



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

AKUSTICKÁ DETEKCE DRONŮ POMOCÍ MIKROFON- NÍHO POLE

ACUSTIC DETECTION OF DRONES WITH MICROPHONE ARRAY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MILAN MÚČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. IGOR SZÓKE, Ph.D.

BRNO 2017

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2016/2017

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Múčka Milan**

Obor: Informační technologie

Téma: **Akustická detekce dronů pomocí mikrofonního pole**
Acoustic Drone Detection Using Microphone Array

Kategorie: Zpracování řeči a přirozeného jazyka

Pokyny:

1. Nastudujte základy mikrofonních polí a identifikace pozice a směru zdroje zvuku z vícekanálových nahrávek.
2. Navrhněte metody pro odhad pozice dronu (zdroje zvuku) z mikrofonního pole rozloženého na velké ploše. Uvažujte různé scénáře náročnosti kalibrace pole.
3. Navrhněte několik experimentů (rozložení mikrofonního pole, dronů, trajektorií pohybu). Proveďte experimenty.
4. Analyzujte data získaná z experimentů a vyhodnoťte úspěšnost navržených detekčních metod.
5. Zhodnoťte výsledky a navrhněte směry dalšího vývoje.
6. Vytvořte A2 plakátek a cca 30 vteřinové video prezentující výsledky vaší práce.

Literatura:

- Podle pokynů školitele

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2, a část bodu 3 ze zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Szőke Igor, Ing., Ph.D.,** UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2016

Datum odevzdání: 17. května 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
602 00 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký
vedoucí ústavu

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá metódami pre akustickú lokalizáciu elektrických multikoptér pomocou mikrofónneho poľa zloženého z niekoľkých mikrofónov v určitej vzdialenosti. V práci sú hlavne vysvetlené metódy lokalizácie a detekcie pomocou zvukového vlnenia. Ďalej sú navrhnuté algoritmy, ktoré tieto metódy implementujú. V závere sú zhrnuté výsledky týchto algoritmov spolu s experimentmi overujúc ich funkčnosť.

Abstract

This work deals with methods of acoustic localization for electrical multicopters using a microphone field composed of several microphones at a certain distance. The main methods of localization and detection using sound waves are explained in the paper. Next, the algorithms that implement these methods are designed. The results summarize the results of these algorithms together with experiments to verify their functionality.

Kľúčové slová

Akustická lokalizácia, dron, multikoptéra, zvuk, korelácia, GCC, zvuková intenzita

Keywords

Acoustic localization, drones, multicopters, quadcopter, audio, correlation, GCC, acoustic intensity

Citácia

MÚČKA, Milan. *Akustická detekce dronů pomocí mikrofonního pole*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Igor Szőke, Ph.D.

Akustická detekce dronů pomocí mikrofonního pole

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Igora Szőke, Ph.D. Uviedol som všetky literárne zdroje a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....

Milan Múčka

16. mája 2017

Podakovanie

Chcel by som poďakovať vedúcemu práce za odborné vedenie a nasmerovanie výskumu. Ďalej chcem poďakovať môjmu otcovi Ing. Milanovi Múčkovi za odborné konzultácie.

Obsah

1	Úvod	3
1.1	Dron - Multikoptéra	3
1.2	Legislatíva v ČR	4
1.3	Pasívny radar	4
1.4	Lokalizácia	4
2	Zvuk	5
2.1	Mikrofónne pole	5
2.1.1	Blízke a vzdialené mikrofónne pole	6
2.2	Zdroj zvuku	6
2.3	Frekvenčné spektrum	6
2.4	Fourierova transformácia	6
2.5	Zvuková charakteristika multikoptéry	7
2.6	Komunikácia s multikoptérou	7
2.7	Detekcia multikoptéry	7
2.8	Metódy lokalizácie	8
3	Metódy TDOA	9
3.1	Lokálne maximum	10
3.2	Korelačná funkcia	10
3.2.1	Kruhová korelácia	11
3.2.2	Autokorelácia	12
3.2.3	Amplitúdová demodulácia	12
3.3	GCC	13
3.4	Maximálny rozdiel príchodov	14
3.5	Získanie časového posunu	14
3.6	Určenie polohy multikoptéry	14
4	Metódy založené na intenzite zvuku	15
4.1	Intenzita zvuku	16
4.2	Filtrovanie frekvencií	16
4.3	Meranie zachytenej intenzity	16
4.4	Kalibrácia mikrofónov	16
4.5	Zistenie vzdialenosti	17
4.6	Rozmiestnenie mikrofónov	17
4.7	Výžiarový výkon na jednotlivých mikrofónoch	18
4.8	Určenie polohy a vykreslenie do grafu	18

5	Experimenty	20
5.1	Popis dát experimentov	20
5.1.1	Prvý záznam	20
5.1.2	Druhý záznam	20
5.1.3	Tretí záznam	20
5.1.4	Štvrtý záznam	21
5.1.5	Piaty záznam	21
5.1.6	Využitie multikoptéry	21
5.2	Experimenty merania časových posunov TDOA	21
5.2.1	Klasická korelácia s obálkami signálov	21
5.2.2	GCC s váhovacími funkciami	22
5.2.3	Určovanie polohy zdroja	26
5.2.4	Záver metódy	26
5.3	Experimenty s intenzitou	27
5.3.1	Problémy tejto metódy	27
5.3.2	Záver metódy	28
6	Výsledok	29
6.1	Zhrnutie experimentov	29
6.1.1	Vzdialenosť lokalizácie	29
6.2	Implementácia	29
6.2.1	Vstup	30
6.2.2	Výstup	30
7	Smery ďalšieho vývoja	31
7.1	Meranie výšky	31
7.2	Rádiová lokalizácia	31
8	Záver	32
	Literatúra	33
A	Obsah priloženého média	34
B	Plagát	35

Kapitola 1

Úvod

Drony sú v dnešnej dobe veľmi populárne a čoraz rozšírenejšie. Problém je, že okrem zábavy môžu predstavovať aj veľké riziko. Môže sa jednať o narušenie súkromia, ale aj o bezpečnostné riziká. S narastajúcim počtom prichádza potreba ich monitorovať. Prevažne v bezletových zónach, v blízkosti letísk a budov s vyšším stupňom ochrany.

V tejto práci zhrniem základné informácie o lokalizácii pomocou zvuku, charakteristike dronov, navrhnem a otestujem metódy pre detekciu a lokalizáciu dronov v blízkom mikrofónnom poli pomocou viackanálových zvukových nahrávok.

1.1 Dron - Multikoptéra

Za dron sa považuje každý lietajúci objekt, ktorý môže byť ovládaný na diaľku, mať predprogramovanú trasu, alebo využívať rôzne algoritmy pre určovanie trasy. Najobľúbenejšie sú diaľkovo ovládané modely lietadiel, vrtuľníkov a multikoptér.

Prvé drony vznikali už v období 1. svetovej vojny, kde sa využívali najmä na prieskumné akcie. V 80. a 90. rokoch 20. storočia prešli miniaturizáciou a záujem o ne prudko rástol.

My sa v tejto práci budeme zaoberať konkrétne multikoptérami, čo sú diaľkovo ovládané modely kvadrokoptér, hexakoptér, oktakoptér a iných podobných viacmotorových lietajúcich dronov. Hovorovo sa pod pojmom dron rozumejú práve takéto zariadenia.

Sú obľúbené hlavne kvôli svojej stabilite a jednoduchosti, najmä pri vytváraní videozáznamov zo vzduchu. Začínajú sa využívať už aj v prepravných spoločnostiach na prepravu malých a dôležitých zásielok.

Som vlastníkom dvoch kvadrokoptér rôznych rozmerov (jedna z nich obr. 1.1), ktoré využívam na rekreačné účely. Využil som ich taktiež pri tvorbe tejto práce.



Obr. 1.1: Príklad kvadrokoptéry

1.2 Legislatíva v ČR

V Českej republike je prevádzka dronov obmedzená úradom pre civilné letectvo. Rozlišuje sa dron na rekreačné a dron na zárobkové/výskumné účely.

Dronom pre zárobkové/výskumné účely sa myslí dron, z ktorého je vytvorený videozáznam pre komerčné, alebo akékoľvek iné zárobkové účely. Takýto dron spadá automaticky do najvyššej kategórie a je potrebná letecká licencia pre jeho prevádzku.

Pokiaľ sa jedná o dron pre rekreačné účely, môžu byť zhotovené videozáznamy využité len pre vlastnú potrebu. Tu sa to však delí do viacerých kategórií podľa hmotnosti. Najväčšia časť však spadá do 20kg hmotnosti. Na tieto drony nie je potrebné žiadne špeciálne povolenie, ale je potrebné sa riadiť určitými pravidlami.

Pre let je potrebné dodržiavať bezpečnú vzdialenosť od ľudí (odporúčané 50m), od budov 150m a od husto osídlených oblastí taktiež 150m. Nie je povolené lietať v blízkosti letísk (minimálne 5500m) a vo výške vyššej ako 100m, kvôli vyhnutiu sa leteckej premávke. Ďalej sú určené bezletové zóny kde sa nesmie lietať za žiadnych okolností.

Počas celej doby letu je nevyhnutné mať priamy očný kontakt s dronom.

Podobné pravidlá a obmedzenia platia aj v iných krajinách, ako napríklad v Slovenskej republike.

1.3 Pasívny radar

Pasívny radar je zariadenie, ktoré dokáže lokalizovať predmety vyžarujúce určité vlnenie. Nevysiela žiadny signál, len sleduje signály prichádzajúce, alebo odrazené od zdroja.

Delia sa hlavne podľa typu spracovávaného vlnenia (v našom prípade akustické vlnenie) a podľa spôsobu určovania polohy. Podľa spôsobu určovania sa jedná hlavne o metódy merajúce čas príchodu signálu(TDOA¹) a metódy merajúce smer príchodu signálu(DOA²).

1.4 Lokalizácia

Na základe lokalizácie predmetov pomocou pasívneho radaru je možné odhadnúť polohu zdroja žiarenia. Pri akustickom vlnení sa postupuje podobne ako pri inom type vlnenia s rozdielom, že ako snímače pre zachytávanie sa využívajú mikrofóny. Pre jednoznačnú lokalizáciu je potrebný ich väčší počet, čím vzniká mikrofónne pole.

Metódy spomenuté v tejto práci nie sú viazané len na akustický signál, ale je ich možné využiť aj pri iných typoch signálov.

Lokalizácia akustických zdrojov pomocou poľa mikrofónov je známa už veľa rokov. Základný model predstavujú ľudské uši, pomocou ktorých dokážeme odhadnúť smer prichádzajúceho zvuku.

