

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

URČENÍ SMĚRU ZDROJE ZVUKU Z
VICEKANÁLOVÉHO AUDIOSIGNÁLU

DETERMINATION OF SOUND SOURCE ORIENTATION FROM MULTICHANNEL
AUDIOSIGNAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ARTEM SUMTSOV

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ KREJSA PHD.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Artem Sumtsov

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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

Určení směru zdroje zvuku z vícekanálového audiosignálu

v anglickém jazyce:

Determination of sound source orientation from multichannel audiosignal

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracujte metodu která na základě vícekanálového audiosignálu (minimálně 3 mikrofony) určí směr zdroje zvuku.

Cíle bakalářské práce:

1. proveďte rešerši vhodných metod
2. pro data získaná ze 3 všesměrových mikrofonů s kulovou charakteristikou (data jsou k dispozici) zpracujte metodu na určení směru zdroje signálu

Seznam odborné literatury:

Zaplatílek, Doňar: Matlab, začínáme se signály

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 15.11.2010

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této práce bylo provedení rešerše vhodných metod pro určování směru zdroje zvuku a následné jejich zpracování. Tato práce popisuje postupně čtyři metody určení zpoždění signálů z jednotlivých kanálů. Každá z popsaných metod je posouzena z hlediska vhodnosti, použitelnosti, případně chybovosti nebo citlivosti na určité podmínky. Dále je také popsán geometrický model pro určení směru zdroje zvuku na základě získaných zpoždění. Práce je doplněna sadou experimentálně získaných dat a konkrétních výpočtů ukazujících reálné možnosti algoritmů. Experimentální řešení jsou prováděna pro situaci se třemi mikrofony. Výpočty jsou prováděny v programu Matlab.

SUMTSOV, A. *Určení směru zdroje zvuku z vícekanálového audiosignálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 27 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto práci jsem napsal samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a že jsem uvedl využití zdroje v seznamu použité literatury.

V Brně

Artem Sumtsov

PODĚKOVÁNÍ

Tady bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Krejsovi, PhD za kolegiální přístup, cenné rady a trpělivost. Rád bych poděkoval také svému otci za podporu po dobu celého studia, bez které bych se neobešel.

OBSAH

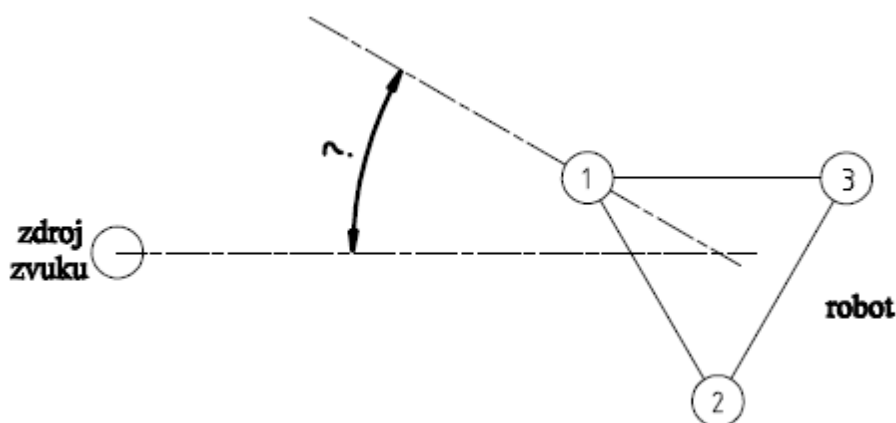
ABSTRAKT	5
OBSAH.....	11
1. ÚVOD.....	13
1.1. Motivace	13
1.2. Koncept řešení	14
2. ŘEŠENÍ	15
2.1. Použitá technika, popis měření a dat	15
2.2. Metody určování zpoždění signálu.....	16
2.2.1. Metoda porovnávání maxima.....	16
2.2.2. Metoda sčítací	18
2.2.3. Metoda korelačního porovnávání.....	21
2.2.4. Metoda fázové korelace	22
2.3. Geometrický model	23
3. ZÁVĚR.....	27
POUŽITÁ LITERATURA	29
PŘÍLOHY	31

1. ÚVOD

1.1. Motivace

V dnešní době se setkáváme s roboty různých druhů. Obklopují nás doma i v práci, spoléháme na ně a v každodenním životě je využíváme. Vyrábí se po stovkách pro různé účely a mají různé schopnosti. Spousta z nich jsou systémy s mnoha součástmi, jako jsou senzory, palubní počítače, mikroprocesory a akční členy. Tato složitost vede na jednu stranu k mnoha možnostem a funkcím, což je pochopitelně velké plus, ovšem na stranu druhou taky k větší složitosti a taky nezanedbatelně větší výrobní ceně. Proto je tendence vymýšlet roboty spíše jednodušší, jen s potřebným množstvím vybavení, který však spolehlivě funguje.

Ze stejné myšlenky – udělat robota co nejjednoduššího, vznikl projekt s pracovním názvem Oslík. Použitím robot – nosič, který by mohl sloužit například jako nosič těžkých nákladů, vybavený sadou tří mikrofonů, jednoduchým kontrolérem a pohybovou soustavou, robot schopný rozeznávat hlasové příkazy (např.: vpřed, doprava, stůj, ke mně.), vyhodnotit je a reagovat pohybem. Právě pro vykonání posledního zmíněného povelu musí mít robot schopnost rozeznat, ze které strany povel přichází. V této bakalářské práci se věnuji právě poslední ze zmíněných schopností robota – určování půdorysného směru zdroje zvuku pomocí zmíněné sady mikrofonů



Obrázek 1. Ilustruje podstatu problému. 1, 2, 3 jsou jednotlivé mikrofony

1.2. Koncept řešení

Počáteční úvahy vedly na dva možné směry k řešení. První vedl přes rozdíly zvukových intenzit naměřených na jednotlivých mikrofonech. Z toho by v dalším kroku byl odvozen směr zdroje zvuku. Tento postup se ale zdál být nepoužitelný. Stačí totiž, aby se ozval jiný zdroj zvuku (náhodný šum, rána, výkřik) z jiného směru, a rozložení intenzit mezi mikrofony bude mít změněný charakter a už z něj půjde stěží něco smysluplného vyvodit.

Zvolil jsem druhý směr, který počítal s časovými prodlevami zvukového signálu na jednotlivých mikrofonech. Při převodu zvuku do digitální podoby se ve velmi krátkých časových intervalech zjišťuje a zaznamenává hodnota napětí. Čím častěji se tato hodnota zjišťuje, tím přesnější je potom nahrávka, na druhou stranu se tím zvětší objem nahraných dat. Počet těchto zjištění za sekundu udává takzvanou vzorkovací frekvenci. Podle Nquistova teorému, aby nedošlo ke zkreslení dat při digitalizaci signálu, musí být vzorkovací frekvence nejméně dvojnásobně větší než nejvyšší frekvence digitalizovaného signálu. Protože je lidské ucho schopno rozpoznat zvuk až do frekvence 22 kHz, pro nahrávání se běžně se používá vzorkovací frekvence 44 kHz. Takové rozlišení nám umožní zachytit rozdíl s dostatečnou přesností. Pomocí znalostí o rychlosti šíření zvuku v prostoru se potom lze snadno dostat na rozdíly vzdáleností drah od zdroje k jednotlivým mikrofonom. Tyto rozdíly vzdáleností potom poslouží jako vstupní hodnoty geometrického modelu pro výpočet úhlu a určení směru.

