEN, J.; HUANG, Y.** Microphone Array Signal Processing. Berlin : Springer, 2008. 250 s. ISBN 978-3-540-78611-5.
- [3] **SCHAUER, Pavel 2008.** Úvod do akustiky. [online] Vybrané statě z akustiky. VUT Brno. [cit. 2012-08-06]. Dostupné z WWW:
<http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf>
- [4] **RYCHLOST ZVUKU.** Zvukové vlnění 3.2. [online],Mechanické kmitání a vlnění. [cit. 2012-08-06]. Dostupné z WWW:
<http://rg-projekt.cz/files/fyzika/4._rocnik/10_zvukove_vlneni/3_1_zdroje_zvuku_replayx.pdf>
- [5] **HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.:** *Fyzika*. 5 svazků. 1. VUT Brno – nakladatelství VUTIUM, Brno 2000
- [6] **POUČ, Petr. 2009.** *Měření rychlosti šíření ultrazvuku*. Brno, 2009. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] **MIKEŠ, Petr. 2010.** *Lokalizace statistických akustických zdrojů*. Brno, 2010. 63s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] **DRASTICH, A. 1990.** *Zobrazovací systémy v lékařství*. Skripta FEI VUT v Brně, Brno 1990.
- [9] **OBRÁBĚNÍ ULTRAZVUKEM.** *Obrábění ultrazvukem* [online]. c2007 [cit. 2012-07-03].Dostupné z WWW:
<<http://www.ultrazvuk.cz/index.php?mnu=79,0&PHPSESSID=1e5a913e26ac6e9b7645d55b717e0a37>>
- [10] **FYZIKÁLNÍ PRINCIPY ZOBRAZENÍ ULTRAZVUKEM** [online]. c2007 [cit. 2012-07-08].Dostupné z WWW:
<http://zdravotnictvi.ultrazvuk.cz/prilohy/1/Fyzikalni_principy_uz.pdf>.

- [11] **BEZOUŠEK, P., ŠEDIVÝ, P.** Radarová technika. 1. vyd. Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03036-3
- [12] **MANDLÍK, Michal 2010.** *Využití mikrofonního pole pro určení směru příchodu zvuku.* Pardubice. 2010. 83s. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [13] **BEZDÍČEK, Martin 2010.** Lokalizace pohyblivých akustických zdrojů. Brno. 2010. 56s. Diplomová práce. VUT Brno.
- [14] **KURC, David.2011.** Identifikace zdrojů hluku pomocí Beamformingu. Brno. 2011. 74s. Diplomová práce. VUT Brno.
- [15] **PANDATRON** [online]. *555 a 556 – Základní zapojení.* [cit. 2012-04-26]. Dostupný z WWW: <http://pandatron.cz/?490&555_a_556_-_zakladni_zapojeni>
- [16] **CONRAD** [online]. *Ultrazvukový keramický vysílač.* . [cit. 2012-04-26]. Dostupný z WWW: <http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/182281-an-01-sk-ultrazvukovy_keramicky_vysilac.pdf>
- [17] **BESTAR ELECTRONICS INDUSTRY, 2010** [online]. Ultrasonic sensor. [cit. 2012-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.bestartech.com/documents/PDFs/BPU-1640IOAWH12.PDF.pdf>>
- [18] **WIKIPEDIE. 2012** [online]. Zapojení s operačním zesilovačem [cit. 2012-04-27]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zapojen%C3%AD_s_opera%C4%8Dn%C3%ADm_zesilova%C4%8Dem>.
- [19] **CONRAD** [online]. Ultrazvukový vysílač MA40S = SQ40R. . [cit. 2012-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.conrad.cz/ultrazvukovy-vysilac-ma40s-sq40r.k182273>>