¹Time Difference of Arrival - časový rozdiel príchodu

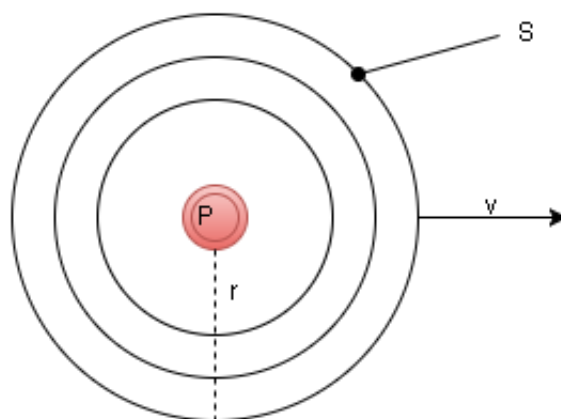
²Degree of Angle - veľkosť uhla príchodu

Kapitola 2

Zvuk

Zvuk je druh mechanického vlnenia v látkovom prostredí. V plynných a kvapalných látkach sa zvuk šíri vo forme pozdĺžneho vlnenia, v pevných vo forme priečneho, aj pozdĺžneho vlnenia. [4]

Akustická vlna je tvorená hmotnými časticami kmitajúcimi okolo zdroja zvuku. Rýchlosť akustickej vlny je v rôznych látkach odlišná. V hustejších látkach je rýchlosť šírenia vlny väčšia. V našom prípade budeme počítať so šírením vlny vo vzduchu pri teplote okolo 20°C. Bodový zdroj zvuku tvorí guľovú vlnoplochu (guľové vlny) do všetkých strán.[1] Príklad akustického vlnenia vyžiareného bodovým zdrojom je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Akustické vlnenie v okolí bodového zdroja. P –vyžiarený výkon, v –rýchlosť šírenia vlnenia, S –plocha vlny, r –vzdialenosť vlnoplochy od zdroja žiarenia

2.1 Mikrofónne pole

Mikrofónne pole je zložené z väčšieho počtu mikrofónov, ktoré sú od seba dostatočne vzdialené. Spôsoby rozmiestnenia môžu byť rôzne, ale často sa využíva pravidelné rozmiestnenie v tvare základných geometrických telies, najčastejšie v podobe kruhu. Rozmiestnenie a tvar mikrofónneho poľa má vplyv na presnosť lokalizácie.

Mikrofón má za úlohu previesť akustický signál na elektrický, ktorý je ďalej odovzdávaný zariadeniu pre jeho spracovanie. V počítači sa digitalizuje pomocou A/D prevodníku umiestneného na zvukovej karte a zaznamenáva sa v digitálnej podobe formou vzoriek, ktoré reprezentujú aktuálne hodnoty signálu v určitom intervale s danou periódou.

Zvuk, ktorý chceme analyzovať a lokalizovať musí byť paralelne zaznamenávaný všetkými mikrofónmi v rovnakom čase.

2.1.1 Blízke a vzdialené mikrofónne pole

Medzi zdrojom zvuku a jednotlivými mikrofónmi môžeme preložiť pomyselné priamky, ktoré nám udávajú tzv. smer šírenia. Pokiaľ tieto priamky sú takmer rovnobežné, hovoríme o vzdialenom poli. Vo vzdialenom poli sa akustická vlna aproximuje ako rovinná.

V tejto práci sa budeme zaoberať len blízkym mikrofónnym polom, kvôli dostupnosti lokalizačných metód. Pri veľkej vzdialenosti nie je lokalizácia pomocou zvuku vhodná.

2.2 Zdroj zvuku

Multikoptéra má z definície viacero elektrických motorov ktoré vydávajú zvuk. Tieto zdroje sú ale veľmi blízko a môžeme ich aproximovať ako jeden bodový zdroj žiarenia, pretože v pomere ku vzdialenosti senzorov a mikrofónov je táto vzdialenosť zanedbateľná a ich vyžarovacia charakteristika je rovnaká.

V našom zvukovom poli uvažujeme o pohyblivom zdroji zvuku a stacionárnych senzoch (mikrofónoch).

Zdroj zvuku musí byť dostatočne blízko, aby ho bolo možné zachytiť. V tomto prípade má zvuková vlna tvar guľovej vlnoplochy a môže vzniknúť časový rozdiel jej zachytenia mikrofónmi.

2.3 Frekvenčné spektrum

Frekvenčné spektrum je zobrazenie jednotlivých frekvencií a ich zastúpenie v zázname. Zobrazuje určité frekvencie z pohľadu opakovania, sily frekvencie, alebo amplitúdy.

Zvuk sa skladá z pásma frekvencií, ktoré sú v ňom rôzne zastúpené. Ľudským uchom rozlíšiteľný zvuk je 20Hz – 20 000Hz (horná hranica sa môže individuálne vekom meniť).

Zo zaznamenatej nahrávky môžeme rôzne frekvencie rozlíšiť pomocou Fourierovej transformácie (sekcia 2.4). Môžeme ich taktiež filtrovať pomocou pásmovej priepusti.

2.4 Fourierova transformácia

Fourierova transformácia slúži pre prevod signálu medzi časovo a frekvenčne závislým vyjadrením pomocou harmonických signálov. [2]

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

Vzorec Fourierovej transformácie 2.1, $s(t)$ je vstupný signál.

V praxi sa využíva forma zvaná FFT (Fast Furrier Transformation). V našom prípade budeme využívať Fourierovu transformáciu s diskretným časom (DTFT, 2.2 do funkcie vstu-

puje pole diskretných hodnôt $x(n)$), kvôli aplikácii nad diskretným signálom vzorkovaným určitou frekvenciou.

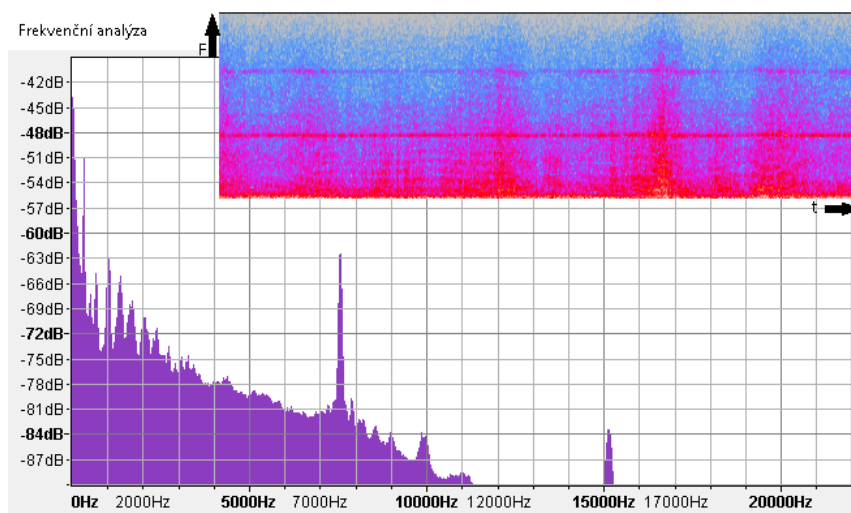
$$X(j\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \quad (2.2)$$

Jej výsledkom je pole komplexných hodnôt, ktoré určujú amplitúdy jednotlivých frekvencií a ich fázové posuny vstupného signálu.

2.5 Zvuková charakteristika multikoptéry

Multikoptéry využívajú pre let najmä elektromagnetické motory, pre ktoré je špecifická vysoká, úzkopásmová vyžarovacia charakteristika. Podľa experimentov sa táto frekvencia pohybuje okolo 7.5 kHz, môže sa však líšiť.

Tento zvuk má periodickú charakteristiku, ktorá má takmer stálu frekvenciu.



Obr. 2.2: Frekvenčné spektrum záznamu kvadrokoptéry. Na spodnom obrázku sú amplitúdy zastúpených frekvencií z celého záznamu, na vrchnom sú vzhľadom na časovú os.

2.6 Komunikácia s multikoptérou

Pokiaľ je multikoptéra diaľkovo ovládaná, je na ňu vysielaná jednosmerná komunikácia pomocou rádiových vln. Niektoré multikoptéry majú možnosť obojsmernej komunikácie (napríklad pre poskytovanie informácií o stave batérie).

Jediný signál ktorý multikoptéra s istotou vysielá je akustický signál - zvuk.

2.7 Detekcia multikoptéry

Tým, že multikoptéra má špecifické spektrum frekvencií, je ho možné pomocou Fourierovej transformácie v zázname rozpoznať. Pokiaľ sa nachádza v blízkosti mikrofónneho poľa objekt dostatočne vyžarujúci frekvenciu v očakávanom rozsahu, tak ho možno pokladať za multikoptéru.

2.8 Metódy lokalizácie

Zvukové záznamy z mikrofónov sú na sebe priamo závislé. Sú vytvorené v rovnakom čase a zachytávajú takmer rovnaký snímaný priestor.

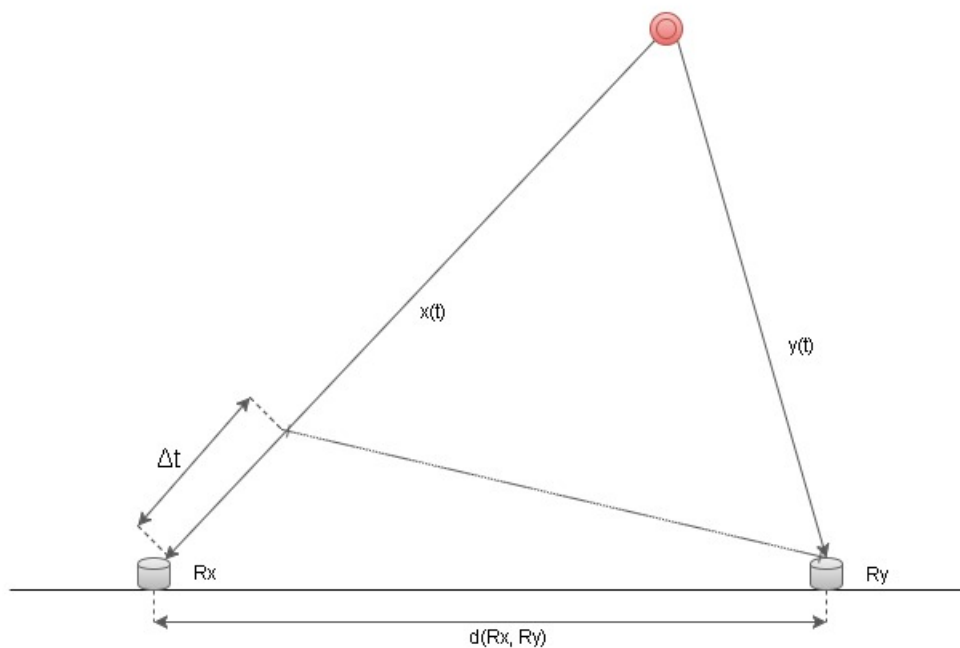
Existuje niekoľko metód pre určenie smeru príchodu signálov. Ich voľba a presnosť je závislá na popise zdroja a prostredia v ktorom k lokalizácii dochádza. Najpoužívanějšíe sú založené na princípe časového rozdielu príchodu - TDOA (Time Difference Of Arrival) - pracujú na časovej a frekvenčnej podobnosti signálov. Ďalšie metódy využívané v tejto práci sú založené na porovnaní intenzít vlnenia. Taktiež existujú spôsoby zistenia založené na uhle príchodu (DOA - Degree of Angle), ktoré ale vyžadujú špecifické mikrofóny a nebudeme sa nimi zaoberať.