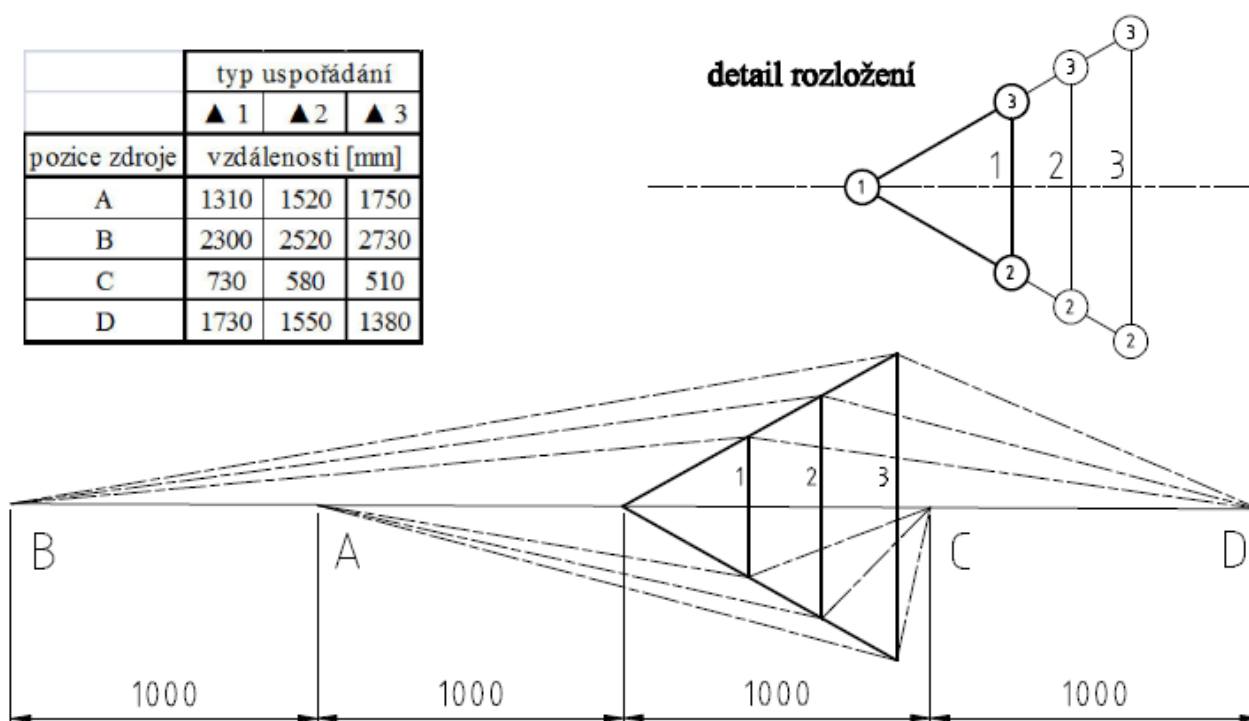
Jako vstup do geometrického modelu poslouží jednotlivá zpoždění mezi kanály. Tyto hodnoty jsou logicky vyhodnoceny a zpracovány. Výstupem jsem hodnoty úhlů mezi danou nulovou hodnotou a konkrétním měřením. Samotný geometrický model spočívá ve speciálních případech v logickém přiřazení přímo úhlu, nebo v obecném případě v přiřazení oblasti a následného dopočítání konkrétního úhlu směru zdroje zvuku.

Data, která jsem dostal k dispozici, byla naměřená v laboratorních podmínkách tedy bez výrazného šumu z okolí. Při reálném nasazení však možnost vyhnout se nepředvídatelnému šumu neexistuje. Proto je možné, že pokud by zde vysvětlené postupy byly vyzkoušeny přímo v terénu, dosáhlo by se horších výsledků. Pro lepší výkon v terénu by zřejmě bylo třeba implementovat detekci povelů. Ta je ovšem relativně složitá a je nad rámec bakalářské práce.

2. ŘEŠENÍ

2.1. Použitá technika, popis měření a dat

Pro nahrávání bylo použito nahrávací zařízení Roland Edirol R-44 v kombinaci se třemi mikrofony DPA 4060 s kulovou charakteristikou. Jedná se o charakteristiku směrovou, která je dána konstrukcí a velikostí pouzdra mikrofону a určuje, jak intenzivně mikrofon přijímá zvuk z různých směrů. Kulová charakteristika znamená, že mikrofon přijímá zvuk ze všech směrů stejně intenzivně. Tyto mikrofony byly uspořádány do tvaru rovnostranného trojúhelníka. Postupně byly vyzkoušeny tři velikosti trojúhelníků. Zdroj zvuku byl vždy umístěn na osu procházející mikrofonom 1 a těžištěm trojúhelníka. Pro každou kombinaci velikosti trojúhelníka a pozice zdroje zvuku byly zvukové signály naměřeny vždy šestkrát. Dohromady dvacetčtyři trojic záznamů pro každou velikost trojúhelníka.

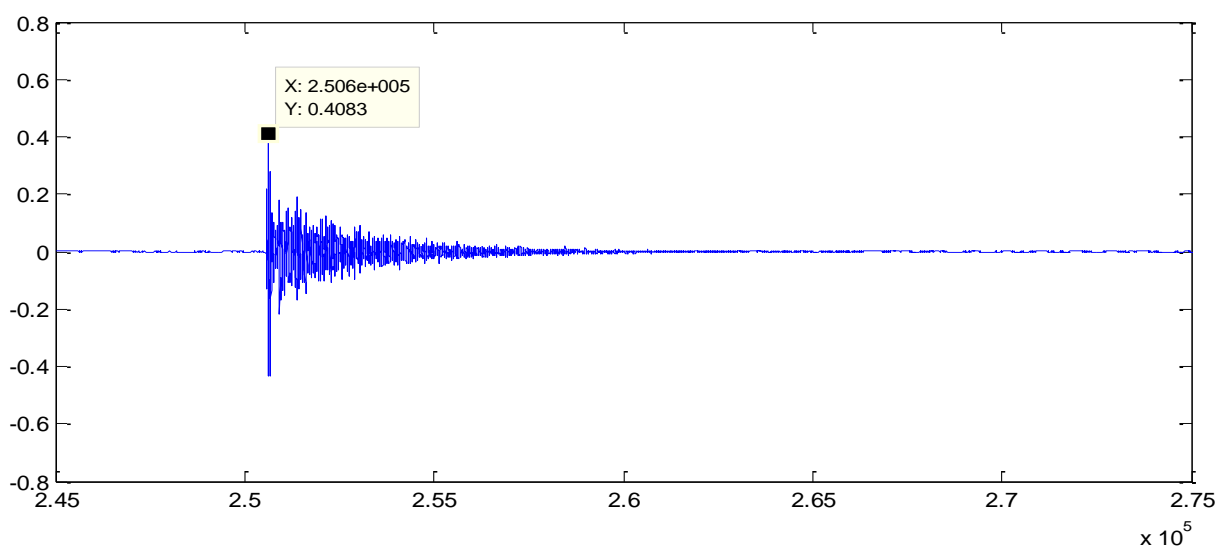


Obrázek 2. Na obrázku je znázorněné uspořádání při pořizování nahrávek. Byly použity tři velikosti trojúhelníkového rozložení vzestupně podle velikosti 1, 2 a 3. Zdroj zvuku byl postupně umísťován do pozic A, B, C a D. Vzdaľenosti v tabulce značí vzdálenosti od zdroje zvuku k mikrofonom 2 a 3. Detail v pravém horním rohu znázorňuje číslování mikrofonom

