

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

RADAROVÝ VÝŠKOMĚR PRO ULTRALEHKÝ LETOUN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK ABSOLON

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

RADAROVÝ VÝŠKOMĚR PRO ULTRALEHKÝ LETOUN

RADAR ALTIMETER FOR ULTRALIGHT AIRCRAFT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK ABSOLON

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ MARŠÍK

BRNO 2015

Abstrakt

Práce řeší problematiku radarového měření vzdáleností s využitím pro výuku přistávání a vzletání ultralehkých letadel. K řešení problematiky jsou využity radary s frekvenční modulací kontinuální vlny, tedy FMCW radary. Řešení je založeno na metodě lineární frekvenční modulace (LFM) s trojúhelníkovým průběhem. Při zkušebním měření v reálných podmínkách bylo zjištěno, že radary pracující v pásmu 24 GHz jsou účinné od 1 metru (v závislosti na hloubce modulace) do 150 metrů. Tento rozsah postačuje k využití pro nácvik vzletů a přistání což je cílem této práce. Dále bylo zjištěno, že při vzletu a přistání se dopplerův jev projevuje minimálně. Výsledný algoritmus pracuje na principu diferenciacce dvou následných spekter a následné validace detekce významných vrcholů na právě zpracovávaném spektru.

Abstract

The main topic of this paper is a radar ranging for use in an aircraft altitude measurement. This should help beginner pilots in practicing landing and take off. To achieve this aim, we chose to use continuous-wave radars with frequency modulation (FMCW). Our solution is based on linear frequency modulation method using triangular modulation pattern. During the testing, it was found out, that radars with 24 GHz bandwidth have a range resolution from 1 meter (depending on modulation depth) to 13 metres. This range is sufficient for usage in training of takeoffs and landings, which is the real purpose of this paper. Another good finding is, that during takeoff and landing, there is minimal occurrence of doppler frequencies. Final algorithm works on principle of two currently processed spectrums, which are subtracted. Afterwards, found peaks are validated on current spectrum.

Klíčová slova

Radar, Měření vzdálenosti, Výškoměr, Frekvenční modulace, FMCW, LFM, Zpracování signálu, Ultralehký letoun

Keywords

Radar, Radar ranging, Altimeter, Frequency modulation, FMCW, LFM, Signal processing, Ultralight aircraft

Citace

Marek Absolon: Radarový výškoměr pro ultralehký letoun, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2015

Radarový výškoměr pro ultralehký letoun

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Maršíka. Další informace mi poskytl prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Marek Absolon
20. května 2015

Poděkování

Velice rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Lukáši Maršíkovi za jeho podporu, cenné rady. Také bych rád poděkoval prof. Pavlu Zemčíkovi, díky kterému bylo možné nahrávat reálná data v letadle a jeho rady ohledně létání.

© Marek Absolon, 2015.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod	2
2	Teoretická část	3
2.1	Radar	3
2.2	Zpracování signálů	4
2.2.1	Rámcování	4
2.2.2	Okenní funkce	4
2.2.3	Metoda doplňování nul (zero padding)	5
2.2.4	Fourierova transformace	6
2.3	Měření rychlosti	6
2.3.1	Dopplerův jev	6
2.3.2	Výpočet rychlosti	6
2.4	Měření vzdálenosti	7
2.4.1	Frekvenční modulace	7
2.4.2	Teorie letů	9
2.5	Vliv úhlu detekce	10
3	Sběr dat	11
3.1	Použitý hardware	11
3.1.1	Radarové hlavy	11
3.1.2	Ovládací modul	12
4	Zpracování dat	13
4.1	Návrh algoritmu	13
4.2	Zpřesnění výsledků	15
4.2.1	Základní detekce	15
4.2.2	Logaritmická detekce	15
4.2.3	Detekce prahovou křivkou	16
4.2.4	Detekce diferenciací spekter	16
4.2.5	Vyhlazování	18
4.3	Zhodnocení metod	19
5	Závěr	21
5.1	Zhodnocení výsledků	21
5.2	Další pokračování práce	21

Kapitola 1

Úvod

Tato práce vznikla za účelem vytvoření systému pro indikaci výšky ultralehkých letounů při vzletu a přistání. Toto je zásadní hlavně pro začínající piloty, kteří neumějí bezpečně odhadnout jak vysoko se při přistávání letoun nachází. Tato neschopnost odhadu výšky při vysokých rychlostech nad travnatým povrchem může vést k poškození letounu při pádu z příliš velké výšky nebo dokonce ke zraněním posádky letounu.

Většina letadel dnešní doby využívá pro měření výšky barometrické výškoměry. Tyto výškoměry, ale nejsou ideální pro měření reálné výšky nad zemí, protože měří relativní výšku letu vztaženou k určitému referenčnímu bodu. Dále jsou závislé na aktuálních meteorologických podmínkách a je nutné je před každým letem kalibrovat. Dalším problémem je, že ve srovnání s radarovými výškoměry nejsou tak přesné. Jejich výhodou je naopak to, že je lze využívat i ve velkých výškách.

V letectví je také využíváno aktivních výškoměrů. Tyto výškoměry fungují na principu vyslání paprsku ať už světelného či radarového. Výška letadla se poté vypočítá z rychlosti paprsku a času jeho návratu. Tento způsob měření výšky je využíván převážně pro měření při letu nízko nad zemí, protože je mnohem přesnější než barometrické přístroje.

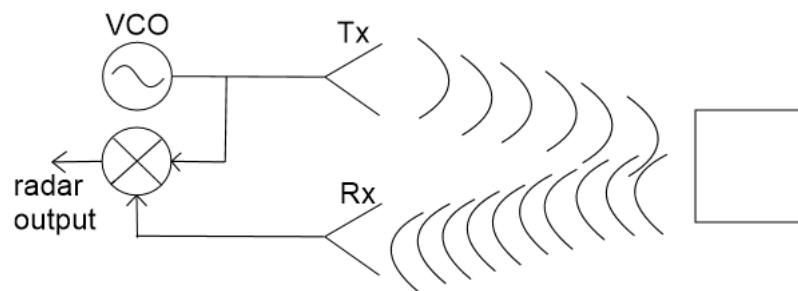
Tato práce se zabývá měřením výšky za pomoci radarů s modulovaným kontinuálním signálem. V následujících kapitolách je popsána teorie ke zpracování radarových signálů, způsoby radarového měření vzdálenosti a rychlosti. V Praktické části práce je následně vylíčen způsob sběru dat, popsán použitý hardware a proces tvorby samotného algoritmu pro detekci výšky.

Kapitola 2

Teoretická část

2.1 Radar

Radar je technologie, která je vysíláním elektromagnetických vln schopna detekovat objekty. S její pomocí je možno určit pozici, vzdálenost a rychlost objektů. Většinou sestává z vysílače a přijmače. Funguje na principu vyslání elektromagnetických vln, které se odrážejí od objektů zpátky do radaru.



Obrázek 2.1: zjednodušená ukázka funkčnosti radaru

Na základě spojitosti vyslaného signálu rozlišujeme tyto dva typy radarů [9, 8]:

- **CW radar** - vysílá signál s konstantní energií obvykle na krátké vzdálenosti. Kvůli kontinuálnímu vysílání a přijímání je zapotřebí dvou oddělených antén. Tento typ radaru se obvykle využívá v policejních radarech, detektorech pohybu nebo v parkovacích senzorech pro auta.
- **Pulzní radar** - u tohoto radaru se využívá přepínání režimu antény mezi vysíláním a přijímáním. Anténa nejdříve vyšle signál a poté čeká na odpovídající odražený signál. Tento způsob práce radaru se využívá hlavně pro měření větších vzdáleností nebo pro meteorologické účely.

Tato práce se zaměřuje na CW radary, které se využívají hlavně pro měření rychlosti. CW radary se dají také využít pro měření vzdálenosti a to za předpokladu modulování frekvence vyslaného signálu. Tímto se do signálu vloží časová značka, díky které je možné poznat, ke kterému odeslanému signálu patří přijatý signál. Po přijetí signálu je od něj

odečten signál vyslaný (znázorněno na obrázku 2.1). Tímto získáme diferenční frekvenci, která se dále zpracovává.