Kapitola 3

Metódy TDOA

Jedná sa o metódy využívajúce odhad časového oneskorenia rovnakého signálu zaznamenaného dvomi rôznymi mikrofónmi. Zvukový signál sa šíri konštantou rýchlosťou závislou na prostredí. Zdroj signálu sa nachádza v blízkosti mikrofónov a doba príchodu zvukovej vlny k bližšie postavenému mikrofónu je nižšia ako k mikrofónu ktorý je viac vzdialený.

Pre samotnú detekciu zvuku postačuje jeden mikrofón. Lokalizácia na priamke vyžaduje aspoň dva mikrofóny, v rovine tri a v priestore minimálne štyri pre jednoznačné určenie všetkých súradníc. Taktiež musia byť správne uložené, aby pokryli daný priestor. Napríklad pri použití troch mikrofónov nesmú ležať všetky na jednej priamke, ale v rovine.



Obr. 3.1: Príklad TDOA s dvomi mikrofónmi, vzdialených navzájom d .

Na obrázku 3.1 je znázornený zdroj zvuku s dvomi mikrofónmi a smerom šírenia akustických vln. Je vidieť, že k mikrofónu označeným R_y sa dostane akustická vlna skôr ako k R_x práve o časový rozdiel Δt .

Tieto metódy boli využívané už dávno v minulosti, vďaka svojej nenáročnosti na výkon. Sú náchylné na odrazy vlnenia v uzavretých priestoroch, čo má za následok že sa môžu v zachytených signáloch objavovať oneskorené kópie vnášajúce do merania nepresnosti a chyby.

Vyžadujú vysokú vzorkovaciu frekvenciu pre presné určenie času. S malou hustotou vzoriek by boli tieto metódy veľmi nepresné.

Postup sa dá rozdeliť na dve hlavné časti:

- Určenie oneskorenia zvuku medzi jednotlivými mikrofónmi
- Výpočtový algoritmus pre lokalizáciu (napr. Multilaterácia)

Oneskorenie sa počíta vždy medzi dvomi zachytenými signálmi a je ho možné určiť viacerými spôsobmi, najčastejšie sa využívajú nasledujúce kvôli nízkej náročnosti a dostatočnej presnosti.

- Porovnávanie lokálneho maxima
- Vzájomná korelačná funkcia (Cross correlation)
- Všeobecná krížová korelácia (Generalized cross correlation)

3.1 Lokálne maximum

Najjednoduchší spôsob určenia časového rozdielu záznamov. Využíva sa pri signáloch nazývaných ako *dávka* (z anglického „burst“). Jedná sa o signály, ktoré majú výrazný výkyv intenzity. Tento výkyv je zachytený oboma mikrofónmi a za dobu príchodu na nich sa považuje čas, kedy úroveň intenzity prekročí určitú prahovú úroveň (anglicky „threshold“).

Táto metóda by nepracovala správne s multikoptérou, ktorej intenzita je viac-menej spojená.

3.2 Korelačná funkcia

Vzájomná korelácia (anglicky „Cross correlation“) určuje podobnosť dvoch signálov. Výstupné hodnoty tejto funkcie odpovedajú sume súčinov dvoch vstupných signálov a určujú vzájomné posunutie o konkrétny časový úsek (3.1, v prípade diskretných signálov o počet vzoriek 3.2). Je podobná konvolúcii s rozdielom, že jeden zo signálov je komplexne združený.

Očakávaným výsledkom je **korelačný koeficient** - vyjadruje súvislosť dvoch/podobnosť dvoch signálov. Určí sa ako index maximálnej hodnoty korelačnej funkcie.

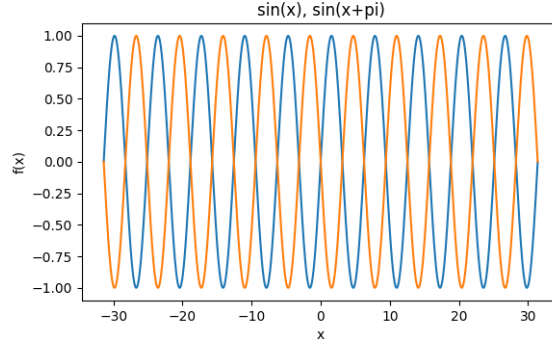
$$R_{XY}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t) \times y(t + \tau) \times dt \quad (3.1)$$

Vzorec korelačnej funkcie 3.1: Symbol * značí komplexné združenie signálu. Vstupné signály sú $x(t)$ a $y(t)$. τ značí časové posunutie medzi signálmi.

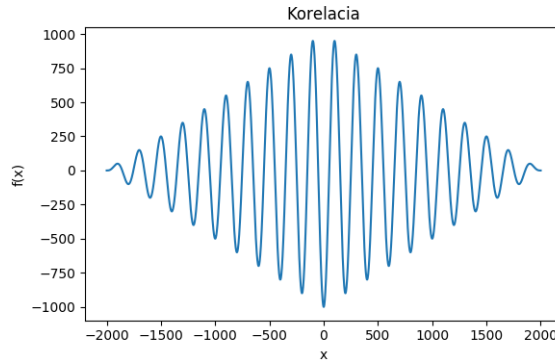
V našom prípade máme zaznamenané dva rovnako dlhé diskkrétne signály s určitým počtom vzoriek N . Ich korelačná funkcia má podobu vzorca 3.2, kde x a y sú polia navzorkovaného signálu.

$$R_{XY}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \times y[n - k] \quad (3.2)$$

Keďže majú rovnakú, konečnú dĺžku, tak sa koreluje aj na nulových prvkoch. To znamená, že hodnota korelácie pri krajoch bude značne slabšia ako v strede, aj keď podobnosť nahrávky môže byť rovnaká (obrázok 3.3). Korelácia dvoch takýchto signálov má dĺžku $2n-1$.



Obr. 3.2: Pre znázornenie korelácie využijeme dva sínusové signály, z ktorých je jeden posunutý o $+\frac{\pi}{2}$.



Obr. 3.3: Klasická korelácia signálov z obr. 3.2. Na bokoch je korelácia utlmená a signály sú v protifáze.

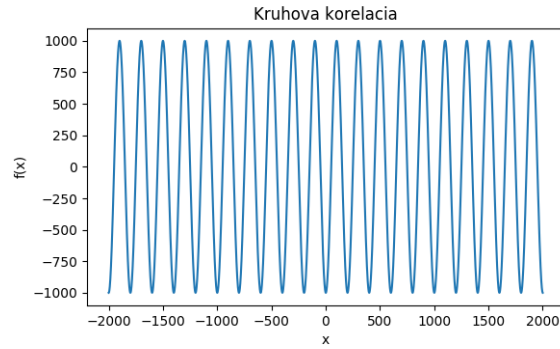
Korelácia periodicky opakujúcich sa signálov sa taktiež periodicky opakuje. V takom prípade je ťažko rozpoznať posunutie signálov. Práve na to sa využíva korelačná funkcia GCC s váhovaním (3.3).

Pokiaľ je minimum korelácie väčšie ako jej maximum, značí to že signály sú podobné v protifáze - opačné.

3.2.1 Kruhová korelácia

Prípad vzájomnej korelácie, kedy sa miesto nulových prvkov rotuje jeden zo signálov. Má výhodu vo vyššej presnosti a uchovaní informácie (obrázok 3.4). Je ale o niečo náročnejšia na výkon.

$$R_{XY}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \times y[\text{mod}_N(n-k)]$$



Obr. 3.4: Kruhová korelácia pri využití signálov z obr. 3.2. Korelácia má stále rovnakú, periodickú tendenciu, na rozdiel od klasickej neustupuje.

3.2.2 Autokorelácia

Autokorelácia je vzájomná korelácia jedného signálu. Pomocou nej je možné zistiť ozvenu v priestore a iné vplyvy na signál.

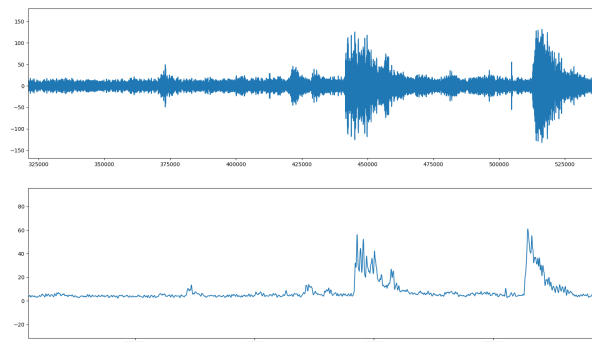
$$R_{XX}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \times x[n - k]$$

3.2.3 Amplitúdová demodulácia

Demodulácia je proces získavania informácie zakódovanej pomocou modulačného signálu. Využíva sa najmä v rádiových prenosoch, ako rozhlasové/televízne vysielanie, mobilné zariadenia a satelitné prenosy.

Pozostáva z rozpoznávania obálky (anglicky „*Envelope detection*”), kde sa zo signálu zoberie absolútna hodnota pre každú vzorku. Potom sa pomocou dolnej priepuste odstráni vysoké frekvencie. Získa sa len spojitá funkcia (viz. obrázok 3.5).

Využíva sa na to Hilbertova transformácia, pri ktorej sa signál prevedie priamo na podobu obálky, alebo filter so spodnou prepustou, pri ktorom sa signál vyhladí, odfiltruje sa modulačný signál a zostane aproximovaná obálka s informáciami.



Obr. 3.5: Získanie obálky zo signálu: na vrchnej časti je pôvodný signál, na spodnej jeho obálka

Pri koreláciách sa využíva táto metóda na úpravu vstupných signálov kvôli vyššej presnosti a pravdepodobnosti nájdenia zhody.

3.3 GCC

Generalized Cross Correlation s váhovacími funkciami je jednou z najčastejších metód pre akustické zameriavanie. Je založená na výpočte vzájomnej korelačnej funkcie v spektrálnej oblasti. Oproti klasickej korelácii v časovej oblasti je menej náročná na výkon. Využíva Fourierove transformácie pre získanie spektrálnej hustoty. Poskytuje lepšie vlastnosti v priestoroch s ozvenou, alebo hlukom na pozadí vďaka váhovacím funkciám.

$$R_{XY}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(f) \times X(f) \times Y^*(f) \times e^{j2\pi f\tau} df \quad (3.3)$$

Vzorec GCC **3.3**: ψ je váhová funkcia, $X(f)$ je Fourierova transformácia prvého signálu $x(t)$ a $Y^*(f)$ je komplexne združená Fourierova transformácia druhého $y(t)$.