2.2. Metody určování zpoždění signálu

2.2.1. Metoda porovnávání maxima

První způsob řešení se ukázal být poměrně jednoduchý. Řekl jsem si, že se podívám na signály z jednotlivých mikrofonů v časové oblasti. Předpokládal jsem, že amplituda signálu bude vždy dosahovat maxima na stejném místě průběhu. Stačilo tedy pro záznam z každého mikrofonu určit, na kterém vzorku nabývá amplituda nejvyšší hodnoty a následně je navzájem porovnat. Tím jsem získal počet vzorků, o který se liší polohy maxim amplitud a následně z toho časové prodlevy mezi jednotlivými mikrofony.



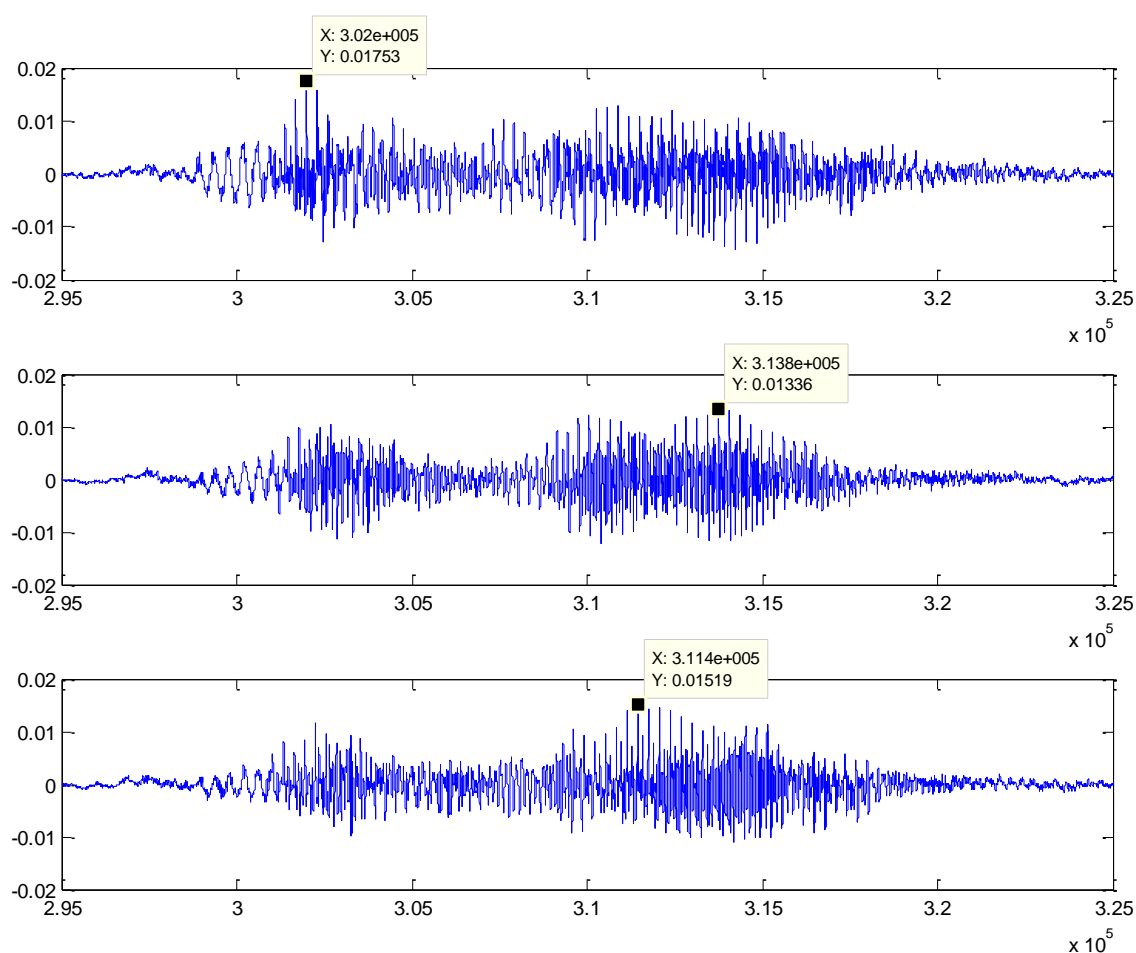
Obrázek 3. Na obrázku vidíme jasně vyznačený bod s největším napětím.

Tato procedura lze v Matlabu provést jednoduše. Například takto.

```
1. data1 = wavread(cesta_k_souboru);  
2. [max, aIn] = max(data1);
```

Na prvním řádku do proměnné data1 uložíme hodnoty průběhu napětí zvukové stopy. Na druhém řádku vytvoříme 2D vektor definovaný maximální hodnotou napětí a prádovým číslem vzorku na kterém tato hodnota nabývá. Tuto proceduru opakujeme pro signály z každého ze tří mikrofonů. Následně od sebe poodečítáme indexy jednotlivých kanálů abychom zjistili jejich vzájemné zpoždění.

Při zkoušení této metody jsem ale narazil na fakt, že její použitelnost silně závisí na charakteru snímaného signálu. Fungovala dobře pro signály bez výrazného šumu, krátké s jasnou amplitudovou špičkou – cinknutí nebo plesknutí (viz. Obrázek 4). Při použití hlasových příkazů se však tato metoda ukázala jako nespolehlivá. U víceslabičných povelů byly průběhy zvlněny a nejvyšší intenzita se vlivem náhodné chyby mohla objevit na několika různých místech. Náhodnou chybou v této chvíli míním vliv odrazy v prostředí a různé druhy šumů.



Obrázek 4. Na obrázku vidíme znázorněné průběhy nahrávek stejného povelu zaznamenaného různými mikrofony. Ukazuje, jak určení napětového maxima nemusí vždy znamenat stejné místo na průběhu povelu.

2.2.2. Metoda sčítací

Tato metoda byla vyvinuta se značnou spoluprací s vedoucím práce. Proto je poněkud sofistikovanější. Zaměřuje se na praktické věci, jako je například odstranění šumu, který zpracovávání signálu komplikuje. K tomuto účelu používá ve zpracovávání signálů všeobecně rozšířený konvoluční filtr. Mezi další praktické věci použité v této metodě je odhad délky porovnávaných signálů a odhad jejich maximálních rozdílů. Spolu s detekcí začátku sledovaného signálu totiž můžeme pro porovnávání „vystříhnout“ pouze jeho pro nás zajímavou část. Tu potom porovnááme se signály z ostatních mikrofonů jen v blízkém okolí počátku vystříženého signálu. Takový postup nám výrazně zmenší objem zpracovávaných dat a to znamená zrychlení výpočtů.

