

# 1 OVĚŘENÍ FUNKCE MĚŘICÍ ÚSTŘEDNY

Pro ověření funkce měřicí ústředny a správnosti synchronizace měřicích kanálů byl sestaven experiment pro měření polohy na základě měření doby šíření akustického signálu.

Jeden modul pomocí reproduktoru generuje akustický impuls, který zachycují tři v prostoru definovaně umístěné mikrofony. Akustický signál je mikrofony převeden na tři napětí, která se po zesílení zpracovávají dalšími třemi měřicími kanály. Protože se měřicí kanály i kanál generující akustický impuls synchronizují, je možno vyhodnocením zpoždění signálů určit polohu reproduktoru.

Akustický sledovací systém slouží k určení pozice zdroje zvuku za pomoci vyhodnocování signálů zaznamenaných třemi mikrofony. Odhad pozice je následně vykreslen na obrazovce počítače.

Akustický sledovací systém slouží k určení pozice zdroje zvuku za pomoci vyhodnocování signálů zaznamenaných třemi mikrofony. Odhad pozice je následně vykreslen na obrazovce počítače.

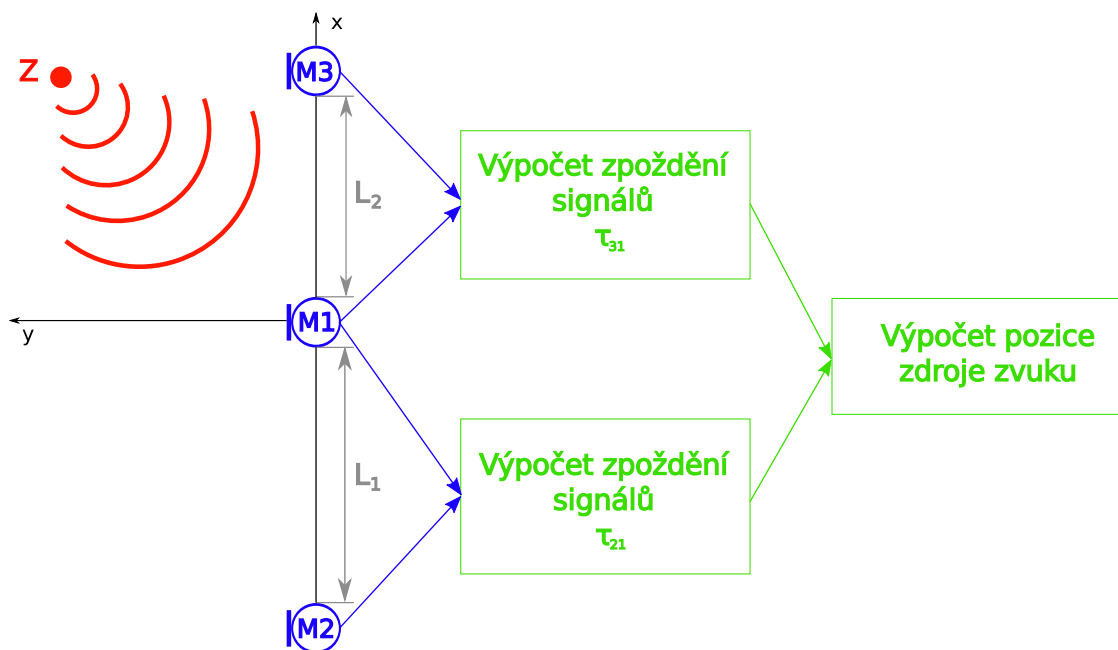
## 1.1 Uspořádání sledovací soustavy

Složení celého synchronního distribuovaného sledovacího systému je vidět na obr. 1.1. Zdroj zvuku je označen Z. Modře jsou vyznačeny mikrofony snímající zvuk, který je zaznamenán příslušným modulem a poslán do PC. Na nadřazeném počítači je spuštěn program pro měřicí ústřednu a také prostředí MATLAB® (v obrázku zeleně), které provádí následné zpracování signálu a vykreslení pozice zdroje zvuku.

## 1.2 Předzpracování naměřených dat

Data získaná pomocí kruhového měření z měřicí ústředny jsou uložena do CSV souboru, který je tvořen šesti sloupci hodnot. Data jsou uložena tak, že liché sloupce obsahují naměřené hodnoty z jednotlivých mikrofonů a sudé sloupce obsahují časové značky odpovídající předchozímu sloupci.