2.2 Zpracování signálů

K výpočtům rychlosti a vzdálenosti je zapotřebí zjistit frekvenci přijmaného signálu. Tuto frekvenci lze získat spektrální analýzou, kterou lze získat aplikováním fourierovy transformace (popsáno v sekci 2.2.4) na přijatý signál. Před zpracováním signálu fourierovou transformací je však dobré signál rozdělit na menší části (rámcování, 2.2.1). Dále je možné použít metodu doplňování nul, čímž se prodlouží rámec a získáme tak přehlednější spektrum.

2.2.1 Rámcování

Segmentace na rámce slouží k rozdělení diferenčního signálu na menší části. Toto je potřebné kvůli fourierově transformaci, která na vstupu očekává nekonečně dlouhý periodický signál. Pokud bychom aplikovali fourierovu transformaci na celý signál, tak by výstupem bylo spektrum mnoha frekvencí, kde se ztrácí požadovaná informace.

Ideální délka rámce by měla být minimálně jednu periodu dlouhá. Dále by měla být mocninou dvou, což je ideální délka pro výpočet fourierovy transformace.

2.2.2 Okenní funkce

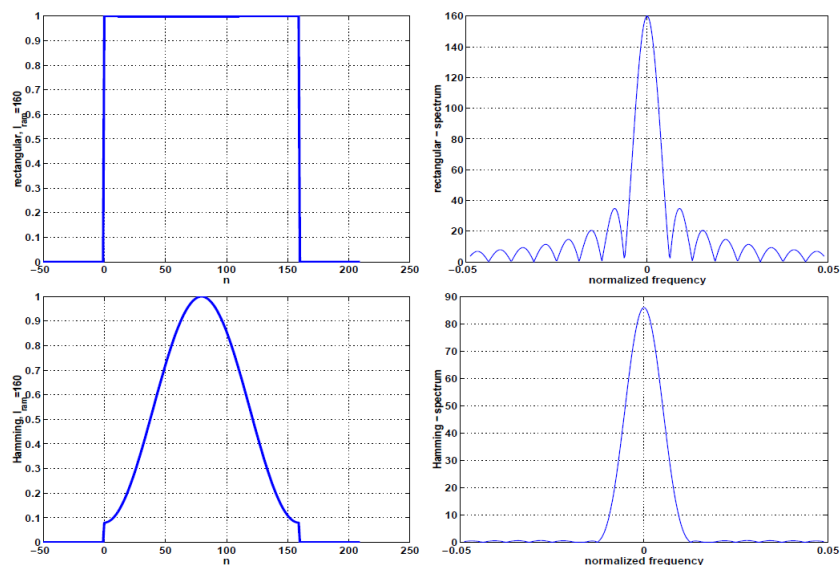
Poslední metoda prováděná před frekvenční analýzou je vynásobení rámců okenní funkcí, čímž se docílí vytvarování okrajů rámců tak, že se minimalizují nenávaznosti signálu v rámci. Tyto nenávaznosti by jinak vedly k znehodnocení výsledků fourierovy transformace. Nejčastěji využívané okenní funkce jsou [8]:

- **Hamming** window - nejlepší k použití s náhodnými signály. Dokáže potlačit postraní laloky ve spektru, které u obdélníkového okna výrazně zkreslují podobu spektra. Tato funkce je dána výrazem 2.1. [5, 2]

$$w(n) = 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (2.1)$$

- **Hann** (Hanning) window - Tato okenní funkce je formou podobná Hammingově okenní funkci, ale oproti ní tato funkce snižuje okraje rámců do nuly. Zachovává dobré frekvenční rozlišení a přiměřenou amplitudovou přesnost. Tato funkce je dána výrazem 2.2. [5, 2]

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right) \quad (2.2)$$

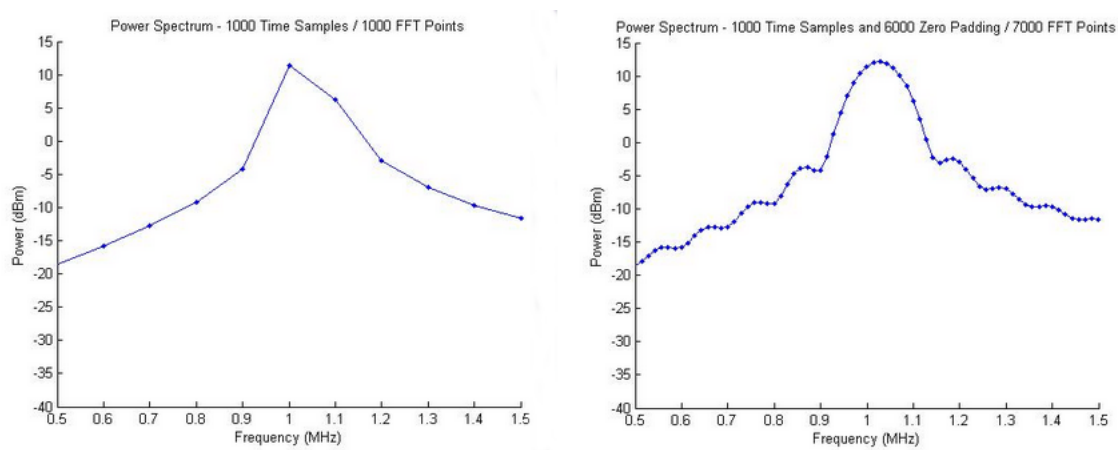


Obrázek 2.2: Ukázka rozdílu mezi základním obdélníkovým oknem a Hammingovým oknem (převzato z [11])

Při používání okenních funkcí kvůli potlačení postranních laloků ve spektru je dobré, pokud je to možné, zajistit překrývání rámců. Tímto překrýváním se zaručí, že se při aplikaci okenní funkce neztratí žádná informace.

2.2.3 Metoda doplňování nul (zero padding)

Zero padding je metoda, při které se na konec signálu přidávají nuly, čímž se tento signál prodlouží. Při následné spektrální analýze dochází ke zvětšení počtu binů spektra. Důležité je, že použitím této metody nepřidáváme do spektra žádnou novou informaci. Tato metoda nám může pomoci k určení jedné izolované frekvence, bohužel už nikoli k rozeznání příliš blízkých nebo spojených frekvencí.



Obrázek 2.3: Rozdíl při nepoužití a použití zero padding

2.2.4 Fourierova transformace

Při zpracovávání signálů pro měření rychlostí a vzdáleností je nejdůležitější spektrální analýza. Ze spektra signálu lze vyčíst jednotlivé frekvenční komponenty, což jsou nejdůležitější prvky výpočtů rychlostí a vzdáleností.

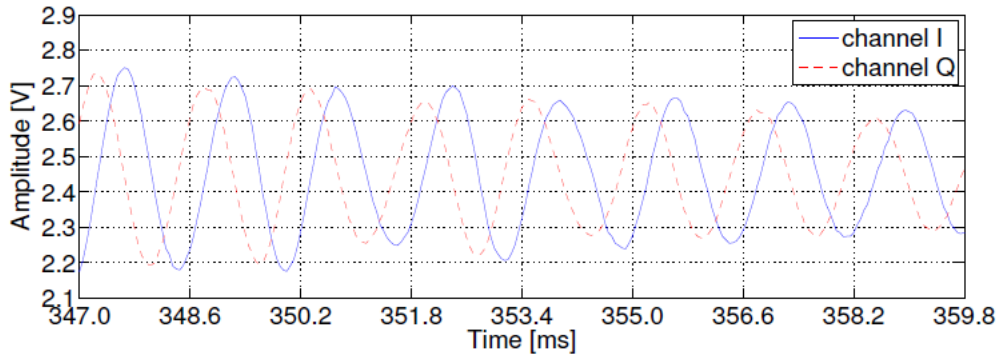
K dekompozici signálu na jednotlivé frekvenční složky slouží Fourierova transformace. Výstupem této operace je frekvenční spektrum signálu. Ke zpracování digitálních signálů za použití počítače slouží diskrétní Fourierova transformace (DFT). Nejvyužívanější funkcí pro výpočet DFT na počítačích je Rychlá Fourierova transformace (FFT). Důvod proč se využívá FFT místo DFT je proto, že je mnohonásobně efektivnější a až stonásobně rychlejší na výpočet.

Podmínkou pro Fourierovu transformaci je, že signál musí být periodický. Kvůli tomu se provádí před aplikací transformace rámcování a aplikace okenních funkcí. Délka signálu by měla být mocninou dvou, což rychlou Fourierovu transformaci urychlí, protože funguje na principu nahrazení jedné DFT dvěma dílčími DFT.