Samotný postup začíná odstraněním šumu. V tomto případě byl použit již zmíněný konvoluční filtr. Funguje na jednoduchém principu. Máme vektor signálu v o délce m a vytvoříme vektor filtru u o délce n . Potom konvolucí těchto dvou vektorů dostáváme nový vektor w o délce $n+m-1$, jehož každý prvek vznikne součtem

$$w(k) = \sum_j u(j)v(k + 1 - j) \quad (1)$$

V programu matlab je tato operace zastoupená přímo funkcí `conv(x, y)`. Realizace výše zmíněného filtru vypadá například takto

```
1. h = [0.5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0.5]/10;  
2. if convolution > 0  
3.     data1 = conv(h,data1);  
4. end
```

v tomto případě je jako filtr použitý vektor h o dvaceti prvcích. Filtr lze zapnout nebo vypnout volbou proměnné `convolution`. `Data1` je zvukový signál v časové oblasti vyjádřený vektorem průběhu napětí v závislosti na čase. V případě aktivního filtru se nový delší vektor přefiltrovaného signálu uloží na místo starého. Tento filtr jsem později použil i v ostatních metodách.

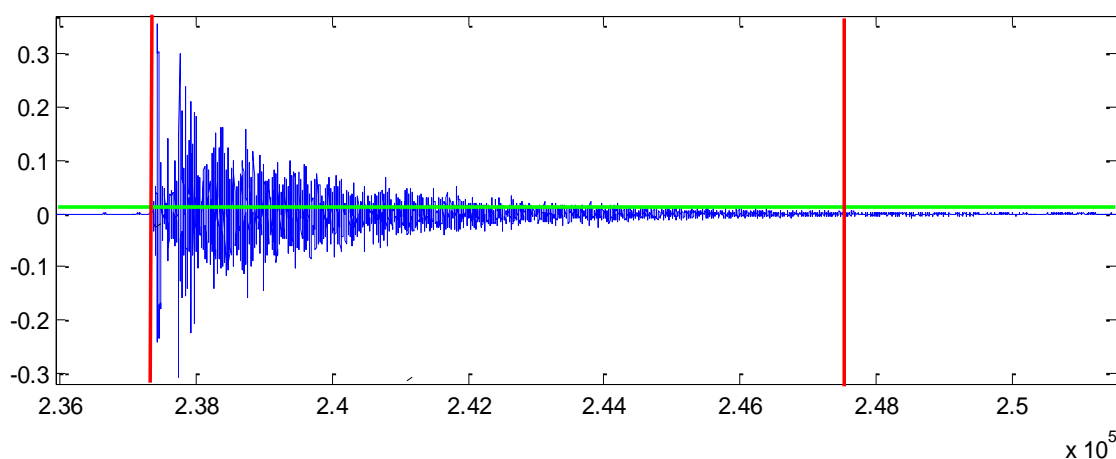
V dalším kroku, za účelem výpočtového zjednodušení se odhadne délka pro nás zajímavého signálu a v časovém úseku se určí jeho počátek. V Matlabu se to může provést například takto

```

1. ln = length(data1);
2. wlength = round(fs);
3. wstart = -1;
4. for i=1:length(data1)
5.     if data1(i) > threshold
6.         wstart = i;
7.         break;
8.     end
9. end

```

Na řádce 2 se do proměnné *wlength* uloží odhadovaná délka povelu. V tomto případě je to proměnná *fs*, která je pro jistotu zaokrouhlená na celé číslo. Na řádce 3 si do proměnné *wstart* udávající počátek signálu uložíme počáteční zápornou hodnotu. Na řádcích 4 až 9 zkusíme identifikovat začátek signálu postupným porovnáváním hodnot vektoru signálu s předem zvolenou prahovou hodnotou uloženou v proměnné *threshold*. Ve chvíli kdy skript na takovou hodnotu narazí, zapíše si číslo vzorku na kterém se tak stalo do proměnné *wstart*. Můžeme pro jistotu přidat druhou úroveň detekce použitím stejného úseku skriptu zařazeného pod tento s menší prahovou hodnotou. Takové opatření by mohlo vyřešit část případů, kdy po prozkoumání celého vektoru není nalezena hodnota větší než prahová. V případě, že ani druhá úroveň detekce nenašla počátek signálu, je dobré mít odpovídající zpětnou vazbu. Ta se dá realizovat například zjištěním znaménka proměnné *wstart*. Zůstane-li záporné, počátek nebyl nalezen.

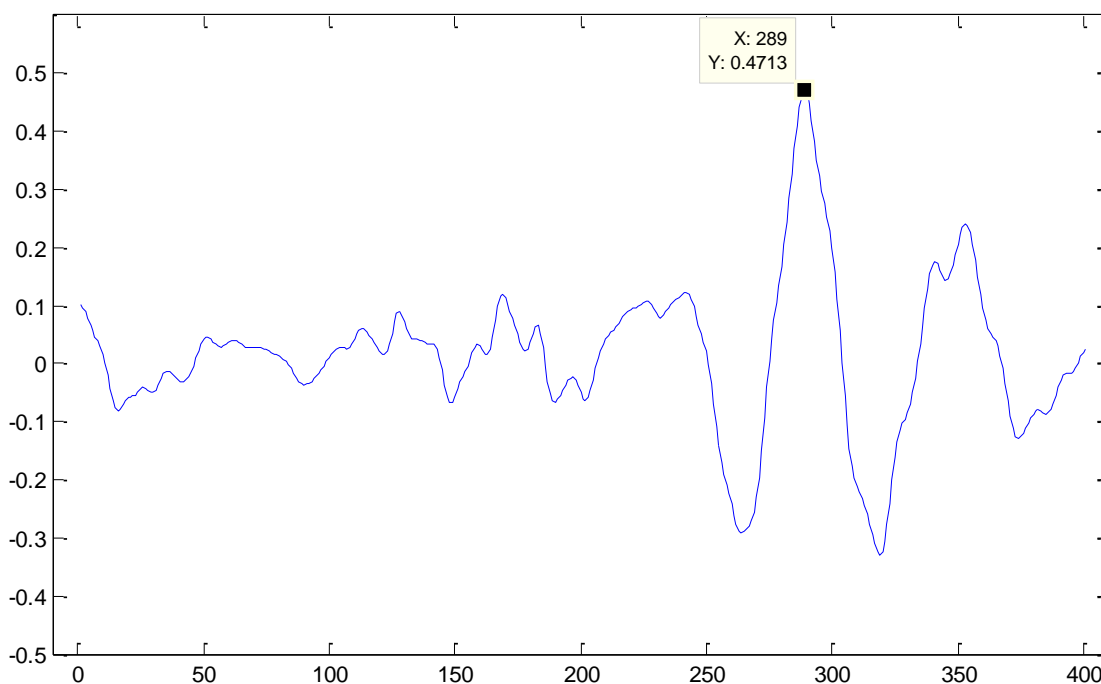


Obrázek 5. Na obrázku je znázorněný *threshold* (zeleně) a část postačující pro porovnávání, vhodná k „vystřížení“ (mezi červenými svislými čarami)