**Parametry signálů z mikrofonů** Signál z mikrofonů je vzorkován s periodou  $20\mu\text{s}$  a A/D převodník má nastaveno osmibitové rozlišení, které vstupní analogové napětí mění na hodnotu mezi 0 a 255. Počet řádků v CSV souboru odpovídá počtu



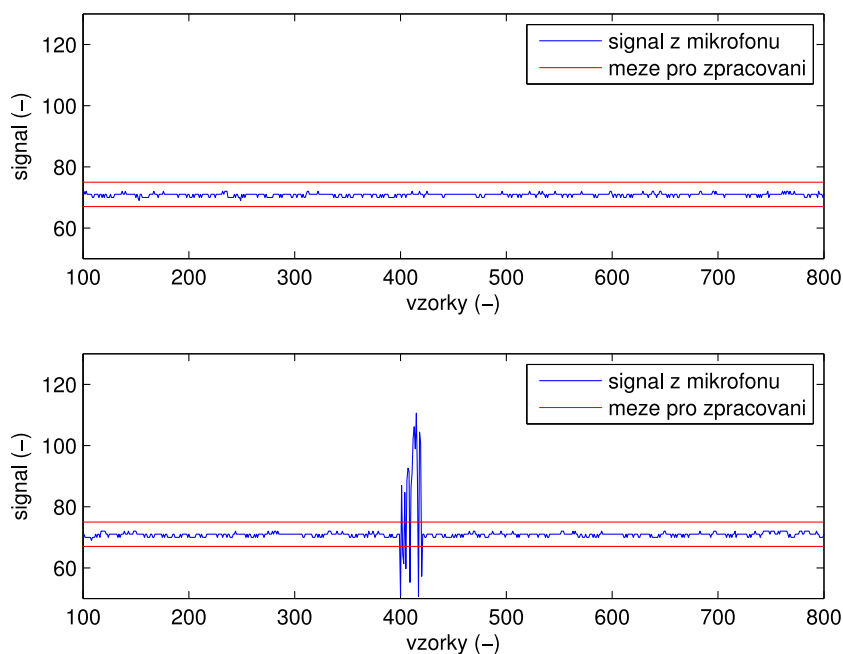
Obr. 1.1: Uspořádání sledovací soustavy

změřených vzorků + 1 (první řádek obsahuje názvy kanálů). Množství odebraných vzorků je možno měnit v programu popisováním v sekci ???. Pokud bychom například chtěli zaznamenat signály v trvání jedné vteřiny, nastavíme odběr na 50 000 vzorků.

Do prostředí MATLAB® jsou data nahrána pomocí funkce `csvread()`, což uloží načtený soubor ve formě matice do tzv. "workspace" prostředí MATLAB®, kde jsou jednotlivé signály (liché sloupce matice) uloženy do slupcových vektorů pojmenovaných `signal1` až `signal3`.

Vzhledem k tomu, že použité kruhové měření startuje veškeré odměry současně s maximální odchylkou v řádu stovek nanosekund, která je pro akustickou lokalizaci vzhledem k rychlosti zvuku zanedbatelná, nemusíme v tomto případě brát v úvahu časové značky k jednotlivým signálům, neboť nás zajímá pouze vzájemný časový posun signálů. Ten je možné spočítat jako posun v počtu prvků vektoru vynásobený vzorkovací periodou.

Díky současnému startování odměrů tedy stačí načítat z CSV souboru pouze vektory signálů bez jejich časových značek. Tento přístup zjednodušuje následnou přípravu na zpracování. Pokud by nebylo využito současného startování, bylo by nutné naměřené signály nejprve zarovnat dle stanovené časové značky a následně vybrat vhodný časový interval signálů ke zpracování.



Obr. 1.2: Ukázka signálů zaznamenaných mikrofonem

Dalším krokem v předzpracování signálu je zjištění, zda naměřené signály obsahují dostatek informace na to, aby bylo možno určit jejich skutečné zpoždění.

Pokud například není v okruhu několika málo metrů kolem mikrofonů přítomen žádný zdroj zvuku, je zaznamenaný signál tvořen převážně vlastním šumem mikrofonů a elektromagnetickým rušením, jak ukazuje obr. 1.2 nahoře. Takový signál pochopitelně nemá smysl dále zpracovávat, neboť neobsahuje žádnou informaci o pozici zdroje zvuku.

Proto jsou u jednotlivých signálů nejprve zjištěna maxima a minima, která představují jednoduché vodítko pro určení, zda dané signály mohou být použity pro výpočet pozice.