2.3 Měření rychlosti

2.3.1 Dopplerův jev

Dopplerův jev vzniká, pokud je pozorovatel v pohybu relativně ke zdroji elektromagnetických vln [9]. Při zpracování radarových signálů lze tento jev pozorovat jako zvýšení (při přibližování se k radaru) nebo snížení (při vzdalování se od radaru) přijaté frekvence oproti vyslané frekvenci. Směr pohybu pozorovaného objektu lze také zjistit z posunutí komplexní složky signálu o $\frac{\pi}{2}$ při pohybu k radaru nebo $-\frac{\pi}{2}$ při pohybu od radaru.



Obrázek 2.4: Posunutí mezi složkami (přibližně o $-\frac{\pi}{2}$) způsobené přibližováním objektu (převzato z [7])

2.3.2 Výpočet rychlosti

K výpočtu rychlosti se využívá Dopplerovského posunutí. Tato metoda je opravdu jednoduchá, protože z radaru získáváme přímo Dopplerovu frekvenci, ze které lze jednoduše vypočítat rychlost měřeného objektu. Nejdříve se provede zpracování výstupního signálu

jak je popsáno v předchozí kapitole 2.2 a zjištění směru pohybu objektu. Po aplikování Fourierovy transformace zjistíme ze spektra dopplerovskou frekvenci. Tuto frekvenci následně dosadíme do vzorce pro výpočet rychlosti 2.3

$$v = \frac{f_d}{2f_t} c \quad (2.3)$$

kde v je rychlost pozorovaného objektu (relativní k radaru) v m/s , f_d je dopplerovská frekvence v Hz, f_t je vysílací frekvence radaru a $c = 299,792,458m/s$ je rychlost světla ve vakuu.

2.4 Měření vzdálenosti

Měření vzdálenosti za pomoci radarů s kontinuální vlnou není triviální problém jak by se mohlo zdát. Tyto radary musejí zvládat modulaci signálu, čímž se do signálu vloží jistá časová značka díky které lze následně vypočítat vzdálenost radaru od pozorovaného cíle.

2.4.1 Frekvenční modulace

Je základní technika při měření vzdáleností. Jak již bylo řečeno výše, radary s kontinuální vlnou bez frekvenční modulace nejsou použitelné k měření vzdáleností, protože se u nich nedá určit doba letu vyslaného signálu. Tohoto určení času lze dosáhnout značením, které je dané zvyšováním či snižováním vysílaných frekvencí.

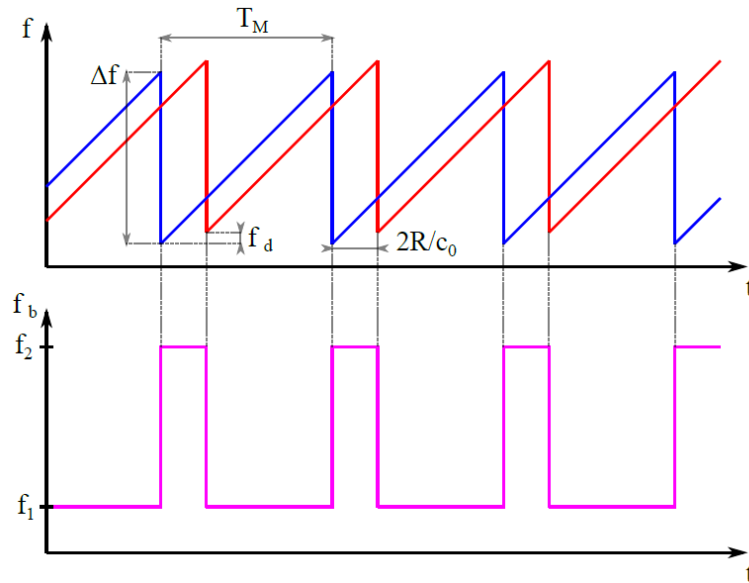
Dále platí, že pokud chceme dosáhnout dobrého rozlišení vzdáleností, hlavně při malých vzdálenostech, je potřeba používat co největší hloubku modulace. Čím je větší hloubka modulace tím se nám ve spektru daří lépe rozlišovat blízké frekvence.

- **FSK** Principem této metody je přepínání dvou frekvencí a následné porovnávání fáze signálu. Tato metoda je použitelná pouze za předpokladu, že je sledovaný objekt v pohybu. V momentech, kdy radar vysílá určitou frekvenci, funguje pouze jako radar s kontinuální vlnou. Tudíž pokud by se objekt nepohyboval, tak se na výstupu radaru neprojeví žádný rozdíl, protože výstupem radaru je rozdíl vyslané frekvence a přijaté frekvence (znázorněno na obrázku 2.1). Vzorec pro výpočet vzdálenosti je poté 2.4:

$$R = -\frac{c\Delta\varphi}{4\pi f_{Step}} \quad (2.4)$$

kde R je vzdálenost pozorovaného objektu, f_{Step} je rozdíl vysílacích frekvencí, $\Delta\varphi$ je rozdíl fází přijatých frekvencí a $c = 299,792,458m/s$ je rychlost světla ve vakuu.

- **LFM** Lineární frekvenční modulace je metoda, která je založena na rovnoměrném zvyšování a snižování vysílané frekvence. Základním průběhem modulace je pilovitá modulace znázorněná na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Základní pilovitý průběh modulace

U tohoto průběhu lze zjistit, zda došlo k doplerovskému posunutí, ale nelze ho již eliminovat, čímž dochází ke zkreslení frekvence a tudíž i vzdálenosti.

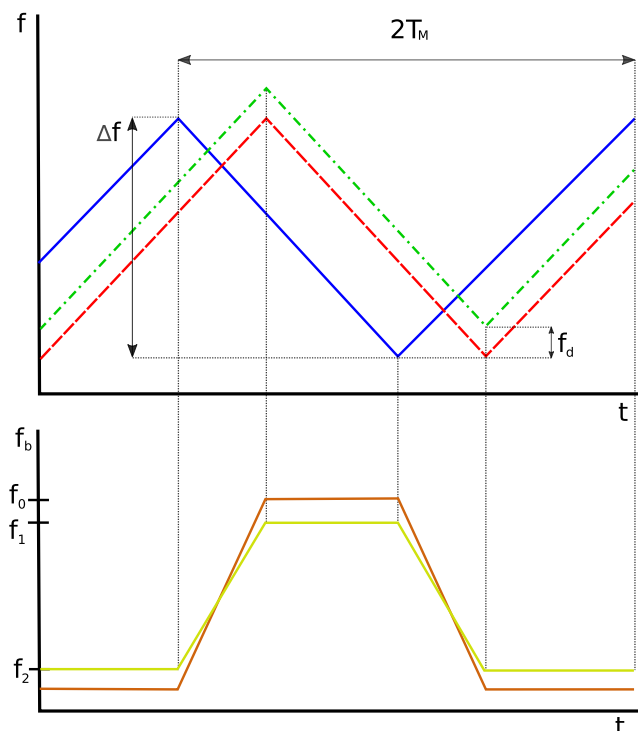
Výhodnějším průběhem modulace je trojúhelníková modulace, u které dochází k periodickému zvyšování i snižování frekvence 2.6, takže nedochází k žádným frekvenčním skokům. U tohoto průběhu už je možné detekovat a kompenzovat doplerovskou frekvenci čímž se zajistí výpočet validní hodnoty vzdálenosti.

Základní vzorec pro výpočet vzdálenosti je 2.5

$$R = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{cf_b T_M}{2 \Delta f} \quad (2.5)$$

kde R je vzdálenost pozorovaného objektu, Δt je neznámý čas do návratu signálu, f_b je získaná frekvence, T_M je poměr velikosti modulace k její délce a $c = 299,792,458m/s$ je rychlost světla ve vakuu.