Samotné porovnávání probíhá pomocí funkce, jejímž vstupem jsou dva vektory zvukových stop v časové oblasti a , b , počátek signálu $wstart$, odhad délky povelu $wlength$ a odhad maximálního časového posunu obou signálů $delta$. V Matlabu vypadá takto

```
1. function [signalmatch] = signalmatching(a,b,wstart,wlength,delta,)  
2. s1 = a(wstart:wstart+wlength);  
3. cnt = 1;  
4. for i=wstart-delta:wstart+delta  
5.     s2 = b(i:i+wlength);  
6.     m = matching(s1,s2);  
7.     signalmatch(cnt) = m;  
8.     cnt = cnt + 1;  
9. end;
```

Použitá vnořená funkce *matching* je obyčejný skalární součin. Výstupem této funkce je vektor délky $2*delta+1$ vyjadřující podobnost dvou zkoumaných signálů (viz. Obrázek 6). V bodě s maximální hodnotou si podobají nejvíce. Pro zjištění časové prodlevy pak stačí od hodnoty $delta+1$ odečíst index maxima výstupního vektoru.



Obrázek 6. Na obrázku je znázorněná křivka podobnosti dvou porovnávaných signálů užitím sčítací metody. Vyznačený bod je místo největší shody signálů.

2.2.3. Metoda korelačního porovnávání

Následující metoda využívá korelační funkce, která se značí R . Tato funkce nese informaci o souvislosti náhodného signálu $x(t)$ pro $t = t_0$ s hodnotou tohoto signálu (nebo jiného signálu $y(t)$) pro $t = t_1 = t_0 + \tau$. V digitální diskrétní rovině jsou funkce nahrazeny posloupnostmi $x(n)$, případně $y(n)$, kde $n = 0, 1, \dots, M-1$. Matematický vzorec pro výpočet korelační posloupnosti $R_{xy}(\tau)$ je

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x(i + \tau)y(i) \quad (2)$$

Funkce popisující podobnost téhož signálu se nazývá autokorelační a její matematická interpretace je lehkou modifikací předchozí rovnice.

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x(i + \tau)x(i) \quad (3)$$

V Matlabu je vytváření korelačních posloupností realizovatelné pomocí příkazu `xcorr`. [2] Pro získání vzájemného posunu signálu a tedy i stanovení časové prodlevy postačí provést autokorelaci jednoho ze signálů a vzájemnou korelaci toho signálu se signálem jiným. Rozdíl polohy maximálních hodnot výsledných posloupností nám vyjadřuje výsledné posunutí zkoumaných signálů. V Matlabu to lze zapsat například takto

```

1. x=xcorr(data1);
2. [maxX, InX]=max(x);
3. x2=xcorr(data1, data2);
4. [maxX2, InX2]=max(x2);
5. delta12=InX2-InX;

```

Data1 a *data2* představují srovnávané signály v časové oblasti. Výsledná proměnná *delta12* je hledaný rozdíl.

2.2.4. Metoda fázové korelace

Poslední z metod určování zpoždění signálu je nejnáročnější. Jedná se o metodu fázové korelace, využívající rychlou Fourierovu transformaci k převodu zvukového záznamu z časové oblasti do spektrální. Výhodou práce se signály ve spektrální oblasti je jednodušší filtrace a srovnávání. Při filtraci se obvykle ořezávají nejvyšší a nejnižší části spektra, které představují šum. Při srovnávání vidíme jasně zastoupení spektrálních složek signálu, které jsou v časové oblasti promíchány. Využití rychlé Fourierovy transformace je natolik rozšířené, že je přímo implementována v programech jako je Matlab, Maple, Mathcad nebo Octave. Tato metoda stojí na velmi komplikovaném matematickém základu, který se bohužel vymyká bakalářskému chápání.

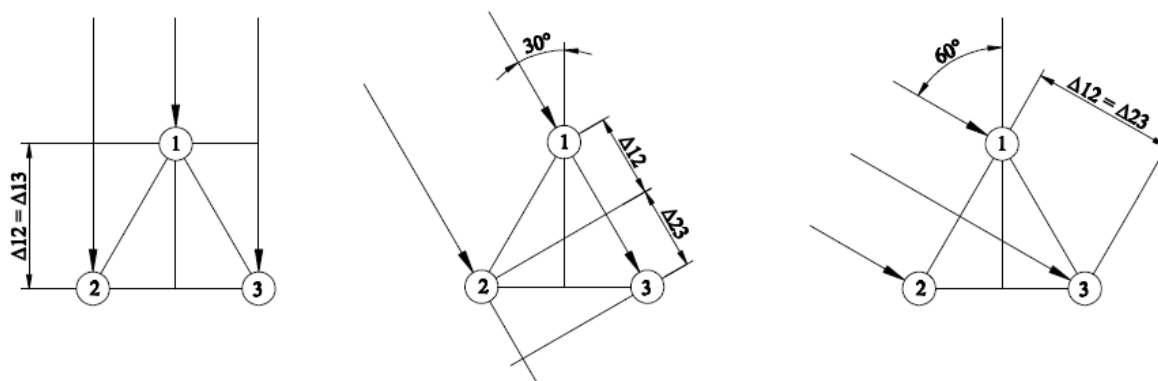
Dostal jsem však od vedoucího práce hotový skript, s pomocí kterého jsem byl schopný si tuto metodu vyzkoušet na měření získaných datech. Celý tento skript je připojen v příloze 1.

2.3. Geometrický model

Jako vstupy do geometrického modelu nám slouží zpoždění mezi jednotlivými mikrofony. Jsou to hodnoty ΔI_2 , ΔI_3 , ΔI_3 – časové prodlevy mezi mikrofony 1 a 2, 1 a 3, 2 a 3. Tyto hodnoty jsou přímo výstupem metod popsanych v předchozí kapitole. Můžou to být čísla kladná i záporná a znaménka mají svůj význam. Například je-li hodnota ΔI_2 kladná, znamená to, že mikrofon 1 leží blíže zdroji než mikrofon 3.

Při vytváření geometrického modelu jsem si dovolil úlohu ulehčit. Řekl jsem si, že vzdálenost zdroje od mikrofonů je mnohem větší než vzájemné vzdálenosti jednotlivých mikrofonů. Proto lze považovat přicházející vlny za rovnoběžné. Tímto jsem si za cenu zanedbatelných nepřesností značně zjednodušil výpočty a mohl se zaměřit na geometrickou podstatu problému.