Pokud signál obsahuje pouze šum, nezmění se jeho amplituda o více než 4 (empiricky stanovená konstanta) od střední hodnoty signálu. Meze pro určení, zda jde pouze o šum, nebo již signál vhodný ke zpracování, jsou v obr. 1.2 naznačeny červenými čarami.

V případě, že signál překročí stanovené meze, jak ukazuje obr. 1.2 dole, je vyhodnocen jako vhodný ke zpracování. Pokud nepřekročí ani jednu z vyznačených

mezí, nebo překročí pouze jednu, je vyhodnocen jako šum, dále se nezpracovává a následuje načtení nové sady signálů.

### 1.3 Stanovení zpoždění signálů

K odhadu podobnosti resp. vzájemného zpoždění dvou signálů slouží nejčastěji korelace. Mějme dány dva diskétní signály  $s_1(k), s_2(k)$ , pak je jejich vzájemná korelace  $R_{s_1s_2}(\tau)$  v časové oblasti dána vztahem 1.1. Vzájemné zpoždění je pak možno určit ze vztahu 1.2

$$R_{s_1s_2}(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} s_1(t)s_2(t-\tau) \quad \tau = -N+1 \dots N-1 \quad (1.1)$$

$$\tau_x = \operatorname{argmax}(R_{s_1s_2}(\tau)) \quad (1.2)$$

Tento obecný přístup ovšem není příliš vhodný, jelikož dává spolehlivé výsledky pouze pokud signály obsahují minimum šumu. Rovnice 1.1 totiž ukazuje, že jsou brány v úvahu pouze amplitudy vstupních signálů.

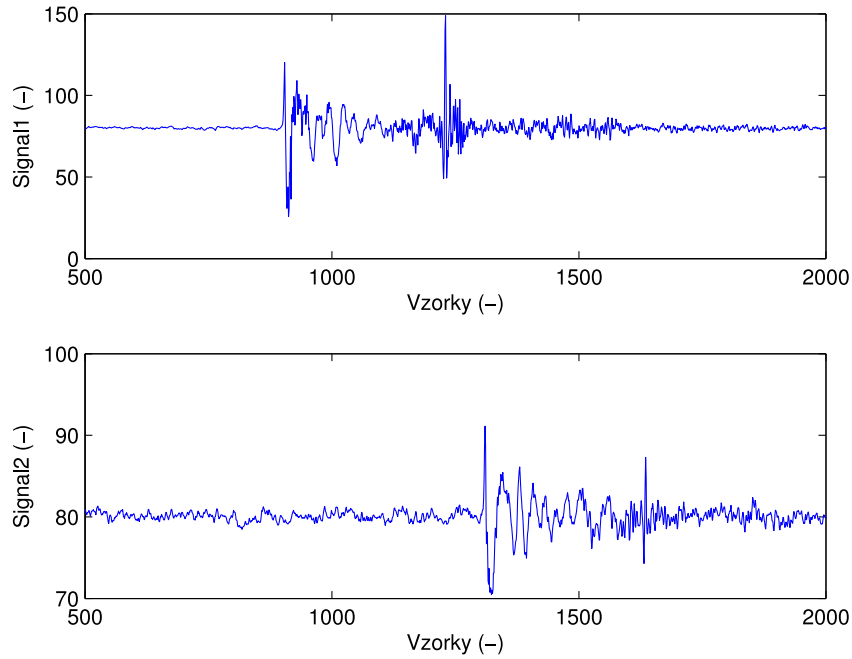
Signály  $s_1(k), s_2(k)$  ovšem nesou informaci také o frekvenci a fázi signálu, kterou je možno získat přechodem do frekvenční oblasti pomocí Fourierovy transformace rovnice 1.1. Pro tyto případy je nejprve nutné přepsat rovnici tak, že korelaci upravíme na konvoluci (značeno \*), jak ukazuje 1.3.

$$R_{s_1s_2}(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} s_1(t)s_2(-(\tau-t)) = s_1(t) * s_2(t) \quad (1.3)$$

Nyní můžeme provést Fourierovu transformaci s využitím znalosti, že konvoluce dvou vektorů v časové oblasti představuje ve frekvenční oblasti prosté násobení jednoho vektoru  $\hat{S}_1$  s vektorem komplexně sdružených čísel k vektoru  $\hat{S}_2$ , který bude dále značen jako  $\hat{S}_2^*$ . Výsledek této operace ukazuje rovnice 1.4, přičemž odhad zpoždění je stále možné nalézt pomocí vztahu 1.2.

$$R_{s_1s_2}(\tau) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \hat{S}_1(e^{j\omega})\hat{S}_2^*(e^{j\omega})e^{j\omega\tau} \quad \omega = \frac{2\pi k}{N} \quad (1.4)$$

Nyní se nabízí možnost použití GCC [?], což je korelace ve Fourierově spektru, která je navíc ještě násobena váhovou funkcí  $\hat{\Psi}(e^{j\omega})$ .