Pro eliminaci doplerovského posunutí je potřeba rámec trojúhelníkového průběhu rozdělit na náběžnou hranu a sestupnou hranu. Získané význačné frekvence z těchto částí průběhu modulace jsou následně zprůměrovány, čímž je získána frekvence bez doplerovského posunutí. Tento princip je dobře viditelný v dolní části grafu 2.6. Při zvětšující se modulaci dochází k doplerovskému posunu na nižší frekvence a při snižující se modulaci dochází opačně k posunutí na vyšší frekvence. Tato posunutí jsou však velikostí stejná



Obrázek 2.6: Trojúhelníkový průběh modulace se znázorněným posunutím způsobeným dopplerovým jevem

Vzdálenost lze poté vypočítat ze vztahu 2.6.

$$R = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c}{2} \left(\frac{f_{bu} + f_{bd}}{2} \right) \frac{T_M}{\Delta f} \quad (2.6)$$

Vylepšením trojúhelníkového průběhu modulace je přidání statické frekvence pro detekci dopplerova jevu. Díky tomu je možné přesněji vypočítat rychlost a z ní následně provést výpočet úhlu detekovaného signálu. Tento úhel může být následně použit ke korekci výsledné hodnoty výšky. Tato korekce je ovšem výhodná pouze při detekci ve větších výškách. Při nízké výšce je chyba způsobená tímto úhlem zanedbatelná.

2.4.2 Teorie letů

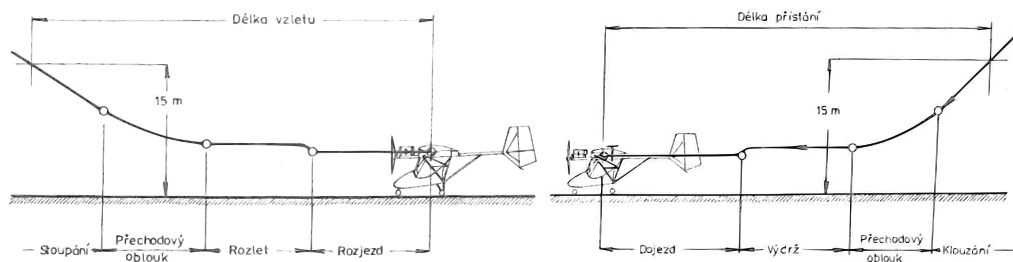
Tato práce hlavně souvisí s přistáváním a vzlétáním ultralehkých letounů na malých letištích s travnatou přistávací dráhou. Při přistání a vzletu je velice důležité znát reálnou výšku nad dráhou. Toto je nutné protože po určitou dobu se jak při vzletu tak při přistání udržuje konstantní výška a neskušený pilot může mít problém tuto výšku správně odhadnout.

Přistání Při přistání se nejdříve snižuje letová rychlost a zároveň se relativně strmě klesá po přímce k přistávací dráze. V moment vyrovnání letu nad přistávací dráhou by měla být rychlost letounu asi o 20 km/h vyšší než je pádová rychlost. Výška letu nad dráhou by měla být co nejnižší v ideálním případě od několika centimetrů do půl metru nad dráhou. Po vyrovnání se udržuje nízká výška letu a nadále se snižuje rychlost. Jakmile je dosaženo

pádové rychlosti tak se letoun prosedne, ale protože se nachází v nízké výšce tak bezpečně dosedne na zem.

Pokud letoun dosedne při příliš vysoké rychlosti dochází ke skokům, které mohou poškodit podvozek.

Další obtíží při přistání jsou poryvy vzduchu, které mohou zapříčinit náhlé vystoupení letounu do výšky. Pokud letoun vystoupá o více než 2 metry je potřeba opět nabrat rychlost a výšku a přistání zopakovat. Pokud letoun zůstane v bezpečné výšce tak se může pokračovat v přistání opětovným vyrovnáním letu nad přistávací dráhou. [6]



Obrázek 2.7: Ukázka trajektorie vzletu a přistání. převzato z [6]

Vzlet Při vzletu, jakmile se dosáhne pádové rychlosti a letoun se odlepí od země, je třeba udržovat nízkou výšku dokud se nedosáhne dostatečné rychlosti. Toto udržování výšky je také důležité kvůli možnosti poruchy motoru.

Pokud by se motor zastavil ještě před dosažením dostatečné rychlosti a výšky, hrozil by pád letounu. Pokud se však nabírá rychlost v bezpečné výšce, tak při poruše motoru je stále ještě možné dosednout s letounem bezpečně zpět na dráhu.

Po dosažení dostatečné rychlosti následuje prudké vystoupení do letové výšky. [6]

2.5 Vliv úhlu detekce

Každá radarová hlava měří vzdálenost v úseku daném úhlem měření. Ve vyšších výškách může tento úhel způsobit chybu v měření, protože radar může detekovat vzdálenosti z různých míst snímaného úseku. Pro detekci ve větších výškách není tato chyba moc významná vzhledem k tomu, že pro přistání a vzlet jsou důležité hodnoty v nižší výškách. Chyba měření ve výšce 80m dosahuje maximální hodnoty 0.5m.

V nízkých výškách je tato chyba naprosto zanedbatelná.

Kapitola 3

Sběr dat

Sběr dat probíhal na letounu Aeroprakt A-22. Radarová hlava byla nejdříve připevněna na spodní části trupu mezi koly podvozku. Tato pozice byla výhodná, protože při přistávání je tato část letounu v ose s přistávací dráhou. Dále nejsou potřebné žádné další korekce výšky dané náklonem letounu, protože tato pozice odpovídá pozici podvozku, na který se přistává.

Největším problémem u tohoto umístění je problémová detekce v malých výškách daných omezením hloubky modulace jednotlivých hlav radaru.

Při následném měření byly umístěny hlavy radarů na křídla vedle vzpěr. Díky tomuto umístění se navýšila výška radaru, což vedlo k umožnění detekce i v nižších výškách. Umístění na křídlech, ale vede k chybě a nutné korekci při přistávání v náklonu kvůli bočnímu větru.

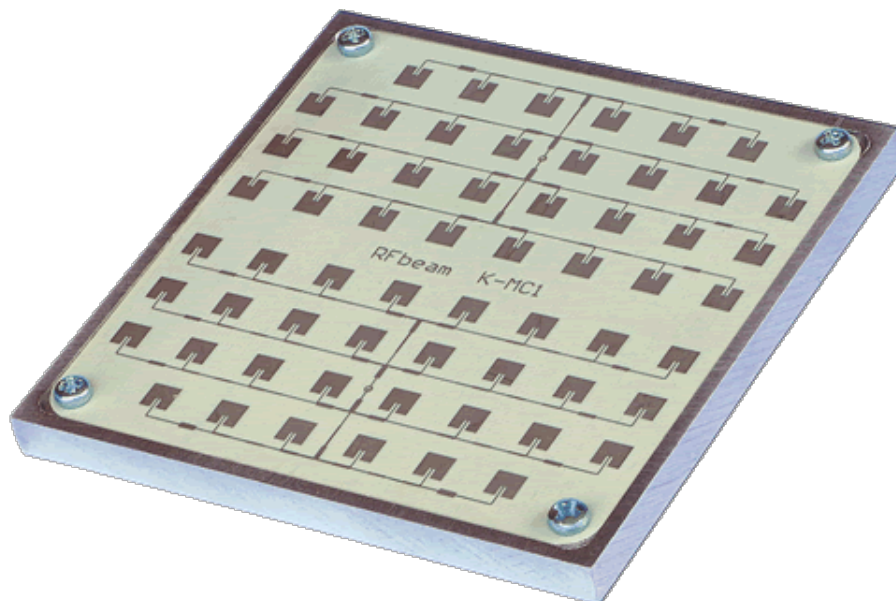
Dalším problémem při tomto měření bylo využití dvou radarových hlav a jejich současném využívání což vedlo k interferencím a znehodnocením dat v určitých výškách. Tento problém však nebyl tak významný, protože toto měření bylo zaměřeno na detekci v nízkých výškách, kde už k interferencím nedocházelo.

3.1 Použitý hardware

3.1.1 Radarové hlavy

Pro měření byly použity radarové hlavy KMC-1, KMC-4 od firmy RFbeam Microwave GmbH a hlava IVS-948 od firmy InnoSent. Parametry těchto hlav, důležité pro použití v algoritmu detekce výšky, jsou popsány v následující tabulce. Maximální hodnoty hlav KMC-4 a IVS-948 se liší od KMC-1, protože tyto hodnoty byly měřeny za letu zároveň oběma hlavama, což vedlo ve vyších výškách k interferencím a tudíž zkreslení výsledných maximálních hodnot. Ukázka radarové hlavy je na obrázku 3.1.