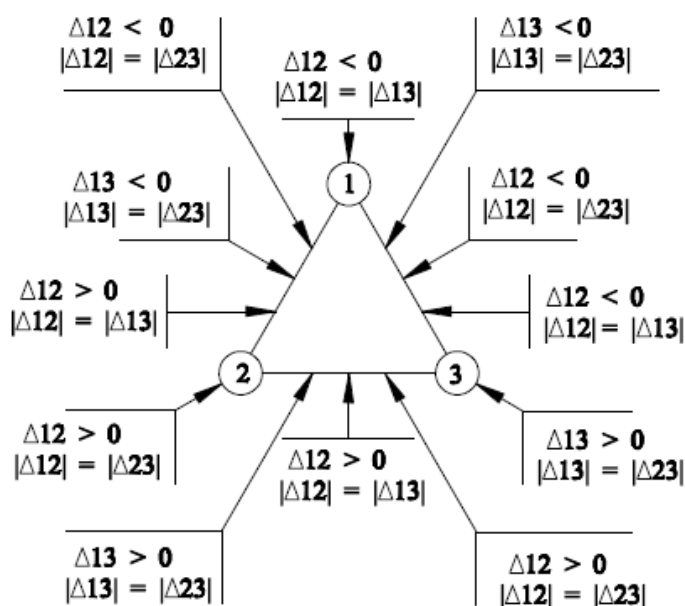
Všiml jsem si, že v několika případech lze z hodnot zpoždění rovnou vyvodit směr zdroje zvuku. Představíme-li si trojúhelníkové rozložení mikrofonů (viz Obrázek 7). Jsou to případy, kdy zvuk přichází rovnoběžně s osou některé ze stran trojúhelníkového rozložení nebo jednou ze stran trojúhelníka. Pokud bereme nulu, jako osu úhlu trojúhelníku procházející mikrofonem 1 s počátkem v těžišti, znamená to, že v těchto případech leží směr zdroje zvuku na 30° nebo jejich k násobku od 0 do 12.

a) zdroj zvuku leží na 0° b) zdroj zvuku leží na 30° c) zdroj zvuku leží na 60°

Obrázek 7.

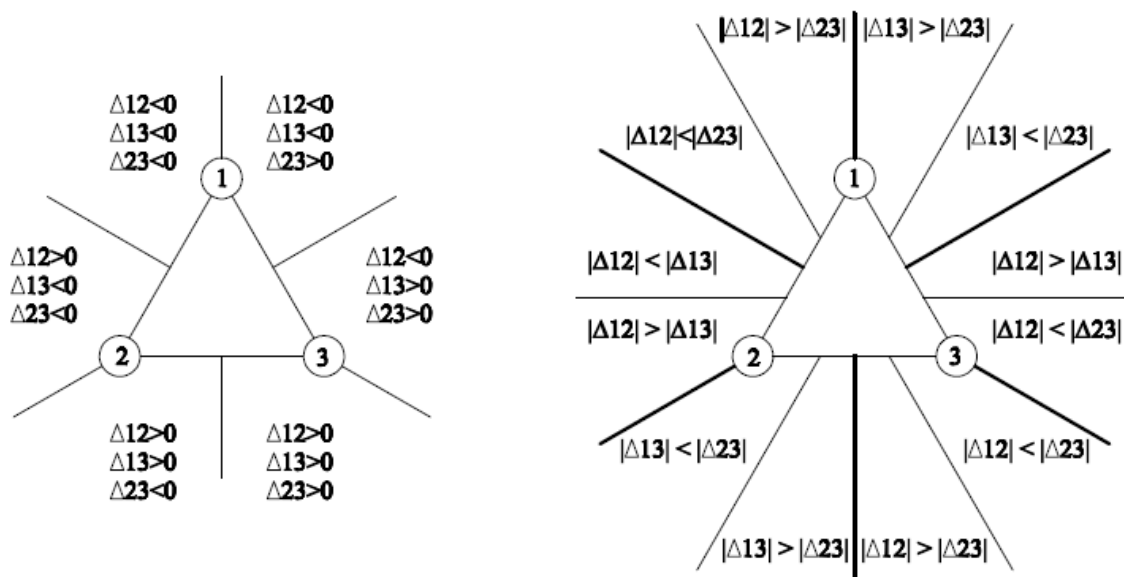
Na obrázku 7 jsou znázorněny některé případy, kdy je možné přímo rozhodnout o směru zdroje zvuku. Tyto případy nastávají, když se velikosti některých dvou prodlev shodují.

Případy a) a c) lze navíc poznat podle toho, že jedna z prodlev je nulová (Δ_{23} v případě a), Δ_{12} v případě c)). Z výše napsaného vyplývá, že pro určení směru zdroje zvuku v těchto speciálních případech nám stačí vědět, které dvě velikosti rozdílu se rovnají a znaménko jednoho z nich.



Obrázek 8. Na obrázku vidíme znázorněné speciální případy, kdy je možné po splnění určitých logických podmínek jsme schopni přímo rozhodnout o směru zdroje zvuku.

Tyto logické operace jsou jednoduše naprogramovatelné a v algoritmu určování úhlu se tyto jasné polohy zkoumají jako první. Všechny ostatní případy leží mezi některými ze sousedních dvou znázorněných směrů. Porovnání s nulou nám rozdělí rovinu třemi osami na šest částí a následné porovnání příslušných hodnot každou tuto část ještě rozpůlí. (viz Obrázek GM-3). Toto rozpůlení je velice důležité, neboť hraje roli při určování úhlu v obecném případě. Poměr velikostí zpoždění je totiž přímo úměrný poměru úhlových vzdáleností směru přicházejícího zvuku. Právě přechodem směru zvuku přes osu rovnosti velikosti zpoždění se z přímé úměry stane nepřímá.



a) oblasti dané znaménkem zpoždění

b) oblasti dané porovnáním velikostí zpoždění

Obrázek 9.

Pro určení úhlu tedy napřed určíme oblast, ve které se pohybujeme. To nám dá počáteční úhel. Potom určíme podoblast kvůli použití správného poměru a případného přičtení úhlové konstanty pro podoblast začínající v půlce prvotně určené oblasti. Nakonec určíme součin poměru velikostí zpoždění s úhlovou šířkou podoblasti. Po sečtení všech členů dostáváme směr zdroje zvuku. Tento slovně obtížně vyjádřitelný proces lze v programu Matlab jednoduše zapsat takto:

```

if (delta12<=0) & (delta13<=0) & (delta23>=0)
    Fi0=0;
    if abs(delta13)>=abs(delta23)
        Fi=Fi0+abs(delta23+c)/abs(delta13+c)*pi/6;
    else
        Fi=Fi0+pi/3-pi/6*(delta13+c)/(delta23+c);
    end
end
end

```

v tomto algoritmu je použita konstanta c , která je velmi malá a je přičítána k hodnotám zpoždění ve jmenovateli.

3. ZÁVĚR

V této práci jsem provedl rešerši vhodných metod pro určování směru zdroje zvuku. Vyzkoušel jsem si čtyři metody pro určování zpoždění signálů z jednotlivých mikrofonů na souboru experimentálně naměřených dat. Výsledky těchto metod jsem použil jako vstupní data do navrženého geometrického modelu. Výstupem geometrického modelu je půdorysný úhel směru zdroje zvuku počítaný od polopřímky s počátkem v těžišti mikrofonového uspořádání a procházející středem mikrofonu 1. Výsledky pro jednotlivé metody s použitím geometrického modelu jsou přiloženy k nahlédnutí v přílohách 2 až 5.