Obr. 1.3: Příklad signálů zaznamenaných mikrofonem

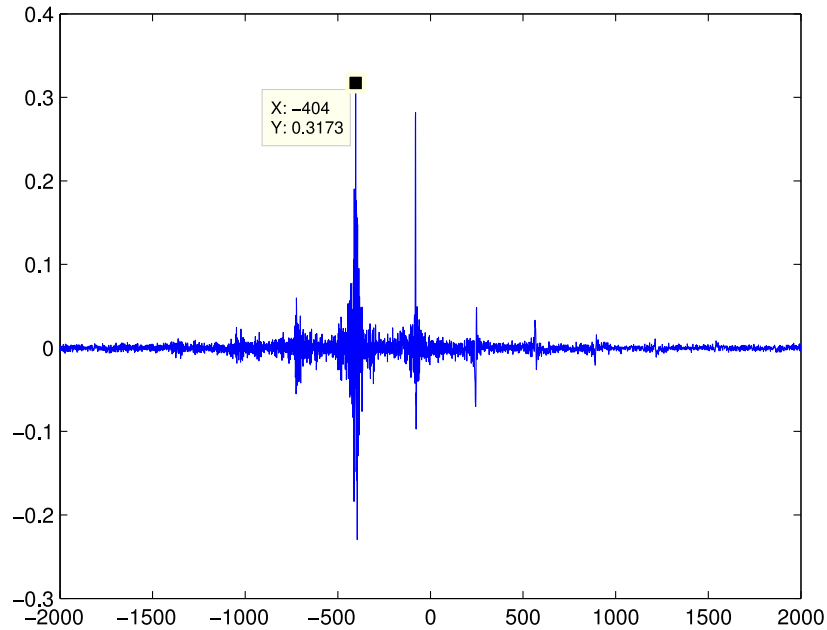
$$R_{s_1 s_2}(\tau) = \sum_{\omega} \hat{\Psi}(e^{j\omega}) \hat{S}_1(e^{j\omega}) \hat{S}_2^*(e^{j\omega}) e^{j\omega\tau} \quad (1.5)$$

Tvar váhové funkce  $\hat{\Psi}(e^{j\omega})$  je možno definovat tak, potlačil vliv amplitud signálů a korelace se počítala pouze na základě informace o fázi, kterou oba signály obsahují. Tato informace je obzvláště důležitá, neboť jejich vzájemný fázový posuv přímo udává časové zpoždění mezi nimi. Proto jsem se rozhodl použít váhovou funkci, kterou ukazuje rovnice 1.6.

$$\hat{\Psi}_{PHAT}(e^{j\omega}) = \frac{1}{|\hat{S}_1(e^{j\omega})| |\hat{S}_2(e^{j\omega})|} \quad (1.6)$$

Použití GCC s výše popsanou funkcí se často v literatuře nazývá fázová transformace a označuje se GCC-PHAT. Takto definovaná korelace je velmi vhodná pro zpracování reálných signálů, které se v případě mikrofonů mohou vlivem vzdálenosti od zdroje zvuku výrazně lišit v amplitudě, nicméně tvar signálu zůstává zachován.

Praktickou ukázkou zpracování reálných signálů z obr. 1.3 pomocí zde popsaného postupu je možné vidět na obr. 1.4. Jak ukazuje kurzor v obrázku, odhad zpoždění, který představuje maximum ve výstupním vektoru algoritmu GCC-PHAT, vychází



Obr. 1.4: Výstupní vektor algoritmu GCC-PHAT

-404 vzorků (signál 1 předbíhá signál 2 o 404 vzorků, proto má záporné znaménko). Jejich časové zpoždění v sekundách je možno spočítat vynásobením počtu vzorků vzorkovací periodou. V tomto případě je tedy signál 2 zpožděn za signálem 1 o  $404 * 0.00002 = 8,08 * 10^{-3}$  s.