Radarová hlava	hloubka modulace	maximální výška	minimální výška
KMC-1	179 MHz	158.7 m	2.865 m
KMC-4	129 MHz	26.28	3.674
IVS-948	289 MHz	32.44 m	1.76 m



Obrázek 3.1: Ukázka radaru K-MC1

3.1.2 Ovládací modul

Radarové hlavy jsou ovládány modulem vytvořeným firmou CAMEA. Základem tohoto modulu je čip Xilinx Zynq. FPGA část tohoto čipu se stará o řízení A/D převodníků (12-bit), čili vzorkování a též o D/A převod modulačního signálu (12-bit to 0-10V). Vzorky jsou pak přenášeny skrz AXI stream sběrnici do dual-core ARM části Zynqu (zde běží Linux a využívá se DMA přenosu), která data přeposílá po Ethernetu jako UDP packet. Data poslaná po Ethernetu jsou přijímána v počítači programem RadarSignalLab (vytvořeným Ing. Lukášem Maršíkem), který je ukládá do souboru typu rrc. V tomto souboru jsou data uložena v binárním formátu (podobajícím se strukturou PNG).

Výstupem jsou 2 páry signálů, vždy reálná a imaginární část. U radarů KMC-1 a IVS-948 je první pár zesílená forma signálu a druhý nezesílená forma. U radaru KMC-4 je prvním párem signál z jedné antény a druhým párem signál z druhé antény. Oba tyto signály jsou trochu zesíleny. U všech radarových hlav jsou v prvním páru zahrnuty i synchronizační bity.

Kapitola 4

Zpracování dat

Zpracování dat a návrh algoritmu pro detekci výšky probíhalo ve výpočetním prostředí MATLAB. Největším problémem při zpracování je detekce správné frekvence ze spektra. Důvodem je frekvence harmonické složky signálu, která zkresluje hodnoty frekvencí odpovídajících malým výškám (tyto výšky jsou vypsány pro jednotlivé hlavy v tabulce 3.1.1). Dalším problémem je, že tato frekvence má příliš vysokou hodnotu amplitudy, což při obyčejné detekci důležitých vrcholů vede k nalezení vrcholu opovídajícího této frekvenci.

4.1 Návrh algoritmu

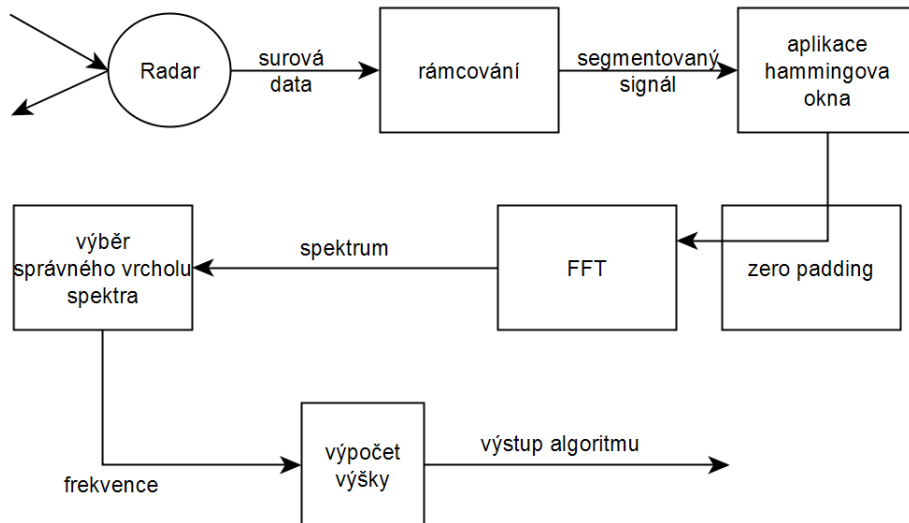
Algoritmus zpracovává rámce signálu dané trojúhelníkovým průběhem modulace. Ohraňování tohoto rámce je v signálu značeno synchronizačními bity vloženými ovládacím modulem. Tyto bity jsou hodnoty amplitudy navýšeny o hodnotu 2^{15} . Tyto hodnoty je po vybrání rámce nutné opět snížit na jejich původní hodnotu.

Základem algoritmu pro výpočet výšky je fourierova transformace, díky které získáme spektrum frekvencí. Toto spektrum je poté dále zpracováváno a jsou z něj vybrány výrazné frekvence z nichž je jásledně vypočítána vzdálenost radaru od země.

Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků, je potřeba před fourierovou transformací rámec signálu předzpracovat. Nejdříve se musí odečíst stejnosměrná složka, která by nám ve spektru vytvářela další nežádoucí vrchol.

Následně je aplikováno Hammingova okenní funkce, která vytvaruje okraje rámce signálu tak, aby se zajistila jeho návaznost a splnil se požadavek fourierovy transformace na periodicitu signálu. Aplikací Hammingovy okenní funkce je míněno vynásobení každého prvku diskrétního signálu hodnotou získanou ze vzorce 2.1.

Nakonec je signál prodloužen za pomoci metody zero-padding čímž docílíme hladšího průběhu spektra. Rámec musí být prodloužen na délky odpovídající mocninám dvou. Tato podmínka je způsobena implementací diskrétní fourierovy transformace, která lépe pracuje se signály těchto délek.



Obrázek 4.1: Blokové schéma algoritmu

Tyto operace jsou prováděny na každé složce komplexního signálu samostatně. Po tomto předzpracování je možné aplikovat diskretní fourierovu transformaci.

Diskretní fourierova transformace byla ve výpočetním prostředí MATLAB prováděna funkcí $fft()$. Pro tuto funkci bylo potřeba složit komplexní signál čehož se docílo vynásobením komplexní části signálu $\sqrt{-1}$ a jejím následným přičtením k reálné složce signálu.

V $C++$ byla použita knihovna FFTW [4]. Tato knihovna obsahuje potřebné datové struktury pro ukládání komplexních signálů a výsledného spektra a také metody k provedení výpočtu diskretní fourierovy transformace.

Největší rozdíl mezi funkcí $fft()$ v MATLABu a metodami FFTW je, že oproti MATLABu, FFTW provádí výpočet nenormalizovaného spektra, které je potřeba dále normalizovat. Pro potřebu modulu pro výpočet výšky byla prováděna normalizace délkou okna. Dalším rozdílem je nutnost aplikace FFTW na okno délky mocniny dvou. Toto ovšem nebyl velký problém vzhledem k tomu, že algoritmus vždy provádí zero-padding do některé z těchto délek.

Dalším krokem je získání amplitudové části spektra, což je získáno dosazením do pythagorovy věty. Díky této operaci není potřeba nadále pracovat s komplexními čísly.

Po získání spektra je potřeba provést posunutí nulové frekvenční složky do středu spektra. Tato operace se může zdát zbytečná, ale pro další výpočty a optimalizace algoritmu je velice důležitá. Hlavně protože další části a výpočty 4.2 pracují s transformacemi indexů spektra a nutnost pokaždé přepočítávat hodnoty by byla zdlouhavá. Posunutí je prováděno výměnou polovin spektra se zachováním pořadí v těchto částech.

Nejdůležitější částí je výběr správné dominantní frekvence, ze které je následně vypočítána vzdálenost od země dosazením do rovnice 2.5. Tato část algoritmu byla řešena více způsoby, které jsou popsány a porovnány v následující sekci 4.2. Frekvence je vybírána funkcí, která hledá vrcholy ve spektru. Vrcholy jsou vybírány na základě kontroly okolních bodů, pokud jsou okolní body nižší než kontrolovaný bod a hodnota je větší než posledně nalezený vrchol tak je současný bod vybrán jako hledaný vrchol. Takto se prohledá celé spektrum čímž jsou získány nejvýznamější vrcholy.

4.2 Zpřesnění výsledků

V následujících oddílech jsou popsány přístupy k detekci významných frekvencí. Byly otestovány čtyři přístupy k analýze spektra a následné detekce. První metoda je založena na průchodu spektrem a porovnávání jednotlivých metod. Ve druhé metodě je využito logaritmického zobrazení spektra. Další přístup pracuje s prahovou krivkou, která kopíruje spektrum a v poslední metodě je použit přístup diferenciací dvou spekter a následné detekci vrcholů.