Existuje viacero variantov váhovacích funkcií:

Rothov procesor

$$\psi(f) = \frac{1}{X(f) \times X^*(f)} \quad (3.4)$$

Fázová transformácia PHAT

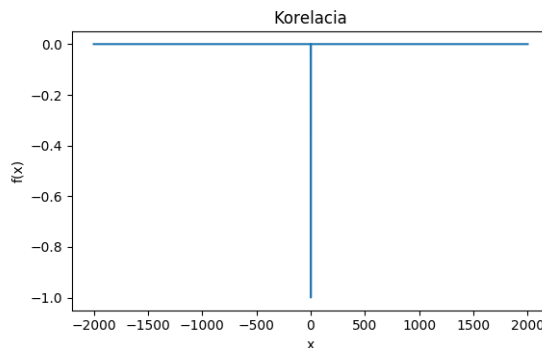
$$\psi(f) = \frac{1}{|X(f) \times Y^*(f)|} \quad (3.5)$$

IPHAT - vylepšená PHAT

$$\psi(f) = \frac{1}{|X(f) \times Y^*(f)|^\lambda} \quad (3.6)$$

Pásmová priepusť - najjednoduchšia váhová funkcia, potlačuje frekvencie mimo požadované spektrum. Budeme ju využívať pre filtrovanie frekvencií multikoptéry v kombinácii s PHAT (vzorec **3.5**, obrázok **3.6**).

$$\psi(f) = \begin{cases} 1 & \text{pre } f \text{ v požadovanom rozsahu} \\ 0 & \text{pre } f \text{ mimo rozsah} \end{cases} \quad (3.7)$$

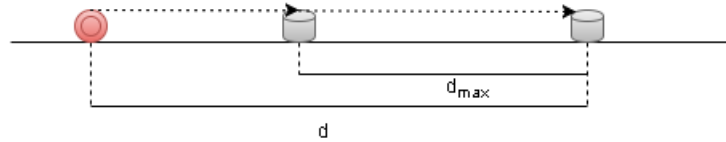


Obr. 3.6: Príklad GCC s využitím váhovacej funkcie PHAT(vzorec **3.5**) nad signálmi z obrázka **3.2**.

3.4 Maximálny rozdiel príchodov

Zachytený časový rozdiel je priamo úmerný rozdielu vzdialeností od jednotlivých mikrofónov. Nemôže byť väčší ako je podiel vzdialenosti medzi mikrofónmi a rýchlosti šírenia zvuku.

Maximálny rozdiel nastane, pokiaľ by sa nachádzal zdroj v tesnej blízkosti jedného z mikrofónov. Vtedy je rozdiel vzdialeností práve vzdialenosť mikrofónov. Pokiaľ je zdroj vzdialený viac (mimo poľa, viz. obrázok 3.7), táto metóda ho určí ako by sa nachádzal práve v blízkosti jedného z mikrofónov. Pre takúto lokalizáciu je potrebný väčší počet mikrofónov.



Obr. 3.7: Maximálny rozdiel zaznamenania zvuku, d_{max} je vzdialenosť mikrofónov a d je najväčšia vzdialenosť zdroja od mikrofónu.

Z časového hľadiska to môžeme vypočítať pomocou vzorca 3.8, kde c je rýchlosť zvuku a d_{max} vzdialenosť mikrofónov.

$$t_{max} = \frac{d_{max}}{c} \quad (3.8)$$

Nás ale bude zaujímať maximálny rozdiel vzoriek. Ten môžeme určiť pomocou vzorca 3.9, kde F_{fs} je vzorkovacia frekvencia:

$$\Delta V_{max} = \frac{t_{max}}{F_{fs}} \quad (3.9)$$

Signály sa môžu líšiť o túto hodnotu v oboch smeroch ($+ - V_{max}$)

3.5 Získanie časového posunu

Metóda sa vykonáva vždy medzi dvomi záznamami z dvoch mikrofónov dostatočne vzdialených tak, aby bolo možné pozorovať rozdiel. Zoberie sa z každého záznamu okno dostatočne veľké na rozoznanie multikoptéry, ale nie príliš veľké kvôli rozdielu polohy, vzhľadom na rýchlosť pohybu multikoptéry. Toto okno sa postupne posúva s určitým krokom.

Pre získanie rozdielu nad daným oknom použijem metódu GCC (sekcia 3.3) spolu s váhovou funkciou PHAT (vzorec 3.5) a pásmovou priepustou frekvencií multikoptéry (vzorec 3.7, kde použijem rozsah 7 - 8kHz). Z výsledku týchto funkcií zostavím absolútnu hodnotu a v nej vyhladá maximum. Toto maximum udáva korelačný koeficient a v porovnaní s ostatnými hodnotami určuje podobnosť signálov. Korelačný koeficient určuje posunutie - rozdiel vzoriek v ktorom sa signály líšia.

3.6 Určenie polohy multikoptéry

Pri experimentovaní s rozdielom príchodov sa mi nepodarilo uspieť. Nedokážem jednoznačne určiť rozdiel v záznamoch multikoptéry. Preto som sa rozhodol ďalej v tejto metóde nepokračovať.

Kapitola 4

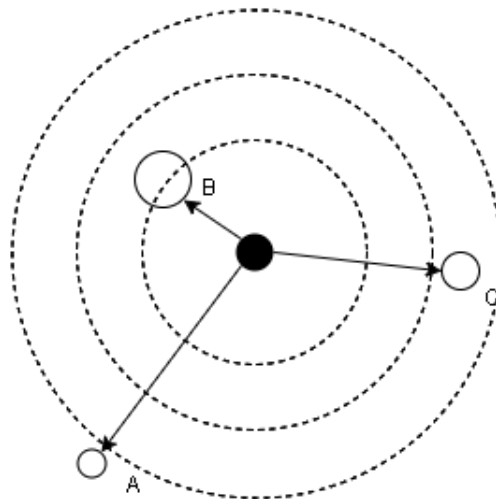
Metódy založené na intenzite zvuku

Pri tejto metóde nie je dôležitá vzorkovacia frekvencia, ani kvalita zaznamenaného vlnenia. Dôležitá je prevažne hlasitosť a dobre rozoznateľná zložka multikoptéry v záznamoch.

Využijeme váhový podiel intenzít na jednotlivých mikrofónoch. Čím je zdroj zvuku bližšie k mikrofónu, tým je na ňom zachytená intenzita vyššia. S narastajúcou vzdialenosťou táto intenzita klesá a zmení sa následne aj pomer zachytenej intenzity medzi jednotlivými mikrofónmi (obrázok 4.1).

Táto metóda sa ale veľmi pri lokalizácii nevyužíva kvôli jej nízkej presnosti a problematickosti.

Pre určenie polohy v rovine sú potrebné minimálne tri mikrofóny, pomocou ktorých sa dá určiť poloha zdroja signálu. Pri tejto metóde ale platí, že čím väčšia hustota mikrofónov v danom poli, tým je meranie presnejšie.



Obr. 4.1: Príklad bodového zdroja s tromi mikrofónmi. Najvyššia intenzita je na najbližšom mikrofóne s označením B. S narastajúcou vzdialenosťou intenzita klesá.

4.1 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku v určitom bode predstavuje výkon vyžiarený do priestoru v podobe akustickej vlny vzťahnutý k ploche vlnoplochy prechádzajúcej daným bodom (vzorec 4.1). Jednotka intenzity zvuku je $\frac{W}{m^2}$. [3]

$$I = \frac{P}{S} \quad (4.1)$$

Vzorec intenzity v konkrétnom bode 4.1: P značí výkon vyžiarený zdrojom, S je celková plocha vlny prechádzajúcej bodom, I je intenzita v danom bode.

Vlnoplocha má tvar gule a jej obsah je teda $S = 4 \times \pi \times r^2$. Z čoho sa dá vyjadriť intenzita ako $I = \frac{P}{4 \times \pi \times r^2}$. Znamená to aj, že intenzita vlnenia klesá s druhou mocninou vzdialenosti od zdroja zvuku.

Výkon vyžiarený do priestoru zdrojom v konkrétnom čase je vo všetkých bodoch vlnoplochy rovnaký a teda sa dá určiť vzdialenosť ľubovoľného bodu vlnoplochy podľa vzorca 4.2, čo budeme ďalej využívať pri výpočtoch vzdialeností.

$$r = \sqrt{\frac{P}{4 \times \pi \times I}} \quad (4.2)$$

4.2 Filtrovanie frekvencií

Požadovaný rozsah frekvencií multikoptéry vyhladáam tak, že zoberiem zvukový záznam z mikrofónu a zistím frekvenciu najviac zastúpenú v očakávanom rozsahu nad 7000Hz. Predpokladám teda, že multikoptéra má vysokú, špecifickú frekvenciu a v dobe nahrávania sa dostatočne objavila v blízkosti mikrofónneho poľa. V okolí tejto najviac zastúpenej frekvencie vyfiltrujem určitý rozsah. Spôsob je veľmi podobný ako pri pásmovej priepusti GCC (vz. 3.7).

4.3 Meranie zachytenej intenzity

Intenzitu jednotlivých frekvencií môžeme zistiť priamo pomocou ich amplitúdy z Fourierovej transformácie (sekcia 2.4). Z vyfiltrovaných frekvencií určíam absolútnu hodnotu.

Keďže sa intenzita mení, určil som si znovu časový interval(okno), nad ktorým určíam strednú hodnotu amplitúd požadovaných frekvencií. Postupne toto okno posúvam o určitý čas(krok) pre každý záznam a získam množinu zachytených intenzít zaznamenaného zvuku. Dĺžka okna a jeho posuv závisí od prostredia, vzdialenosti mikrofónov a rýchlosti pohybu multikoptéry.

4.4 Kalibrácia mikrofónov

Pri porovnávaní intenzity na mikrofónoch môže vzniknúť problém použitím rôznych mikrofónov s rôznou smerovou charakteristikou, nasmerovaním, alebo zosilnením. Zachytená intenzita sa na mikrofónoch môže líšiť, aj keď sa nachádzajú vedľa seba. Pri analýze je vidno rovnaké výkyvy pri prelete nad nimi. Najideálnejšie je použiť rovnaké mikrofóny s rovnakým nasmerovaním.

Pre porovnanie intenzity je teda potrebné v každom zázname vykonať kalibráciu. Najskôr určíme konštantu, ktorou sa mikrofóny navzájom líšia. Touto kalibračnou konštantnou potom vynásobím všetky hodnoty signálu predmetného mikrofónu.

Postupne umiestnim multikoptéru do rovnakej vzdialenosti od každého mikrofónu a nasmámam vhodný časový úsek. Pri pravidelnom kruhovom poli môžem umiestniť multikoptéru do stredu mikrofónneho poľa a vytvoriť záznam pre všetky mikrofóny zároveň.