Zcela dle očekávání se metoda porovnávání maxima ukázala být jako nejnepřesnější. Je to dáno její již zmíněnou slabinou – slovními příkazy. Tato metoda je velmi nepřesná vždy tam, kde jako povel nebyl použit zvuk s jednou amplitudovou špičkou. Na druhou stranu je tato metoda výpočetně nenáročná a ve většině případů data i za cenu relativně velkých chyb zpracovala.

Sčítací metoda nakonec vyšla, co se počtu selhání týče, nejhůř. Domnívám se, že k tak četným selháním vedla kombinace vlivu šumu a detekčního skriptu, který odmítal některé signály zpracovat. Ačkoliv v ostatních případech si tato metoda nevedla špatně, ve více než čtvrtině případů selhala úplně.

Poslední dvě metody se ukázaly být jako nejpřesnější. Obě metody vedly k podobně přesným výsledkům. Významný rozdíl je v podílu selhávání. Zatím co metoda korelačního porovnávání nebyla schopná zpracovat 12,5% dat, metoda fázové korelace si neporadila pouze s 2,8% vstupních hodnot.

použitá metoda	selhání		chyba							
			< 2,5%		< 5%		< 10%		10+%	
	počet	%	počet	%	počet	%	počet	%	počet	%
porovnávání maxima	6	8,3	34	47,2	8	11,1	2	2,8	21	29,2
sčítací metoda	19	26,4	38	52,8	3	4,2	4	5,6	9	12,5
metoda fázové korelace	2	2,8	54	75,0	3	4,2	4	5,6	9	12,5
metoda korelačního porovnávání	9	12,5	48	66,7	4	5,6	2	2,8	9	12,5

Tabulka 1. Tabulka ukazuje srovnání metod z hlediska spolehlivosti a přesnosti. Už při letmém pohledu je jasné, že nejvhodnější ze zkoumaných metod je metoda fázové korelace.

POUŽITÁ LITERATURA

1. **DOŇAR BOHUSLAV, ZAPLATÍLEK KAREL. MATLAB PRO ZAČÁTEČNÍKY.**
vyd. BEN - technická literatura, 2005. ISBN: 80-73000-175-6
2. **DOŇAR BOHUSLAV, ZAPLATÍLEK KAREL. MATLAB – ZAČÍNÁME SE
SIGNÁLY.** vyd. BEN - technická literatura, 2006. ISBN: 80-7300-200-0
3. **JIŘÍ JAN. ČÍSLICOVÁ FILTRACE, ANALÝZA A RESTAURACE SIGNÁLŮ.** vyd. Brno
VUTIIUM, 2002. ISBN 80-214-1558-4.

PŘÍLOHY

Příloha P-1 ... jedná se o skript pro určování zpoždění signálu využívající popsané metody fázové korelace. Je napsaný pro program Matlab.

Příloh P2-P5 ... tyto čtyři tabulky ukazují výsledky dosažené použitím jednotlivých metod určování zpoždění signálu a následně aplikováním geometrického modelu.

```

1. function [C, Cmax, CmaxI, Cmin, sigmaratio] =
   fazova_korelace1(A,B,c1,c2,fullrange);
2. % funkce na fazovou korelaci 1D signalu
3. % A,B - dva vstupni signaly
4. % c1, c2 - male konstanty prictene ke jmenovateli
5. % fullrange = 1 -> hledani extremu v celem intervalu C,
   = 0 -> hledani jen na krajich
6. % C vystupni signal C =
   invF(F(A)*Fspruhem(B))/(abs(F(A))*abs(F(B)))
7. % Cmax - maximum korelace
8. % CmaxI - index maxima
9.
10. Fa = fft(A);
11. Fb = fft(B);
12. Fbc = conj(Fb);
13. nom = Fa.*Fbc;
14. denom = (abs(Fa)+c1).*(abs(Fb)+c2);
15. Ci = nom ./ denom;
16.
17. %figure
18. %subplot(2,1,1)
19. %plot(real(Ci));
20. %subplot(2,1,2)
21. %plot(imag(Ci));
22.
23. C = ifft(Ci);
24. if fullrange == 0
25.     C2 = C(1:150);
26.     C2(151:300) = C(length(C)-149:length(C));
27.     [Cmax,CmaxI] = max(C2);
28.     if CmaxI > 150
29.
30.         CmaxI = CmaxI -150 + length(C)-149;
31.     end
32.     Cmin = min(C2);
33. else
34.     [Cmax,CmaxI] = max(C);
35.     Cmin = min(C);
36. end
37.
38. stdC = std(C);
39. sigmaratio = Cmax / stdC;

```

Příloha 1. Jedá se o skript pro zjištění zpoždění signálu využitím fázové korelace

opravdová poloha zdroje	metoda porovnávání maxima											
	malý trojúhelník				střední trojúhelník				velký trojúhelník			
	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 23$	$\varphi [^\circ]$	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 23$	$\varphi [^\circ]$	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 23$	$\varphi [^\circ]$
A => 0°	-36	-37	-1	359	-65	-53	12	7	-93	-509	-416	307
A => 0°	-38	-27	11	12	-63	-486	-423	304	-91	-94	-3	359
B => 0°	-36	-37	-1	359	-63	-62	1	0	-91	-87	4	1
B => 0°	-36	-38	-2	358	-310	-64	246	68	-50	163	213	218
A => 0°	10369	139720	129350	122	107900	108110	206	180	-959	1525	-566	342
A => 0°	-9150	-12442	-3292	349	157560	2649	-154910	241	8009	7875	134	1
B => 0°	-933	-538	395	22	-5511	-119	5392	61	8394	2186	6208	71
B => 0°	973	142	-831	245	1977	-2674	-4651	341	1531	2439	-908	342
C => 180°	29	33	4	176	-31	50	81	168	68	61	-7	183
C => 180°	32	36	4	176	46	67	21	166	58	73	15	172
D => 180°	38	37	-1	181	59	59	0	180	86	82	-4	181
D => 180°	197	-374	-571	357	58	60	2	179	79	82	3	179
C => 180°	1373	1039	-334	190	360	362	2	180	selhání			
C => 180°	791	881	90	177	selhání				3294	3071	223	2
D => 180°	10083	9438	-645	182	selhání				403	-235	-638	291
D => 180°	selhání				-11954	-650	11304	62	3019	2498	-521	186
A => 0°	-29	-29	0	360	-346	-347	-1	360	-339	-343	-4	360
A => 0°	-30	-32	-2	358	-26	-586	-560	301	303	573	270	153
B => 0°	-380	-250	130	16	-56	-55	1	1	-90	-90	0	360
B => 0°	-651	-36	615	62	-49	-56	-7	356	-250	-90	160	77
C => 180°	selhání				34	32	-2	182	0	35	35	120
C => 180°	21	16	-5	189	320	318	-2	180	48	70	22	166
D => 180°	54	55	1	179	306	293	-13	181	69	76	7	177
D => 180°	selhání				61	61	0	180	-236	65	301	169

Příloha 2. Obsahuje výsledky metody porovnávání maxima a následně geometrického modelu po projetí dostupným souborem měření.