4.2.1 Základní detekce

Základní a první metodou použitou pro detekci správné frekvence ze spektra je obyčejná detekce vrcholů. Problém s frekvencí harmonické složky signálu byl vyřešen tak, že byl vybírána vždy druhá nejvýraznější frekvence. Výběr druhé nejvyšší hodnoty zaručoval určitou míru správné detekce, ale musel být ještě přidán práh, jehož překročení značilo chybnou hodnotu. Práh pro filtrování chybných detekcí byl nastaven na hodnotu odpovídající 40 metřům. Tato hodnota byla vybrána z důvodu příliš nevýrazných hodnot frekvencí pro větší výšky, což vedlo k exponencionálnímu zvyšování chybných detekcí v závislosti na růstu vzdálenosti. Detekce výšky této metody je zobrazena v grafu ??

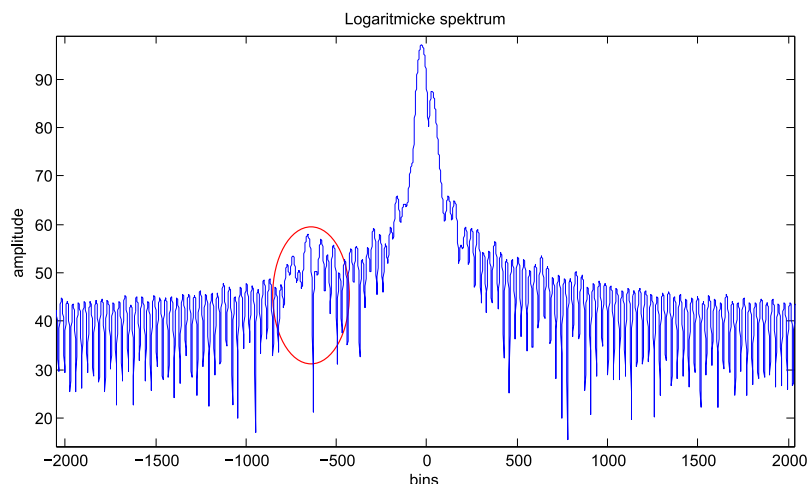
4.2.2 Logaritmická detekce

Další navrženou a testovanou metodou byla detekce vrcholu z logaritmického zobrazení spektra. Tato metoda funguje na principu detekce sloučných vrcholů, což se projevuje odchylkou v logaritmické posloupnosti jednotlivých vrcholů, jak je znázorněno v grafu 4.3. Detekce vrcholů tímto způsobem probíhá tak, že se získané amplitudové spektrum zlogaritmuje dle vzorce 4.1.

$$B(n) = 20 \log_{10}(b(n)) \quad (4.1)$$

Následná detekce vrcholů probíhá průchodem celého spektra a detekcí nízkých hodnot, mezi nimiž se následně hledají vzdálenosti větší než průměrné. Takto je získána oblast výskytu hledaného vrcholu spektra. Na výřezu této oblasti je provedeno základní hledání vrcholů a nejvýraznější vrchol je použit pro výpočet vzdálenost.

Tato metoda je efektivní pro detekci od vysokých frekvencí až po frekvence kdy ještě nedochází ke slučování s frekvencí harmonické složky.

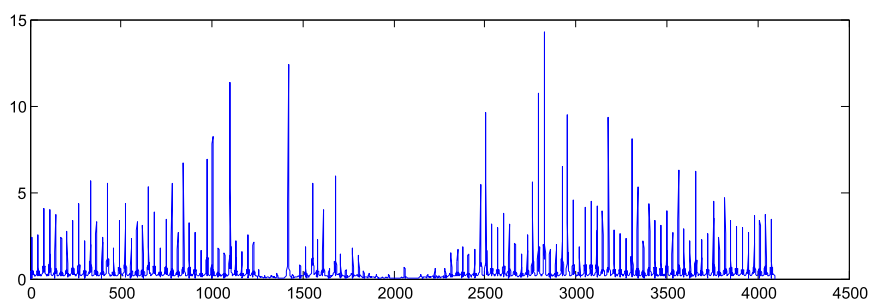


Obrázek 4.2: Výřez z logaritmického zobrazení s vyznačeným hledaným úsekem. $F_s = 50\text{kHz}$, délka okna 4096

4.2.3 Detekce prahovou křivkou

Teorie této metody je založena na principu prahování, kde prahem je křivka, která kopíruje vrcholy spektra. Největším problémem této metody je vytvoření prahovací křivky. Protože amplituda spektra v okolí nulové frekvence hodně nepravidelně kolísá, je velice obtížné nalézt rovnici vyjadřující křivku odpovídající spektru. Nejjednodušším způsobem vytvoření této křivky bylo drastické vyhlazování spektra a následné posunutí výsledné křivky nad původní spektrum. U takto vytvořeného prahu je však problémem, že hodnoty harmonické frekvence, které se touto metodou snažíme zbavit, se vyhlazením v poměru k ostatním částem spektra snižují o poznání více.

Kvůli těmto komplikacím není tato metoda velice efektivní pro jakékoli hodnoty frekvencí vzdálené od frekvence problémové harmonické složky.

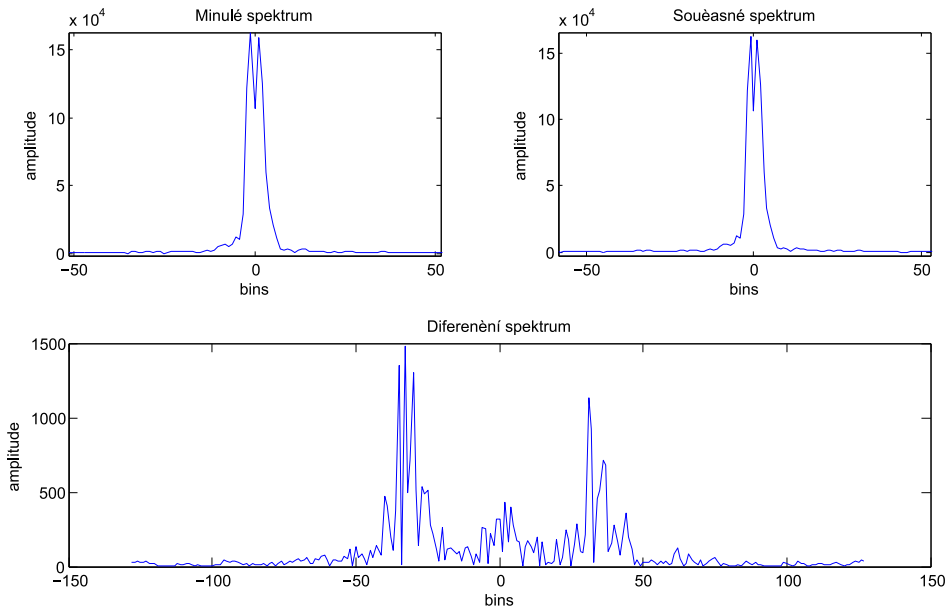


Obrázek 4.3: Ukázka spektra po provedení prahování křivkou. $F_s = 50\text{kHz}$, délka okna 4096, délka vyhlazování 5 prvků, počet vyhlazení 15

4.2.4 Detekce diferenciací spekter

Poslední a nepřesnější metodou je vytvoření diferenciací spektra z dvou po sobě jdoucích spekter. Tato metoda spoléhá na změny ve frekvencích a amplitudách pro jednotlivá spektra. Tyto změny jsou detekovány odečtením právě zpracovávaného spektra od spektra zpracovaného v minulé iteraci. Výsledkem je soubor rozdílů (zobrazených na obr. ??) na něž se následně aplikuje detekce vrcholů.

Díky tomuto odečtení je možné se efektivně zbavovat frekvence dané harmonickou složkou signálu, která se v po sobě jdoucích spektrech skoro nemění. Pokud tedy nedošlo k detekci v nízkých výškách a hledané frekvence nezačnou interferovat s frekvencí harmonické složky. Toto je ovšem žádoucí jev, protože díky němu lze detekovat frekvence i v nižších výškách, kde ostatní metody selhávají.