Vypočítam strednú hodnotu signálu v danom časovom úseku pre každý mikrofón ($S[1]$ až $S[n]$). Potom vypočítam aritmetický priemer týchto stredných hodnôt $\bar{S}$. Následne pre každý mikrofón určíme kalibračnú konštantu $K[x]$ podľa vzorca 4.3.

$$K[x] = \frac{\bar{S}}{S[x]} \quad (4.3)$$

4.5 Zistenie vzdialenosti

Ako som už uviedol v sekcii 4.1, intenzita zistená na mikrofónoch klesá s druhou mocninou vzdialenosti. Vzdialenosť bodu od zdroja zvuku sa dá vypočítať ako odmocnina podielu vyžiareného výkonu a intenzity vynásobenej 4π .

$$r = \sqrt{\frac{P}{4 \times \pi \times I}}$$

P je vyžiarený výkon zdroja, ktorý je v konkrétnom čase nemenný a celkovo po normalizácii záznamov si ho môžeme stanoviť za konštantu, pretože súčet všetkých podielov intenzít je 1. Konštanty si teda vyjmeme pred odmocninu.

$$r = k \times \sqrt{\frac{1}{I}}$$

Keď si označíme nami upravenú intenzitu vyjadrenú v podielu ako i , tak dostaneme vzorec.

$$r = k \times \sqrt{i}$$

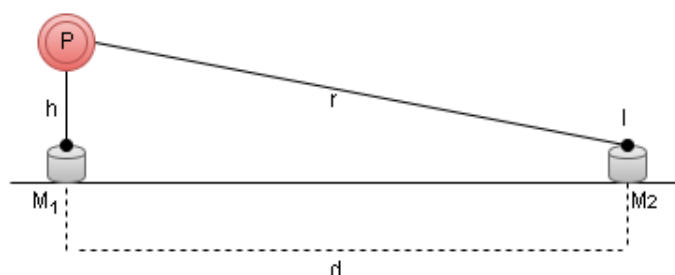
Z čoho môžeme už priamo vychádzať a určiť vzdialenosť od jednotlivých bodov.

4.6 Rozmiestnenie mikrofónov

Súradnice medzi jednotlivými mikrofónmi sú predom určené, alebo je ich možné dopočítať po vykonaní kalibrácie (sekcia 4.4) pomocou jednotlivých časových úsekov záznamu.

V daných úsekoch záznamu z kalibrácie zistíme vyžiarené intenzity (pomocou sekcie 4.3) na všetkých mikrofónoch. Ďalej zistíme vzdialenosť zdroja zvuku od mikrofónov pomocou sekcie 4.5. Je taktiež potrebné vedieť výšku, z ktorej boli tieto úseky vytvorené. Následne je už jednoduché pomocou pytagorovej vety (vz. 4.4) dopočítať výslednú vzdialenosť medzi jednotlivými mikrofónmi (obr. 4.2).

$$d = \sqrt{r^2 - h^2} \quad (4.4)$$



Obr. 4.2: Výpočet vzdialenosti mikrofónov popisuje rovnica 4.4. r je vzdialenosť zdroja od mikrofónu, d je vzdialenosť dvoch mikrofónov a h je výška umiestnenia zvukového zdroja.

Medzi dvomi mikrofónmi je možné určiť pre každý mikrofón jednu vzdialenosť. Získame teda dve vzdialenosti z každého mikrofónu vyjadrujúce vzájomnú vzdialenosť. Pre zvýšenie presnosti je možné teda brať do úvahy strednú hodnotu týchto vzdialeností. Takto postupujem pre každú dvojicu mikrofónov.

4.7 Vyžiarený výkon na jednotlivých mikrofónoch

Zvuková intenzita vyžiarená multikoptérou sa priebežne mení, hlavne kvôli zmenám otáčok motorov a vonkajším vplyvom. Je to spôsobené aj tým, že otáčky motorov sú regulované mikropočítačom, ktorý ich upravuje podľa gyroskopu a výškomeru. Tieto hodnoty nie sú stále a ich charakteristika nie je plynulá.

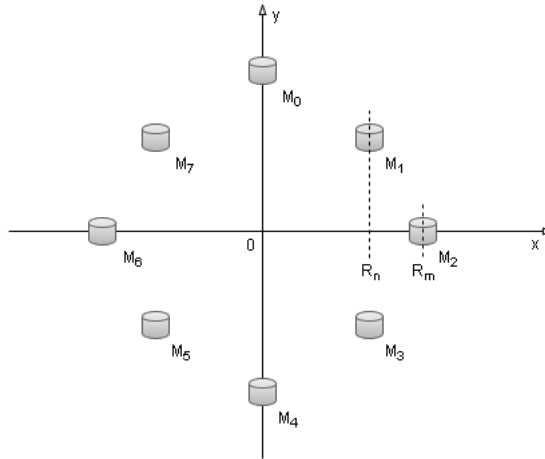
Pomocou metódy spomenutej v sekcii 4.3 získam množinu intenzít záznamu (stredných hodnôt amplitúd požadovaných frekvencií v danom okne s určitým krokom - viz danú sekciu). Metódu vykonám pre každý mikrofón. Tieto intenzity medzi mikrofónmi sčítam a získam tak množinu súčtov intenzít všetkých kanálov. Keď jednotlivé intenzity mikrofónov podelím týmto súčtom, získam zastúpenie na každom mikrofóne, teda normalizovaný podiel intenzít. Pričom ich súčet je 1.

4.8 Určenie polohy a vykreslenie do grafu

Výsledný pohyb som sa rozhodol vykresliť do grafu pre prehľadnú demonštráciu. Najskôr si určím rozmiestnenie mikrofónov a ich zastúpenie v grafe. Každý mikrofón vykreslím ako bod so súradnicami x , y . Následne zoberiem daný pomer zachytenej intenzity mikrofónom zo sekcii 4.7 vynásobený konštantou k a vynásobím ním jednotlivé súradnice mikrofónu, ktoré pripočítam k polohe multikoptéry.

V prípade použitia ôsmich mikrofónov rozostavených pravidelne v kruhu sú rozmiestnené ako na obrázku 4.3. Ukážeme si príklad na takomto rozmiestnení.

Vzdialenosť mikrofónu od stredu definujem ako R_m . Hodnoty súradníc mikrofónov ktoré nie sú na súradnicových osiach sú $R_n = R_m \times \sin \frac{\pi}{4}$. Konštanta k je určená predom z očakávanej výšky preletu a vyžiareného výkonu multikoptéry.



Obr. 4.3: Použitie ôsmich mikrofónov rozmiestnených pravidelne v kruhu.

Súradnice multikoptéry X a Y určím pomocou spomenutých hodnôt nasledovne:

$$X = k \times (R_m \times \sqrt{i_2} - R_m \times \sqrt{i_6} + R_n \times \sqrt{i_1} + R_n \times \sqrt{i_3} - R_n \times \sqrt{i_5} - R_n \times \sqrt{i_7})$$

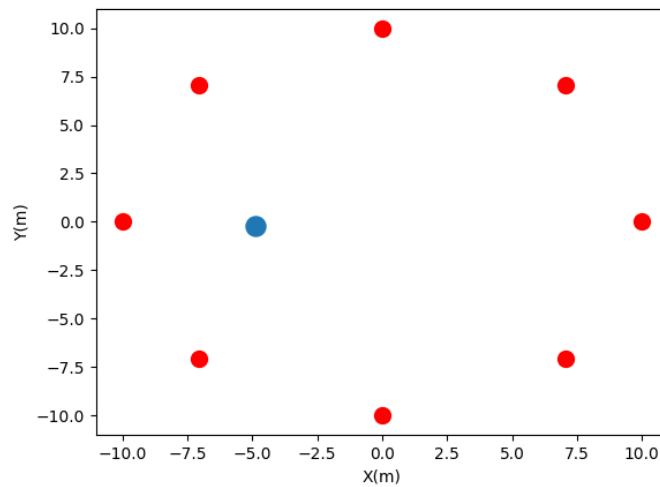
$$Y = k \times (R_m \times \sqrt{i_0} - R_m \times \sqrt{i_4} + R_n \times \sqrt{i_1} + R_n \times \sqrt{i_7} - R_n \times \sqrt{i_3} - R_n \times \sqrt{i_5})$$

$$X = k \times R_m \times (\sqrt{i_2} - \sqrt{i_6}) + k \times R_n \times (\sqrt{i_1} + \sqrt{i_3} - \sqrt{i_5} - \sqrt{i_7})$$

$$Y = k \times R_m \times (\sqrt{i_0} - \sqrt{i_4}) + k \times R_n \times (\sqrt{i_1} + \sqrt{i_7} - \sqrt{i_3} - \sqrt{i_5})$$

Súradnice multikoptéry spolu so súradnicami mikrofónov vykreslím do grafu (obr. 4.4).

Každú desatinu sekundy zmením pozíciu multikoptéry. Pokiaľ je celkový zisk na mikrofónoch slabý, tak sa buď zdroj nenachádza, alebo je príliš ďaleko a daný bod nastavím ako skrytý.



Obr. 4.4: Príklad zobrazenia grafu

Kapitola 5

Experimenty

Cieľom experimentov je otestovať metódy spomenuté vyššie. Taktiež určiť na akú vzdialenosť je možné detegovať multikoptéru pomocou mikrofónneho poľa a aké veľké pole je na to potrebné.

Vytvoril som niekoľko rôznych viackanálových zvukových záznamov kvadroptéry, nad ktorými som experimentoval. Spolu so zvukovými záznamami boli taktiež vytvorené videozáznamy z kvadroptéry a zo zeme pre lepšiu možnosť overenia metód. Trajektórie letov boli náhodné. Všetky záznamy boli vytvorené pri letisku Medlánky v Brne po udelení oprávnenia a vyhradení územia správcom letiska. Neboli ohrozené žiadne osoby a boli dodržané právne postupy pre lietanie s dronom.

Zo všetkých záznamov sa ukázali najlepšie nasledujúce.

5.1 Popis dát experimentov

5.1.1 Prvý záznam

Bol vytvorený s využitím ôsmich mikrofónov usporiadaných pravidelne do kruhu vzdialených od stredu 6m a navzájom vzdialených okolo 4,59m. Záznam bol vzorkovaný frekvenciou 44,1kHz.

5.1.2 Druhý záznam

Bol vytvorený za pomoci rovnakých mikrofónov ako prvý, ale náhodne umiestnených. Vzdialenosti jednotlivých mikrofónov boli zamerané a zaznačené do schémy. Záznam bol taktiež vzorkovaný frekvenciou 44,1kHz.

5.1.3 Tretí záznam

Bol využitý rekordér značky Zoom a štyri kondenzátorové mikrofóny s fantómovým napájaním. Záznam bol vzorkovaný s frekvenciou až 96kHz. Mikrofóny som umiestnil do štvorca, kde vzdialenosť mikrofónu od stredu bola 10m a medzi jednotlivými mikrofónmi až okolo 14m. Dĺžka záznamu je 2 min.

5.1.4 Štvrtý záznam

Bol vytvorený rovnako ako tretí s rozdielom, že mikrofóny boli bližšie, na vzdialenosť 5m od stredu. Navzájom okolo 7,07m. Zo záznamu je pre experimenty vyrezaný časový úsek dlhý 1 min. v ktorom sa nachádza kvadroptéry.

5.1.5 Piaty záznam

Bol taktiež podobný tretiemu, s mikrofónmi od stredu vzdialenými len 2m, čo je 2,82m medzi sebou.

5.1.6 Využitie multikoptéry

Pri experimentoch som využil dve rôzne kvadroptéry.

Prvá mala šírku 250mm a hmotnosť okolo 600g. Je vybavená vysokootáčkovými motormi s vrtulami dĺžky 125mm. Motory majú podľa meraní vyžarovaciu zvukovú frekvenciu okolo 7,5kHz.