opravdová poloha zdroje	sčítací metoda											
	malý trojúhelník				střední trojúhelník				velký trojúhelník			
	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 23$	$\varphi [^\circ]$	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 23$	$\varphi [^\circ]$	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 23$	$\varphi [^\circ]$
A => 0°	-36	-33	5	5	-66	-60	3	2	-91	-89	1	0
A => 0°	-34	-32	2	2	-13	-61	0	360	-90	-92	-2	359
B => 0°	-29	-33	2	2	selhání				selhání			
B => 0°	-29	-120	92	23	-65	-120	-137	314	-133	-80	1	0
A => 0°	selhání				selhání				selhání			
A => 0°	-29	-41	-11	349	-20	-6	31	66	71	-94	-7	340
B => 0°	-30	-40	-200	305	-161	-61	-149	332	-85	-195	72	11
B => 0°	-29	-43	0	360	selhání				-70	-69	0	360
C => 180°	30	33	4	176	49	53	5	177	selhání			
C => 180°	30	37	7	173	selhání				63	63	2	179
D => 180°	116	33	-3	183	59	59	0	180	selhání			
D => 180°	selhání				59	61	1	179	79	81	2	179
C => 180°	33	32	2	178	59	56	1	179	69	70	1	180
C => 180°	32	28	-2	182	48	49	0	180	75	69	-9	184
D => 180°	selhání				selhání				75	74	-2	181
D => 180°	7	17	-1	182	-45	-60	-2	359	selhání			
A => 0°	-26	-25	-5	354	45	-48	0	332	selhání			
A => 0°	-30	-32	0	360	-54	-56	-2	359	selhání			
B => 0°	selhání				0	27	20	120	selhání			
B => 0°	-31	-32	-3	357	-115	-59	-7	358	-73	-53	23	13
C => 180°	22	25	-2	182	34	34	-1	181	selhání			
C => 180°	22	25	1	179	32	34	3	177	38	41	3	178
D => 180°	-174	-177	-2	360	53	50	121	133	72	68	-2	181
D => 180°	31	30	-1	181	23	55	0	180	selhání			

Příloha 3. Obsahuje výsledky sčítací metody a následně geometrického modelu po projetí dostupným souborem měření.

opravdová poloha zdroje	metoda fázové korelace											
	malý trojúhelník				střední trojúhelník				velký trojúhelník			
	Δ_{12}	Δ_{13}	Δ_{23}	$\varphi[^\circ]$	Δ_{12}	Δ_{13}	Δ_{23}	$\varphi[^\circ]$	Δ_{12}	Δ_{13}	Δ_{23}	$\varphi[^\circ]$
A => 0°	-35	-38	0	360	-63	-62	2	1	-91	273	1	210
A => 0°	-37	-36	2	2	-61	-62	1	0	-90	-93	-2	359
B => 0°	-35	-36	0	360	-62	-61	2	1	-88	188	1	184
B => 0°	-35	-37	36	29	-60	-62	58	28	-86	-89	79	27
A => 0°	-41	-34	8	7	selhání				-93	-89	5	2
A => 0°	-28	-39	-3	357	-55	-69	2	1	-85	-1	83	60
B => 0°	-41	-29	16	17	-68	-45	-33	345	-88	-84	8	3
B => 0°	-41	-34	-2	359	-58	-43	2	1	-74	-69	6	3
C => 180°	37	34	-1	181	46	126	-18	184	56	62	-15	187
C => 180°	30	38	7	173	46	54	9	174	54	65	14	172
D => 180°	39	37	-1	181	60	60	1	180	275	342	298	148
D => 180°	0	39	-45	266	60	61	2	179	81	83	3	179
C => 180°	36	36	1	179	55	58	3	178	69	68	2	179
C => 180°	36	36	1	179	55	55	1	179	75	65	-9	184
D => 180°	38	38	1	179	61	61	1	180	84	78	-2	181
D => 180°	38	37	0	180	-45	-53	-1	359	84	81	-2	181
A => 0°	-27	-24	1	1	-20	-20	1	2	-30	-35	-1	359
A => 0°	-28	-31	0	360	-50	-64	-4	358	-30	-77	0	360
B => 0°	-17	-17	1	2	-47	-54	2	1	-86	-85	4	1
B => 0°	-31	-35	-4	356	-53	-60	-6	357	-85	-92	-6	358
C => 180°	25	24	1	179	35	60	2	178	42	4	-2	195
C => 180°	24	25	-15	198	32	35	3	177	39	42	4	177
D => 180°	-317	37	1	317	selhání				71	73	-1	180
D => 180°	33	32	0	180	51	51	1	179	68	43	-3	182

Příloha 4. Obsahuje výsledky metody fázové korelace a následně geometrického modelu po projetí dostupným souborem měření.

opravdová poloha zdroje	metoda korelačního porovnávání											
	malý trojúhelník				střední trojúhelník				velký trojúhelník			
	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 23$	$\varphi [^\circ]$	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 23$	$\varphi [^\circ]$	$\Delta 12$	$\Delta 13$	$\Delta 23$	$\varphi [^\circ]$
A => 0°	-36	-33	5	5	-65	-59	3	2	-91	-88	2	1
A => 0°	-34	-32	2	2	-13	-61	0	360	-90	-92	-2	359
B => 0°	-29	-33	2	2	selhání				-688	-86	5	2
B => 0°	-29	-120	92	23	-64	-119	0	360	-1	-80	1	0
A => 0°	-35	-31	6	6	-19	-17	-1	358	-5	-507	-207	301
A => 0°	-28	-41	-11	348	-46	-54	-9	354	-32	-94	-7	353
B => 0°	-30	-37	13	11	selhání				-85	-195	72	11
B => 0°	-28	-41	0	360	selhání				-69	-72	1	0
C => 180°	30	33	4	176	48	53	5	177	60	67	3	179
C => 180°	30	37	7	173	899	53	8	180	63	63	2	179
D => 180°	selhání				58	59	0	180	selhání			
D => 180°	6	9	30	126	59	60	1	179	79	81	2	179
C => 180°	32	32	2	178	59	56	1	179	68	70	1	180
C => 180°	31	28	-2	182	48	49	0	180	75	69	-9	184
D => 180°	35	34	-2	182	-3	-39	-4	323	selhání			
D => 180°	21	29	0	180	55	56	-5	183	selhání			
A => 0°	-26	-23	-4	355	45	-48	0	332	selhání			
A => 0°	-30	-32	0	360	-54	-56	-2	359	selhání			
B => 0°	-33	-23	130	65	-51	-53	2	1	-26	-11	-1	359
B => 0°	-31	-32	-3	357	-115	-59	-7	358	-77	-53	27	15
C => 180°	21	24	-2	183	34	34	-1	181	3	154	-4	181
C => 180°	22	25	1	179	32	34	3	177	38	41	3	178
D => 180°	18	-177	-2	595	53	50	121	133	72	68	-2	181
D => 180°	31	30	-1	181	23	55	0	180	77	153	1	180

Příloha 5. Obsahuje výsledky metody korelačního porovnávání a následně geometrického modelu po projetí dostupným souborem měření.