Pro zvýšení spolehlivosti odhadu zpoždění je v rámci sledovacího systému implementován výpočet histogramu z deseti opakovaných měření a vybrán je ten odhad, který byl ze všech pozorování nejfrekventovanější.

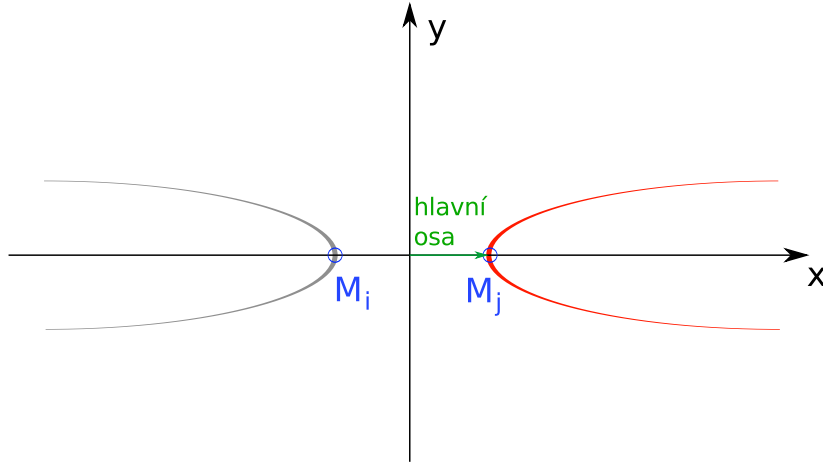
## 1.4 Výpočet pozice zdroje zvuku

Mějme dány dva mikrofony M1, M2 se známými souřadnicemi  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ . Zpoždění, s jakým dorazí signál od zdroje Z s poicí  $(x, y)$  k jednomu z mikrofonů, pokud je známa rychlost zvuku  $v_z$ , lze vypočít z rovnice 1.7.

$$\tau_i = \frac{1}{v_z} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (1.7)$$

Zpoždění, s jakým dorazí akustický signál ke vzdálenějšímu z mikrofonů oproti tomu bližšímu, označíme  $\tau_{ij}$  a lze ho vypočítat následovně.

$$\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j = \frac{1}{v_z} \left( \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \right) \quad (1.8)$$



Obr. 1.5: Hyperbola daná zpožděním dvou signálů

Rovnice 1.8 koresponduje s hyperbolou na obr. 1.5, v jejíž ohniscích jsou mikrofony  $M_i, M_j$  a její hlavní osa je dána  $v_z \tau_{ij} / 2$ , kde  $v_z$  je rychlost zvuku.

Pokud je zpoždění mezi signály kladné, leží zdroj zvuku na té části hyperboly, která se nachází v pravé polorovině kartézské souřadné soustavy (v obrázku červeně). Je-li zpoždění záporné, znamená to, že zdroj zvuku leží v levé polorovině.

Abychom byli schopni určit jednoznačně určit polohu zdroje v rovině, je potřeba znát zpoždění z alespoň dvou párů mikrofonů, které leží na rozdílných souřadnicích. Díky znalosti druhého zpoždění můžeme z rovnice 1.8 sestavit soustavu dvou hyperbolických rovnic, jejichž řešení je možno hledat například iterativně.

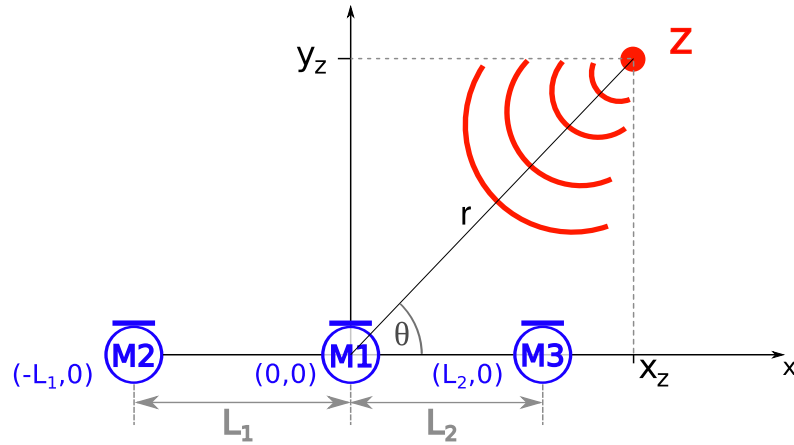
Jiným přístupem k řešení rovnic je postup, který popsal Dr. Y. T. Chan [?]. Ten vytvořil algebraické řešení soustavy hyperbolických rovnic pro speciální případ třech mikrofonů 1.9, které je snadno řešitelné a poskytuje unikátní reálné řešení.