Druhá bola väčšia so šírkou 380mm a hmotnosťou zhruba 1kg. Na tejto sú umiestnené motory s podstatne nižšími otáčkami a väčšími vrtulami, až 255mm. Bohužiaľ sa mi ju podarilo dať do prevádzky až ku koncu meraní a vyskytuje sa len v posledných experimentoch. Jej zvuková frekvencia je o trochu menšia, okolo 7,3kHz.

5.2 Experimenty merania časových posunov TDOA

Metóda porovnávania lokálnych maxím nie je vhodná, preto sa zameriam len na korelačné metódy.

Ako prvý nezvyčajne uvediem experiment s využitím štvrtého záznamu (5.1.4). Nad týmto záznamom vysvetlím priebeh experimentovania. Je to z toho dôvodu, že tento záznam je kvalitne nahraný pomocou kondenzátorových mikrofónov a vysokou vzorkovacou frekvenciou. Je na ňom možné najlepšie znázorniť problematiku tejto metódy a podľa očakávaní by mal byť najúspešnejší.

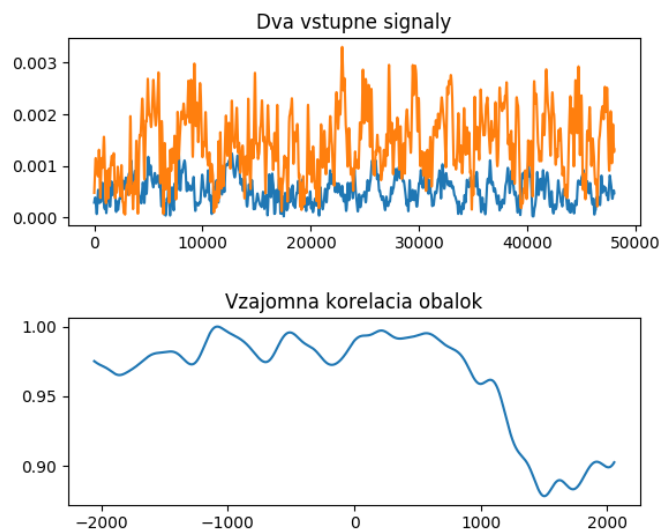
Podľa očakávaní by výsledok experimentu mal odpovedať časovým rozdielom medzi dvomi susednými mikrofónmi.

5.2.1 Klasická korelácia s obálkami signálov

Ako prvú som teda otestoval klasickú koreláciu (sekcia 3.2) dvoch mikrofónov so štvrtým záznamom. Najskôr som experimentoval s pôvodnými signálmi bez úprav, ale výsledky neboli zďaleka podľa očakávaní. Následne som teda vyfiltroval len frekvencie kvadroptéry (očakávaných 7-8kHz) a získal obálky daných signálov pomocou demodulácie (sekcia 3.2.3), ktoré som navzájom koreloval.

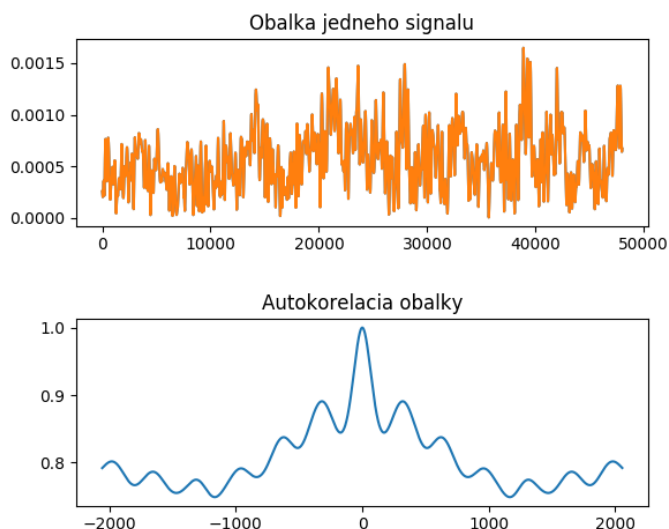
Využívam okná s dĺžkou 0,5s, čomu zodpovedá 48 000 vzoriek záznamu. Ich korelácia má dĺžku $2n - 1 = 95999$ vzoriek. Maximálny rozdiel v ktorom sa môžu tieto dva signály líšiť je však len ± 2057 vzoriek kvôli tomu, že vzdialenosť mikrofónov je zhruba 7m. Teda z výsledku korelácie vyrežem 4114 hodnôt v strede. Pri takomto pomere netreba uvažovať o kruhovej korelácii, pretože rozdiel pri jej použití je zanedbateľný, ale výpočetne náročnejší.

Výsledky ale nepriniesli veľký úspech, pretože nie je možné jednoznačne určiť posunutie kvadroptéry (viď. obr. 5.1). Výsledky z ostatných častí a mikrofónov sú na tom veľmi podobne.



Obr. 5.1: Dve obálky signálov (horná časť) a ich vzájomná korelácia (dolná časť).

Rozhodol som sa teda spraviť autokoreláciu (sekcia 3.2.2) jednej obálky pre overenie.

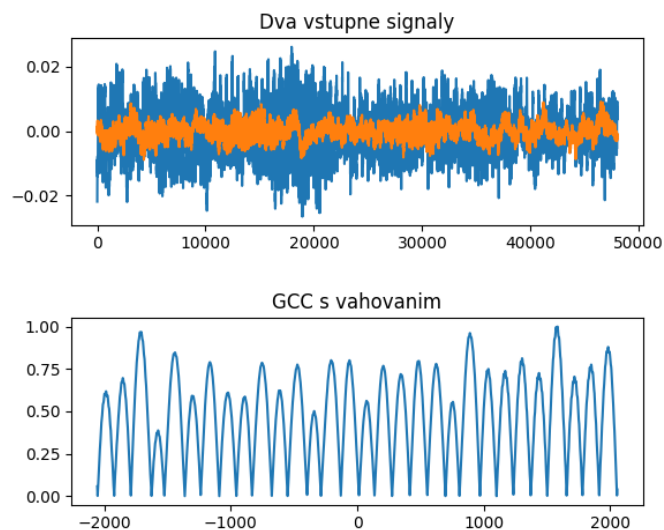


Obr. 5.2: Autokorelačná funkcia.

Autokorelácia ukázala, že je tam určitá podobnosť signálu, ale nie je jednoznačná. Pomer maximálnej hodnoty a ostatných hodnôt poukazuje, že sa v danej nahrávke môže nachádzať niečo iné, ako šum, alebo ozvena. Preto následne využijem korelačnú funkciu GCC.

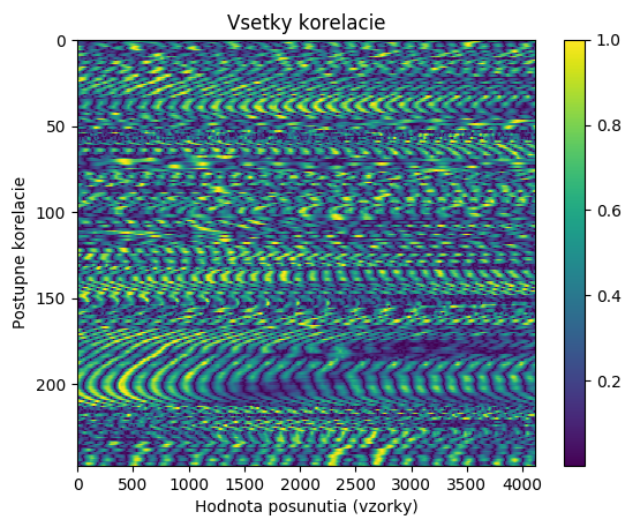
5.2.2 GCC s váhovacími funkciami

GCC funkcia s váhovaním (sekcia 3.3) nie je až tak náchylná na šum a odrazy, preto by mohla poskytnúť lepšie výsledky. Nie je potrebné vstupné signály upravovať, pretože váhovacie funkcie by mali tieto rozdiely eliminovať. Využijem funkciu PHAT (vz. 3.5) a pásmovú priepusť (vz. 3.7, s rozsahom 7-8kHz).



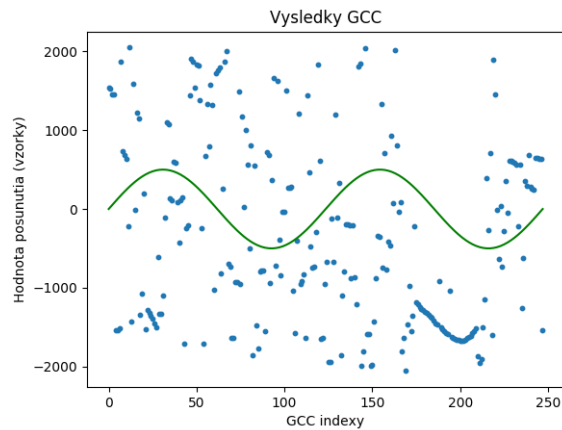
Obr. 5.3: Autokorelačná funkcia.

Na výsledkoch z GCC sa bohužiaľ objavuje podobný problém a tým je periodické opakovanie v záznamoch. Všetky výsledky z GCC si pre prehľad vykreslím do grafu a vznikne tzv. waterfall graf.



Obr. 5.4: Hodnoty z GCC celého záznamu postupne zhora nadol.

Na grafe je možné vidieť, že sa signály naozaj periodicky opakujú. Avšak bolo by možné v určitých momentoch predpokladať smer pohybu multikoptéry. Vykreslím všetky indexy maximálnych hodnôt - teda predpokladané posuvy medzi signálmi ako jednotlivé body do grafu (obr. 5.5). Podľa očakávaní by sa mali tieto body dať preložiť krivkou.



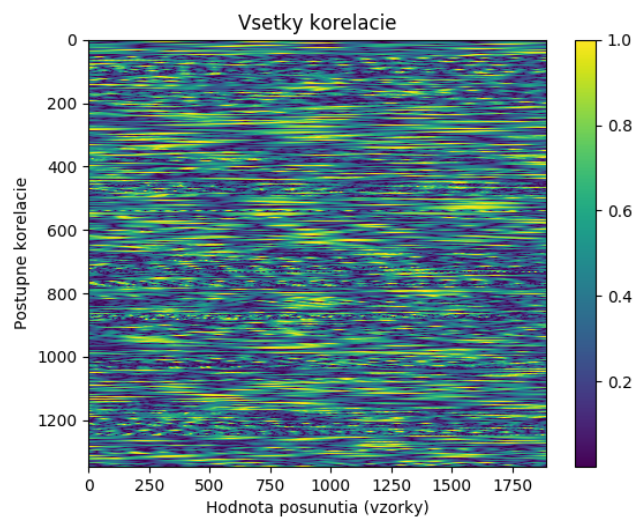
Obr. 5.5: Modré body sú jednotlivé korelačné konštanty. Zelená krivka je očakávaný výstup.

Ako môžeme na obrázku vidieť, v určitý časový okamih sa pomerne podarilo získať smer pohybu kvadroptéry. Toto mohlo byť zapríčinené prerušením periodicity záznamov (napríklad prudká zmena otáčok). Problém je, že to nie je presný rozdiel vzdialeností a je mierne posunutý od očakávania. Taktiež sa vyskytuje veľmi málo, čo je nedostatočné pre určenie polohy.