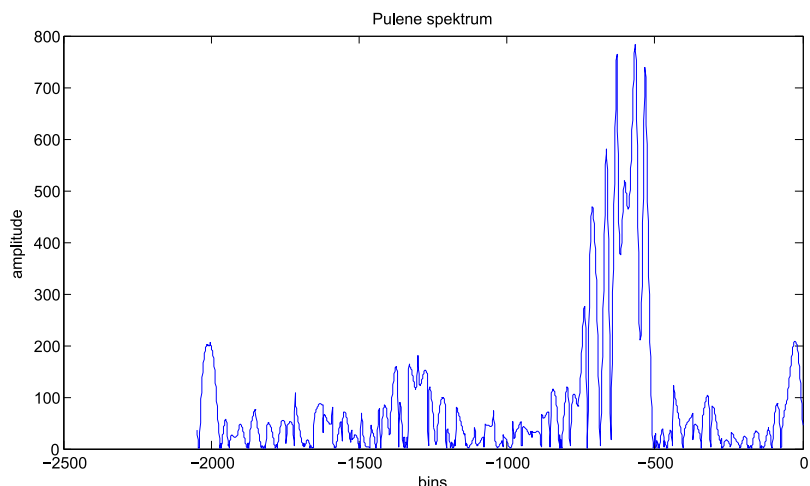
Obrázek 4.4: Ukázka diferenčního spektra a spekter, ze kterých bylo vytvořeno. $F_s = 50\text{kHz}$, délka okna 4096

Vrchol spektra nalezený touto metodou však není reálným vrcholem ve zpracovávaném spektru. Proto je zapotřebí provést detekci vrcholů znovu tentokrát na výřezu z originálního spektra. Velikost tohoto výřezu byla, po protestování různých hodnot, stanovena na 200 binů spektra o velikosti okna 4096 binů.

Implementace této metody a její testování prokázalo, že je nejpřesnější a s největším rozsahem měřených výšek.

Půlení spektra Tato metoda prošla v průběhu testování několika úpravami. První úprava byla odečítání hodnot kladné části spektra od záporné části spektra. Tímto odečtením se dosáhlo přesnější detekce vrcholů. Tato úprava byla možná, protože výrazné vrcholy se nacházejí buď v kladné části spektra, pokud se hodnota modulace zmenšovala nebo v záporné části, pokud se hodnota modulace zvětšovala. Pro úpravu odečtením bylo nutné zpracovávat signál jednoho průběhu modulace dvakrát. Jednou pro nástupnou hranu trojúhelníku a jednou pro sestupnou hranu trojúhelníku.

Vícenásobná detekce Další úpravou je zprášňování hodnot na základě detekce několika vrcholů. Při první detekci z rozdílového spektra je provedeno hledání více než jednoho významného vrcholu. Takto nalezené vrcholy se následně porovnávají s nalazenými vrcholy z opačného směru modulace. Pokud si prvky odpovídají v rámci pozice ve spektru tak jsou uznány jako správně detekované. Dále se kontroluje jestli některý vrchol neodpovídá kontrolovanému vrcholu lépe než jemu odpovídající nalezený, což by vedlo k úpravě právně detekovaného prvku.



Obrázek 4.5: Ukázka spektra po provedení půlení. $F_s = 50\text{kHz}$, délka okna 4096

Velikost tolerované chyby (rozsahu detekce) se počítá z měřené rychlosti přibližování z důvodu dopplerovského posunutí 4.2.

$$E = 2 \left(\frac{f_{up} + f_{down}}{2} - f_{up} \right) \quad (4.2)$$

Zpracování celého průběhu modulace Rozdělení průběhu modulace na nástupnou a sestupnou hranu a jejich následné zpracování snižuje rozlišení spektra na polovinu. Toto při použití nižšího počtu vzorků při měření může znamenat docela velký problém. Proto byl algoritmus pozměněn, aby zpracovával celý průběh modulace najednou. Následné zpracování probíhá vždy pouze se zápornou nebo kladnou částí spektra.

4.2.5 Vyhlažování

Při samostatném výpočtu výšky dochází ke kolísání počítané výšky. Toto kolísání je dané převážně chybou způsobenou nepřesnostmi eliminace dopplerovské frekvence, protože si hodnoty získané z náběžné a sestupné hrany neodpovídají v čase detekce. Ve vyšších výškách se k této nepřesnosti ještě přidává chyba způsobená úhlem (viz. sekce 2.5).

Toto kolísání probíhá docela pravidelným způsobem okolo reálných hodnot výšky. Díky tomuto je možné k eliminaci tohoto kolísání využít vyhlazovacích funkcí. Pro vyhlazování byly implementovány 2 metody založené na průměrování: Obdélníkové vyhlazování a trojúhelníkové vyhlazování.

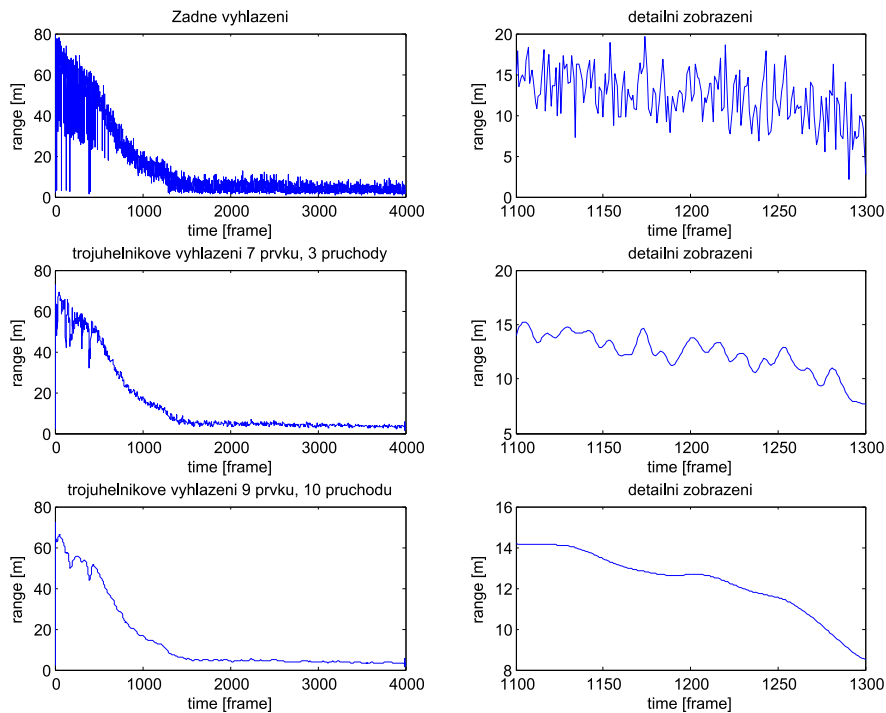
- **Obdélníkové vyhlazení** Tato vyhlazovací funkce funguje na principu průměru z n hodnot. Ke každé hodnotě je přičteno $(n - 1)/2$ hodnot z každé strany a následně je výsledek vydělen hodnotou n .

$$X_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.3)$$

- **Trojúhelníkové vyhlazení** Trojúhelníkové vyhlazování funguje na stejném principu jako obdélníkové vyhlazování, ale navíc je každá hodnota vynásobena váhou. Nejvyšší váhu má středová hodnota, pro kterou je počítáno vyhlazení. Následné vydělení je hodnotou danou součtem všech váh hodnot.

$$X_i = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{n-1}{2} - \left| \frac{n-1}{2} - i \right| \right) x_i \right)}{n} \quad (4.4)$$

Kolísání by však v budoucnu bylo mohlo být využito ke generování zvukové indikace, protože se kolísání mírně zvětšuje se stoupající hodnotou výšky.

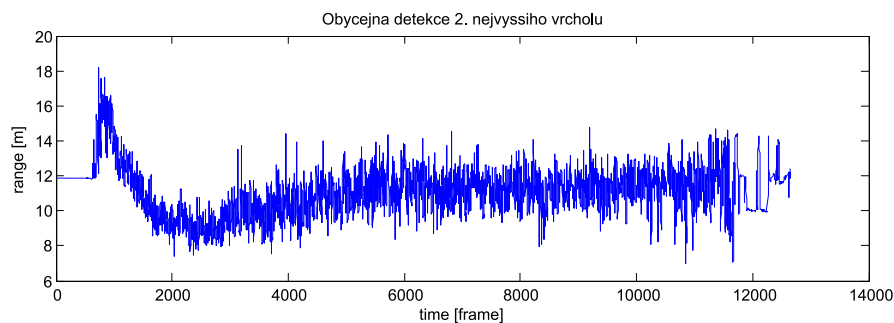


Obrázek 4.6: Ukázka vyhlazování

4.3 Zhodnocení metod

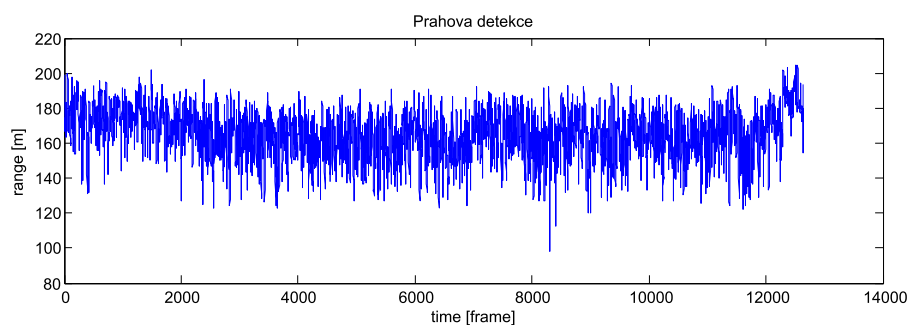
Pro detekci správné frekvence byly použity čtyři metody. Metoda základní detekce je použitelná spíše na detekci vrcholů u metod kde se ve spektru nenalézá harmonická frekvence způsobená změnou směru frekvenční modulace. Výsledkem této metody je snížení získaných hodnot použitelných frekvencí kvůli zahazování chybně vybraných hodnot.