$$\begin{bmatrix} x_z \\ y_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \times \left( \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{31} \end{bmatrix} r + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{21}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{31}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right) \quad (1.9)$$

Přičemž konstanty  $r_{21}$ ,  $r_{31}$  a  $K_1$  až  $K_3$  jsou následující.

$$\begin{aligned} r_{21} &= \tau_{21} v_z \\ r_{31} &= \tau_{31} v_z \\ K_1 &= x_1^2 + y_1^2 \\ K_2 &= x_2^2 + y_2^2 \\ K_3 &= x_3^2 + y_3^2 \end{aligned}$$

Pokud máme všechny tři mikrofony v jedné linii, jak ukazuje obr. 1.6, můžeme definovat souřadnou soustavu tak, že osa  $x$  je dána spojnicí mikrofonů. Osa  $y$  směřuje kolmo na membrány mikrofonů a prochází středem mikrofonu M1.



Obr. 1.6: Rozložení mikrofonů v souřadném systému

$$\begin{bmatrix} x_z \\ r \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{21}^2 - L_1^2 \\ r_{31}^2 - L_2^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -L_1 & r_{21} \\ L_2 & r_{31} \end{bmatrix}^{-1} \quad (1.10)$$

Umístění všech mikrofonů do jedné přímky a mikrofonu M1 do počátku souřadné soustavy má za následek výrazné zjednodušení rovnice 1.9. Ta se pak dá upravit do tvaru 1.10, ze kterého můžeme následně vyjádřit jednu ze souřadnic zdroje a také jeho vzdálenost  $r$ . V tomto případě je ovšem snazší vyjádřit azimut  $\theta$  pomocí poměru  $\frac{x_z}{r}$  a z něho dopočítat obě souřadnice pomocí trigonometrických vzorců.



$$r = \frac{L_1 \left(1 - \left(\frac{r_{21}}{L_1}\right)^2\right) + L_2 \left(1 - \left(\frac{r_{31}}{L_2}\right)^2\right)}{2 \left(\frac{r_{31}}{L_2} + \frac{r_{21}}{L_1}\right)} \quad (1.11)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{x_z}{r}\right) = \cos^{-1} \left(\frac{L_2^2 - 2rr_{31} - r_{31}^2}{2rL_2}\right) \quad (1.12)$$

$$x = r \cos(\theta) \quad (1.13)$$

$$y = r \sin(\theta) \quad (1.14)$$

Výše uvedené rovnice umožňují ze znalosti zpoždění třech signálů zaznamenaných mikrofony spočítat pozici zdroje zvuku. Podrobné odvození veškerých vztahů uvádí například [?], [?].

## 1.5 Dosažené výsledky

Pro ověření funkčnosti výše popsaného postupu jsem vytvořil sadu algoritmů, které jsou pomocí časovače periodicky spouštěny a s 500ms periodou vykreslují vypočtenou pozici zdroje zvuku (sledovaného objektu).

- `[s1, s2, s3] = loadDataFromCsv2('jmenoSouboru.csv')`  
– načtení signálů ze souboru do workspace
- `[s1n, s2n, s3n] = processData(s1, s2, s3)`  
– předzpracování signálů dle 1.2
- `[\tau_{21}, \tau_{31}] = getTDOA(s1n, s2n, s3n)`  
– určení zpoždění signálů
- `[\tau_{21}^*, \tau_{31}^*] = getTimeDifferencesHist(\tau_{21}, \tau_{31})`  
– histogramový filtr odhadů zpoždění dle 1.3
- `plotPosition(\tau_{21}^*, \tau_{31}^*)`  
– výpočet pozice a její zobrazení dle rovnic 1.11 až 1.14

Zde popisované pokusy probíhaly v běžné místnosti (bez protiodrazového obložení stěn) o půdorysu 5,5 x 7m a výšce 2,6m. Vzdálenost mezi jednotlivými mikrofony byla  $L_1 = L_2 = 0,15m$  a rychlost zvuku byla stanovena na  $v_z = 342,21m \cdot s^{-1}$ . Jednotlivé moduly měřící ústředny včetně mikrofونů jsem položil na stůl o výšce 0,8m a rozmístil je přesně dle obr. 1.6.

parametr	symbol	hodnota
azimut	$\theta$	$35^\circ$
radius	$r$	$1m$
délka (x)	$x_z$	$0,82m$
výška (y)	$y_z$	$0,58m$