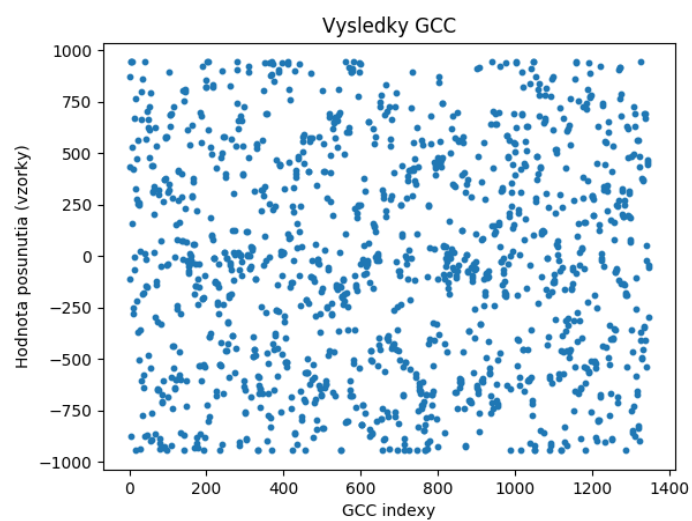
Problém je, že multikoptéra má periodickú, stálu frekvenciu a je veľmi obtiažne zistiť časový rozdiel jej zachytenia.

Tento problém sa vyskytol pri všetkých experimentoch a záznamoch. Pre príklad uvediem aj výsledky experimentov z prvého a tretieho záznamu.

Prvý záznam (5.1.1)

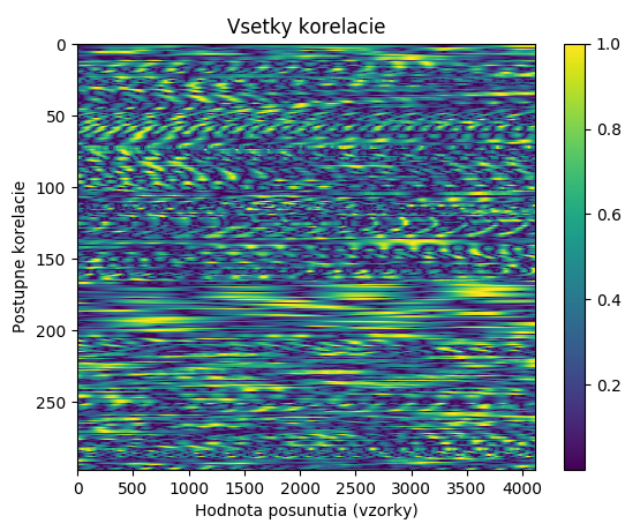


Obr. 5.6: Waterfall z prvého záznamu. Nie je možné rozoznať príchody.

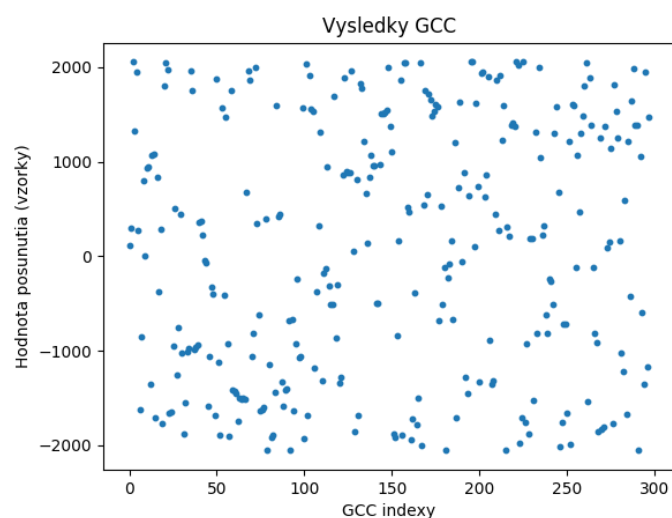


Obr. 5.7: Výsledky z prvého záznamu. Výsledok horší ako pri štvrtom - obr. 5.4.

Tretí záznam (5.1.3)



Obr. 5.8: Waterfall z tretieho záznamu. Problém sa stále opakuje.



Obr. 5.9: Výsledky z tretieho záznamu. Taktiež na obrázku nie je možné pozorovať príchod.

5.2.3 Určovanie polohy zdroja

Po sklamaní z korelácií a nemožnosti získať časový rozdiel v záznamoch som sa rozhodol nepokračovať s touto metódou. Preto som ani neimplementoval určenie polohy z viac kanálovej nahrávky. Mohla by sa na to využiť metóda Multilaterácií.

Pomohlo by, keby sa na multikoptére nachádzalo zariadenie, ktoré by prerušovane vysielalo nejaké vlnenie, alebo by prerušovalo periodicitu daného signálu.

5.2.4 Záver metódy

Multikoptéry majú problematickú, periodickú vyžarovaciu charakteristiku, pri ktorej je problém rozlíšiť jednotlivé prijaté zvukové časti.

Pri experimentovaní sa mi nepodarilo jednoznačne určiť polohu pomocou tejto metódy. Pokiaľ sa náhle zmenila vyžarovacia charakteristika (zvýšenie výkonu), tak bolo možné na krátky okamžik zachytiť tento zvukový výkyv, inak indexy posunutí boli mimo očakávaní a opakovali sa.

5.3 Experimenty s intenzitou

Efektívnosť tejto metódy závisí na počte mikrofónov a hustote mikrofónneho poľa. Najúspešnejší experiment bol pri použití prvého záznamu s ôsmimi mikrofónmi (5.1.1). Počet mikrofónov a ich vzdialenosti boli dostatočné pre pokrytie daného poľa. Experiment znázorňuje videozáznam na priloženom médiu.

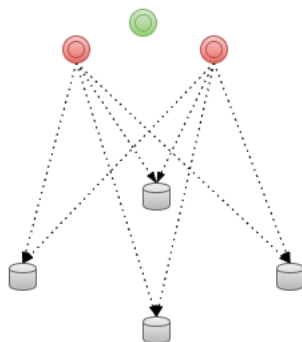
Podľa experimentov presnosť metódy závisí veľmi na výške preletu multikoptéry. Pokiaľ sa multikoptéra nachádzala stále v rovnakej výške, experiment bol pomerne úspešný. Keď však výška letu bola tesne ponad jednotlivé mikrofóny, experiment sa prejavil ako nepresný kvôli nízkemu letu, čo vysvetľujem v sekcii 5.3.1.

V ďalšom experimente som vychádzal z druhého záznamu (5.1.2) s rôznym rozmiestnením mikrofónov. Kalibráciu mikrofónov považujem za rovnakú ako v predchádzajúcom, pretože sa mikrofóny len presunuli. Vzdialenosť mikrofónov od stredu bola v priemere však menšia ako v predchádzajúcom experimente. Tým, že sa veľkosť poľa zmenšila, zmenšila sa aj oblasť zachytenia kvadroptéry. Správanie algoritmu bolo podobné ako v prvom prípade.

V ďalších záznamoch sa využil menší počet mikrofónov, ktoré boli ďalej od seba. Poloha v tomto prípade nebola jednoznačná. Na grafe sa to prejavilo ako chvenie kvadroptéry, až po zmiznutie bodu. Čím sa nachádzali mikrofóny ďalej od stredu, tým bola presnosť menšia kvôli znižujúcej sa hustote mikrofónneho poľa.

Pri pokusoch s iným dronom väčších rozmerov boli výsledky podobné. Vyžarovacia charakteristika bola rovnaká, ale vyžiarovaný zvukový výkon bol o niečo menší kvôli použitiu väčších vrtúľ a nižších otáčok.

Výsledok experimentu s dvomi kvadroptérmi zároveň v rovnakej výške nad mikrofónnym poľom vyzeral tak, že ich metóda určila len ako jednu, a pozíciu odhadla na miesto medzi nimi. Toto bolo spôsobené tým, že obe majú veľmi podobnú vyžarovaciu frekvenciu a pomocou mikrofónov ich nebolo možné rozlíšiť.

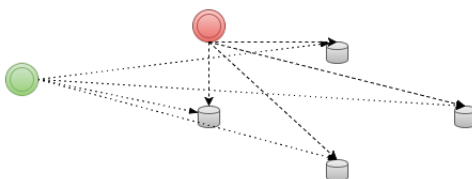


Obr. 5.10: Použitie dvoch kvadroptér

5.3.1 Problémy tejto metódy

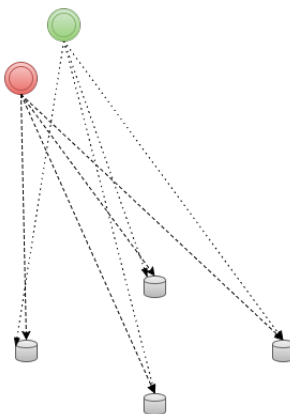
Hlavným problémom tejto metódy je, že je závislá na výške preletu multikoptéry, ktorú nie je možné zistiť. Pri nízkom prelete je rozdiel vzdialeností zdroja ku jednotlivým mikrofónom podstatne väčší ako pri prelete vyššom (zobrazujú obrázky 5.11 a 5.12). Tieto vzdialenosti nie je možné jednoducho odlíšiť a správanie v tomto prípade je veľmi podobné akoby sa zdroj nachádzal mimo poľa. Je to z toho dôvodu, že táto metóda využíva pomery zachytených

intenzít a intenzita na blízkom mikrofóne je podstatne vyššia ako na ostatných. Prejaví sa to zobrazením multikoptéry mimo poľa.



Obr. 5.11: Nízky prelet. Červený bod je očakávanie podľa skutočnosti, zelený bod je zobrazenie algoritmom.

Naopak keď je príliš vysoko, pomer intenzít je menší a prejaví sa priblížením ku stredu:



Obr. 5.12: Vysoký prelet. Červený bod je očakávanie podľa skutočnosti, zelený bod je zobrazenie algoritmom.

Takéto správanie je potrebné regulovať práve stanovenou konštantou vo výpočte súradníc polohy (sekcia 4.8).

Taktiež sa ako problematické ukázalo rozlíšenie multikoptéry mimo mikrofónneho poľa. Na rozlíšenie je potrebná určitá hranica intenzity zachytená na všetkých mikrofónoch. Pokiaľ sa multikoptéra postupne približovala ku poľu, v okamihu ako dosiahla zachytená intenzita určitú úroveň, tak sa ocitla vnútri poľa a jej pohyb sa zobrazoval opačnou stranou ako bol v skutočnosti.

Ďalším problémom je, že nie je možné lokalizovať viacero objektov zároveň. Intenzita môže byť spracovávaná len z jedného objektu.

Problémom taktiež môže byť, ak je multikoptéra príliš tichá, alebo príliš vzdialená. Vtedy nie je rozlíšiteľná kvôli nedostatočnej intenzite.

5.3.2 Záver metódy

Výsledok experimentov preukázal, že za určitých okolností je zachytenie touto metódou možné s určitou presnosťou. Táto metóda má ale veľa problémov (sekcia 5.3.1). Práve kvôli týmto problémom nie je táto metóda príliš vhodná na lokalizáciu, len v určitých prípadoch.