Detekce z logaritmického zobrazení prokazuje značně lepší výsledky než předchozí způsob detekce. Metoda je velice účinná pro detekci velkých výšek. Problémem je, že při přiblížení se k harmonické frekvenční složce a následnému prolínání s ní.



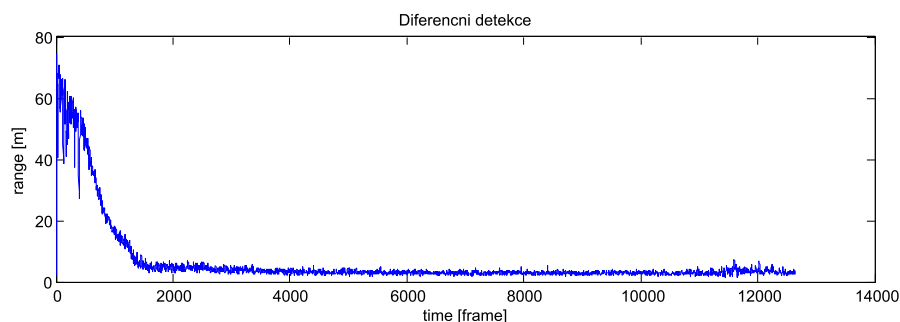
Obrázek 4.7: Výsledek zpracování přistání obyčejným výběrem vrcholů, v grafu jsou zahrnuty i chybně vybrané vrcholy

Způsob nalézání význačných frekvencí pomocí prahové křivky by mohl být velice efektivní, nebýt značné obtížnosti výpočtu křivky pro prahování. Dalším problémem jsou neustálé změny tvaru a amplitudy spektra.



Obrázek 4.8: Výsledek zpracování pomocí prahové křivky vytvořené vyhlazováním

Metoda detekcí diferenciací spekter se prokázala jako nejefektivnější pro detekci frekvencí v celém spektru. Po vylepšení na vícenásobnou detekci a následného zpřesňování na základě porovnávání pozic vrcholů ve spektru bylo docíleno zpřesnění hodnot a snížení velikosti kolísání detekované výšky. Pro umožnění lepší detekce i při menších počtech vzorků na průběh modulační, byla učiněna změna ve zpracování signálu. Tato změna spočívá ve zpracování celého signálu odpovídajícím celému průběhu modulační. Díky tomuto byly i celkově zlepšeny výsledky detekce výšky.



Obrázek 4.9: Výsledek zpracování přistání diferenční metodou

Kapitola 5

Závěr

5.1 Zhodnocení výsledků

V první části této práce byly shrnuty metody pro radarové měření, popsány principy pro měření výšky a vysvětleno jakým způsobem probíhá přistání a vzlet letounu.

Sběr dat probíhal na letounu Aeroprakt A-22 ve dvou celodenních měřeních. Při každém měření byly nasbírány data ze 3 letů, tedy 3 přistání a 3 vzlety. Při druhém měření byly nahrány i data průletu nad letištěm. Dále byly radary testovány ve statických polohách, díky tomuto byly naměřeny referenční data a byly odhadnuty minimální měřitelné hodnoty. Pro detekci výšky letounu se ideálně hodí radar typu IVS-948 od firmy InnoSent. Tento radar je nejvhodnější, protože umožňuje až dvojnásobnou hloubku modulace oproti radarům KMC-1 a KMC-4. Tato hloubka modulace je vhodnější k detekcím v nižších výškách např. při letu nad zemí při přistání a vzletu.

Modul KMC-4 nebyl primárně použit pro detekci výšky ale ověření pod jakými úhly radary snímají frekvence ze kterých následně počítají výšku. Bylo zjištěno, že jisté kolísání výšky je přítomno v důsledku nestálého směru detekovaných signálů. Tato příčina však způsobuje kolísání opravdu zanedbatelné.

Pro implementaci algoritmu byla navržena metoda detekce diferenciací spekter, která prokázala nejlepší výsledky oproti ostatním metodám. Časová náročnost této metody byla při použití matlabu je 4.664 ms na jeden rámeček. Rychlost algoritmu po přepsání do C++ je až 10krát rychlejší. Jeden rámeček odpovídající celému průběhu trojúhelníkové modulace trvá 5.12 ms. Toto dokazuje že tento algoritmus je možné používat ke zpracování v reálném čase.

Výsledkem práce a implementace je C++ knihovna, která je vhodná pro nasazení do systému. Tato knihovna poskytuje metodu přímo pro výpočet výšky z úseku signálu, který odpovídá trojúhelníkovému průběhu modulace.

5.2 Další pokračování práce

Možným pokračováním této práce by bylo zaimplementování do HW modulu popsaného v sekci 3.1.2 a následný návrh a implementace systému pro signalizaci výšky. Tento systém by mohl být vyřešen např. jako posloupnost LED diod které by značily výšku.

Vzhledem k tomu, že se pilot musí při poslední fázi přistání (první fáze vzletu) soustředit na úkony související s přistáním resp. vzletem, jsou diody indikující výšku poměrně nepraktické pro tuto fázi letu. Možným řešením by byla akustická indikace přímo do sluchátek pilota. Tato indikace by mohla probíhat například krátkými tóny, kdy výška by byla indikována délkou rozestupu mezi nimi.

Dalším možným pokračováním práce je systém pro detekci překážek. Pokud pilot letí za snížené viditelnosti, bylo by výhodné detekovat jestli se pod letadlem neobjevila nějaká překážka nebo například pokud neletí směrem nějakému výběžku ze země. Toto rozšíření by šlo snadno vytvořit, jelikož radary použité při sběru dat dokáží indikovat výšku do 80 - 150 m.

Literatura

- [1] Christian Wolff: Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar (FM-CW Radar) [online]. 1998.
URL <<http://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html>>
- [2] Enochson, L.; Otnes, R.: *Programming and Analysis for Digital Time Series Data*. číslo sv. 3 in *Programming and Analysis for Digital Time Series Data, Shock and Vibration Information Center*, 1969, 140–147 s.
- [3] FAJKUS, M.: *Modulace signálu a jejich vliv na spektrum signálu*. [online]. Bakalářská práce, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2009 [cit. 2015-05-18].
URL <<http://theses.cz/id/x6twyo/>>
- [4] Frigo, M.; Johnson, S. G.: The Design and Implementation of FFTW3. *Proceedings of the IEEE*, ročník 93, č. 2, 2005: s. 216–231, special issue on “Program Generation, Optimization, and Platform Adaptation”.
- [5] Levanon, N.; Mozeson, E.: *Radar Signals*. Wiley, 2004, ISBN 9780471663072.
- [6] Marcela Fialková: Vzlet, let po okruhu a přistání [online]. 2004-7-21.
URL <<http://www.laazatec.cz/clanek450.html>>
- [7] Maršík, L.: *Algorithms for Signal Processing in FPGA*. Thesis statement, 2010.
- [8] Maršík, L.: *Accelerated and Embedded Radar Signal Processing Algorithms*. Thesis statement, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology, 2012-1-20.
- [9] SKOLNIK, M. I.: *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill, třetí vydání, Dec. 2002.
- [10] Stimson, G.: *Introduction to Airborne Radar*. Aerospace & Radar Systems, SciTech Pub., 1998, ISBN 9781891121012.
- [11] Černocký, H.: *Zpracování řečových signálů*. studijní opora, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology, 2012-12-6.