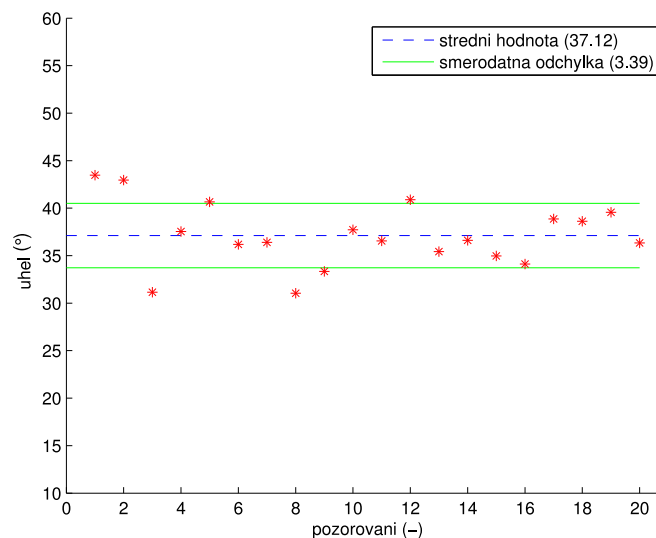
Tab. 1.1: Parametry pokusu pro určení odchyly  $\theta$  a  $r$

Vzhledem k tomu, že v rovnicích pro výpočet pozice zdroje zvuku figurují dvě proměnné  $\theta$  a  $r$ , je možné pomocí opakovaných měření při známé (stacionární) pozici zdroje zvuku určit střední hodnotu a směrodatnou odchytku ze souboru naměřených dat. Takto vypočtené hodnoty následně mohou porovnat s reálnými.

### 1.5.1 Odchytky určení azimutu $\theta$

Pro určení statistických parametrů měření sloužil pokus, kde zdroj zvuku byl umístěn do prostoru a byly pečlivě změřeny jeho souřadnice, azimut a vzdálenost od počátku souřadného souřadného systému (radius). Veškeré údaje jsou uvedeny v tab. 1.1.

Následující graf ukazuje jednotlivé změřené hodnoty pro dvacet pozorování s časovými rozestupy 500ms. Vzorkovací frekvence pro signály z mikrofonů byla nastavena na 50kHz.



Obr. 1.7: Série dvaceti měření azimutu

symbol	skutečná hodnota	střední hodnota	max	min	směr. odchylka
$\theta$	35,0°	37,12°	42,37°	32,72°	3,39°

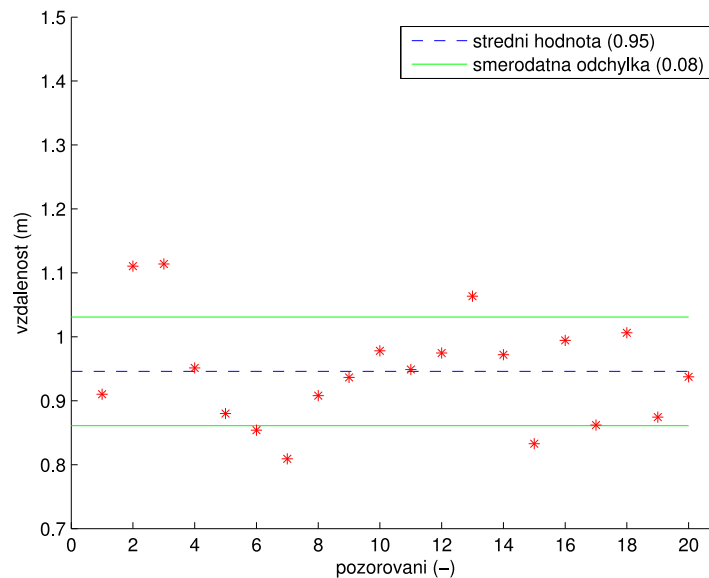
Tab. 1.2: Výsledky pokusu pro určení úhlu  $\theta$

Zelené čáry vyznačují pásmo jedné směrodatné odchylky a modrá přerušovaná čára udává střední hodnotu souboru naměřených dat.

Z grafu a tab. 1.2 je patrné, že střední hodnota vypočteného azimutu (z dvaceti statisticky nezávislých pozorování) je 37,72°. Od skutečné se tedy v průměru liší o 2,72°. Směrodatná odchylka tohoto měření byla 3,39°. Relativní chyba měření činí 6.05%.