Kapitola 6

Výsledok

6.1 Zhrnutie experimentov

Výsledky všetkých experimentov nedopadli podľa očakávaní. Navrhnuté metódy sa prejavili ako nie príliš úspešné. Podľa očakávaní mali priniesť výsledky metódy založené na metódach TDOA, ktoré sa ale ukázali kvôli periodickosti zvuku multikoptéry ako nepoužiteľné.

Jediná metóda, ktorá dokázala odhadnúť približnú polohu multikoptéry za určitých okolností je založená na zachytenej intenzite zvuku. Táto metóda ale dokáže sledovať multikoptéru len v predom očakávanej výške. Pri vyšších, alebo nižších preletoch sa metóda ukázala byť veľmi nepresná. Navyše vyžaduje veľkú hustotu pokrytia mikrofónov. Pri menšej hustote mikrofónneho poľa bol problém zachytiť jednotlivé prelety a určenie polohy bolo nepresné. Napriek tomu je to jediná metóda, ktorá vykázala určité výsledky a rozhodol som sa ju implementovať do výsledného programu.

6.1.1 Vzdialenosť lokalizácie

V experimentoch sa podarilo odhadnúť pohyb multikoptéry len pokiaľ sa nachádzala v mikrofónnom poli. Čiže vzdialenosť na ktorú je možné metódu použiť je veľmi limitovaná veľkosťou mikrofónneho poľa.

Výška je zas limitovaná zachytenou intenzitou. Pokiaľ multikoptéra vyletela príliš vysoko (10m), intenzita zvuku sa znížila a nebolo možné ju jednoznačne zachytiť.

6.2 Implementácia

Všetky metódy, algoritmy a experimenty spomenuté v práci som implementoval v jazyku python3 s využitím knižníc pre výpočet FFT, vykreslenie grafov a spracovanie audio súborov.

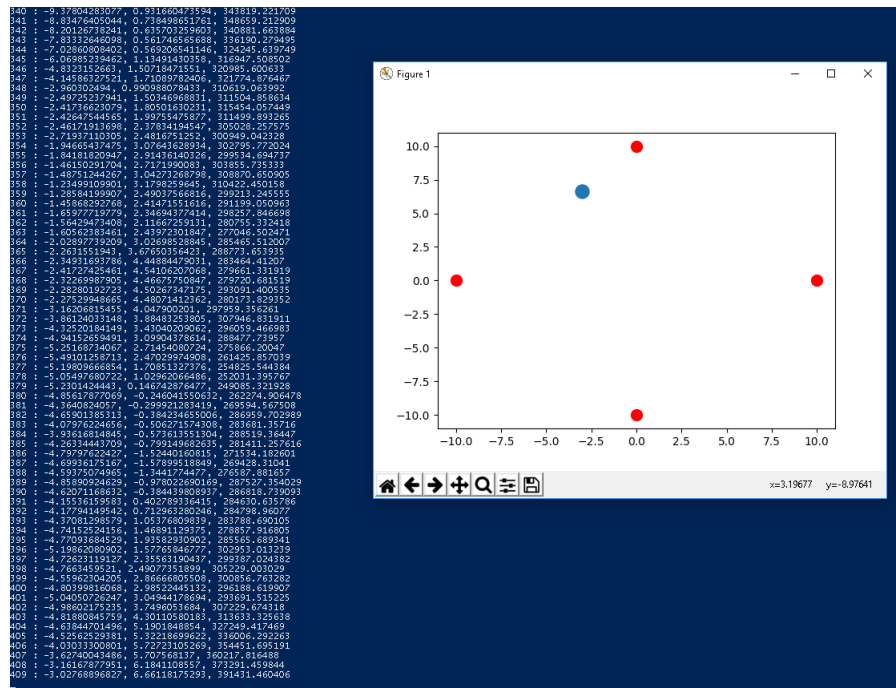
Výsledný skript využíva metódu porovnávania zachytenej intenzity na jednotlivých nahrávkach. Postupne spracuje nahrávky, určí predom pozície multikoptéry a následne ich postupne zobrazuje v grafe s periódou 0,1s. Veľkosť spracovávaného okna je stanovená na 0,5s.

6.2.1 Vstup

Na vstupe očakáva vzdialenosť mikrofónov od stredu, jednotlivé záznamy z mikrofónov a predpokladanú výšku preletu. Podľa toho sa prispôsobí algoritmus výpočtu. Maximálne je však podporovaných 8 nahrávok v pravidelnom kruhovom rozložení.

6.2.2 Výstup

Výstupom skriptu je priebežne aktualizovaný graf zobrazujúci polohu mikrofónov a aktuálnu polohu multikoptéry. V termináli je možné počas toho pozorovať aktuálne súradnice a celkovú zachytenú energiu.



Obr. 6.1: Príklad behu skriptu so štyrmi mikrofónmi.

Kapitola 7

Smery ďalšieho vývoja

V ďalšom vývoji by som chcel navrhnúť a otestovať viacej metód lokalizácie. V každom prípade je potrebné navrhnúť a vyriešiť detekciu multikoptéry. Pokiaľ sa multikoptéra nachádza v blízkosti poľa, je ho dôležité predovšetkým jednoznačne detegovať, až potom lokalizovať. Na lepší spôsob detekcie som doteraz neprišiel.

7.1 Meranie výšky

Pri metóde porovnávania intenzity by bolo potrebné merať výšku pre jej reálnu aplikáciu. Spôsob merania výšky pomocou tejto metódy by bol, keby sa vysunul jeden mikrofón vysoko nad ostatné a ďalej by sa postupovalo obdobne ako pri rovinnom porovnávaní. Problém je, že tento mikrofón by musel byť v dostatočnej výške nad ostatnými pre rozlíšenie rozdielu, ale nie príliš kvôli možnosti zrážky s multikoptérou. Bolo by to prakticky náročnejšie, preto som tento spôsob neimplementoval v experimentoch.

7.2 Rádiová lokalizácia

Niektoré multikoptéry, ktoré obsahujú modul na prenos obrazu, vysielajú videoprenos. Toto video sa zobrazuje priamo na ovládači a pilot môže mať lepší prehľad nad zaznamenávaným obrazom. Taktiež veľa multikoptér vysielajú informácie o svojom stave do ovládača pre zobrazenie používateľovi (napríklad stav batérie). Tento prenos sa šíri rádiovými vlnami na frekvencii 5GHz, ktoré je možné odchytať pomocou antén. Tento spôsob by bol oveľa efektívnejší a reálnejší ako na základe zvuku. Preto v rámci ďalšieho vývoja by som sa orientoval na pasívne rádiové zachytávanie takéhoto/obdobného signálu. Táto metóda sa používa na monitorovanie lietadiel a armádne prelety nad daným územím.

Kapitola 8

Záver

Zadanie práce špecifikuje akustickú detekciu dronov pomocou mikrofónneho poľa. Za dron v práci považujem multikoptéry. Samotná detekcia multikoptéry je problematická, pretože vyžarovaný akustický signál môže byť zamenený za iné zariadenia vyžarujúce rovnakú frekvenciu (2.7).

Lokalizácia multikoptéry nie je jednoduchá. Sústredil som sa na metódy využívajúce TDOA (Time Difference of Arrival), teda časový rozdiel príchodu signálu na rôzne mikrofóny. Táto metóda je veľmi populárna a odporúčaná pre akustické zameriavanie. Bohužiaľ po zdĺhavom výskume a niekoľkých experimentoch s rôznym rozmiestnením sa mi nepodarilo rozlíšiť časy jednotlivých príchodov podľa očakávaní (viď 5.2).

Následne na to som navrhol na pohľad jednoduchú metódu postavenú na intenzite zaznamenaného zvukového signálu. Venoval som sa pri tejto metóde najmä zvukovým vlnám, kalibráciám, zvukovým výkonom multikoptér a iným faktorom signálu. Vytvoril som niekoľko experimentov s rôznym rozložením a dvomi kvadrokoptérmi. Prišiel som na to, že efektívnosť metódy závisí na počte použitých mikrofónov. Problém bol však pri rôznej výške preletu (5.3.1). Tento fakt sa mi nepodarilo ovplyvniť. Napriek tomu v určitých prípadoch bol odhad dostatočný v porovnaní s videozáznamom priamo z kvadrokoptéry. Táto metóda ako jediná preukázala určité výsledky.

Na základe výskumu, použitých metód a experimentov som prišiel k záveru, že akustická lokalizácia nie je vhodná pre lokalizáciu multikoptér. Má veľmi malé rozlíšenie účinnosti, aj pri výkonných kondenzátorových mikrofónoch bola vzdialenosť úspešnej detekcie priveľmi malá pre reálne použitie.

Literatúra

- [1] Beiser, A.: *Concepts of Modern Physics*. McGraw-Hill international editions. Physics series, McGraw-Hill, 1987, ISBN 9780071001441.
- [2] Ben Gold, N. M.: *Speech and audio signal processing*. John Wiley & Sons, 1999, ISBN 0471351547.
- [3] Fahy, F.: *Sound Intensity, Second Edition*. Taylor & Francis, 2002, ISBN 9780203475386.
- [4] Randall, R.: *An Introduction to Acoustics*. Dover Books on Physics, Dover Publications, 2012, ISBN 9780486174716.

Príloha A

Obsah priloženého média

Pri práci je priložené pamäťové médium CD-R, na ktorom sú v digitálnej podobe umiestnené všetky podklady využité v práci:

- adresár *thesis* - obsahuje túto prácu
 - adresár *source* - obsahuje zdrojový kód práce v $\text{\LaTeX}$
 - *xmucka02-Dron.pdf* - práca odovzdaná do informačného systému WIS
 - *xmucka02-DronPrint.pdf* - táto práca určená pre tlač
- adresár *skripty* - obsahuje skripty využité pri tvorbe práce
- adresár *záznamy* - obsahuje jednotlivé audiozáznamy využité v práci spolu s videozáznamami
- *intenzita.bat* - Spúšťačí skript pre demonštráciu lokalizácie
- *plagat.pdf* - obsahuje pripravený plagát reprezentujúci prácu
- *README.txt* - obsahuje programovú dokumentáciu pre spustenie práce
- *video.avi* - Video na ktorom sa nachádza príklad behu programu

Príloha B

Plagát



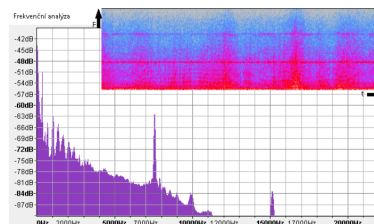
Autor: Milan Múčka

xmucka02@stud.fit.vutbr.cz

Akustická detekcia dronov pomocou mikrofónneho poľa

Detekcia

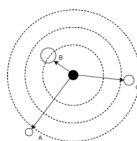
Samotná detekcia vyplýva z frekvenčného zastúpenia v nahrávke.



Dron vydáva špecifickú frekvenciu 7,5kHz.

Pokiaľ je dostatočne zastúpená, môžeme povedať že sa dron nachádza v blízkosti poľa.

Lokalizácia



Lokalizácia na základe intenzity zvuku. Na bližšom mikrofóne je intenzita vyššia.