### 1.5.2 Odchylka určení vzdálenosti $r$

Určení odchylky radiusu (vzdálenosti)  $r$  bylo provedeno se stejnými parametry (viz tab. 1.1) jako v předchozím případě. Bylo provedeno dvacet pozorování statického zdroje zvuku s 500ms rozestupy při vzorkovací frekvenci 50 kHz. Na obr. 1.8 můžeme vidět výsledek jednotlivých měření.



Obr. 1.8: Série dvaceti měření vzdálenosti  $r$

Z grafu a tab. 1.3 je patrné, že střední hodnota vypočteného radiusu je 0,95m. Od skutečné se tedy v průměru liší o 5 cm. Směrodatná odchylka tohoto měření byla 8cm.

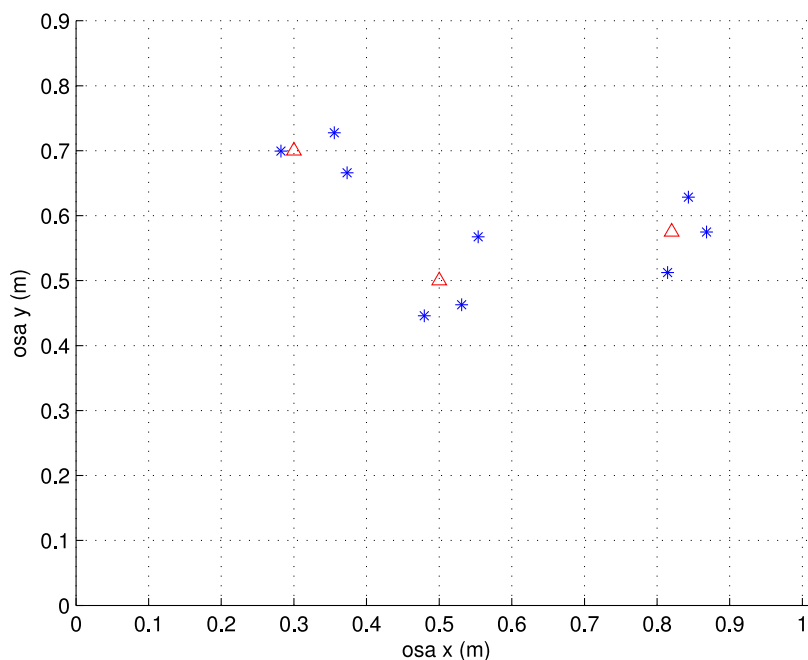
symbol	skutečná hodnota	střední hodnota	max	min	směr. odchylka
$r$	1,0m	0,95m	1,12m	0,82m	0,08m

Tab. 1.3: Výsledky pokusu pro určení vzdálenosti  $r$

V tomto případě bylo dosaženo mírně přesnějších výsledků než při určování azimutu vzhledem k tomu, že relativní chyba měření činí pouze 5.0%.

### 1.5.3 Odchylky vypočtených souřadnic

V tomto pokusu bylo provedeno devět měření, vždy tři pro každou pozici zdroje zvuku. Signál z mikrofonů byl vzorkován frekvencí 50 kHz. Na obr. 1.9 jsou červenými trojúhelníky vyznačeny skutečné pozice zdroje zvuku a body  $*$  ukazují změřenou pozici.



Obr. 1.9: Rozložení mikrofonů v souřadném systému

skutečná pozice (m, m)	změřená pozice (m, m)	odchylka ( $\Delta x(m)$ , $\Delta y(m)$ )
(0,82 , 0,58)	(0,81, 0,51)	(0,01, 0,07)
	(0,87, 0,58)	(-0,05, 0,00)
	(0,84, 0,62)	(-0,02, -0,04)
(0,50 , 0,50)	(0,49, 0,44)	(0,01, 0,06)
	(0,53, 0,46)	(-0,03, 0,04)
	(0,55, 0,57)	(-0,05, -0,07)
(0,30 , 0,70)	(0,29, 0,70)	(0,01, 0,00)
	(0,38, 0,68)	(-0,08, 0,02)
	(0,35, 0,72)	(-0,05, -0,02)

Tab. 1.4: Výsledky pokusu pro určení polohy zdroje zvuku

Tab. 1.4 porovnává skutečné a změřené pozice zdroje zvuku pro všech devět měření. Zde lze vidět, že maximální odchylka pro souřadnici  $x_z$  byla 8cm a pro  $y_z$  7cm.