



**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

**MĚŘENÍ RYCHLOSTI VOZIDEL S POUŽITÍM RADARU**

SPEED MEASURING OF VEHICLES USING RADAR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. VLADIMÍR VLKOVIČ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. LUKÁŠ MARŠÍK**

BRNO 2017

**Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií**

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2016/2017

**Zadání diplomové práce**

Řešitel: **Vlkovič Vladimír, Bc.**

Obor: Počítačová grafika a multimédia

Téma: **Měření rychlosti vozidel s použitím radaru**  
**Speed Measuring of Vehicles Using Radar**

Kategorie: Zpracování signálů

**Pokyny:**

1. Nastudujte literaturu související se zpracováním radarového signálu a s metodami pro odhad rychlosti vozidel.
2. Po dohodě vytipujte algoritmus vhodný pro extrakci informace o rychlosti z radarových dat.
3. S využitím zvolené metody navrhnete detektor umožňující detekci vozidla včetně následné korekce změřené rychlosti.
4. Implementujte funkční program navržený v předchozím bodě.
5. Nasbírejte reálná data na zapůjčeném HW. Na těchto datech provedte sérii vhodných testů pro zjištění přesnosti a spolehlivosti systému.
6. Diskutujte dosažené výsledky a navrhnete možné pokračování práce.

**Literatura:**

- M. Skolnik: Radar Handbook, 3rd edition, McGraw-Hill Professional, 2008
- M. Skolnik: Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill Science, 3rd edition, 2002
- M. A. Richards: Fundamentals of Radar Signal Processing, 1st edition, McGraw-Hill, 2005
- B. R. Mahafza: Radar Signal Analysis and Processing Using MATLAB, Chapman and Hall, 2008

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1 až 3 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci dřívějších projektů (30 až 40% 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: **Maršík Lukáš, Ing.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2016

Datum odevzdání: 24. května 2017

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
Fakulta informačních technologií  
Ústav počítačové grafiky a multimédií  
612 56 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký  
vedoucí ústavu

## Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom a implementáciou aplikácie ktorá z radarových dát extrahuje informácie o rýchlosti vozidiel. Na radarové merania bol použitý radar s kontinuálnou vlnou. Dôraz sa kladie na zistenie uhlu priližujúceho sa vozidla a na korekciu rýchlosti na základe tohotu uhlu. Výsledný návrh bol implementovaný v prostredí Matlab. Vyhodnotenie úspešnosti implementovaného riešenia bolo vykonané na referenčných dátach.

## Abstract

This masters thesis is focused around the designing and implementation of an anpplication that can extract information on speed of vehicles from radar data. The radar measurements were done by using a continous wave radar. The emphasis is placed on the computation of the angle in which the car approaches the radar and on the speed correction based on this angle. The final design was implemented in Matlab. The evaluation of the implemented solution was done on reference data.

## Klíčové slová

Radar, meranie rýchlosti vozidiel, radar s kontinuálnou vlnou, Dopplerov jav, spracovanie signálu, kosínusový faktor.

## Keywords

Radar, vehicle speed measurement, continuous wave radar, Doppler effect, signal processing, cosine factor.

## Citácia

VLKOVIC, Vladimír. *Měření rychlosti vozidel s použitím radaru*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Maršík Lukáš.

# Měření rychlosti vozidel s použitím radaru

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Lukáša Maršíka. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....

Vladimír Vlkovič

22. mája 2017

## Podakovanie

Ďakujem vedúcemu práce, pánovi Ing. Lukášovi Maršíkovi, za vedenie mojej práce, cenné návrhy, rady a podnety.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2 Radary</b>	<b>3</b>
2.1 História . . . . .	4
2.2 Zloženie radaru . . . . .	5
2.3 Dopplerov jav . . . . .	6
2.4 Rozdelenie radarov podľa typu . . . . .	7
2.5 Radar s kontinuálnou vlnou . . . . .	8
2.6 Radarový modul K-MC4 . . . . .	11
<b>3 Spracovanie signálu z radaru</b>	<b>13</b>
3.1 Analógovo-digitálny prevod signálu . . . . .	13
3.2 Segmentácia signálu . . . . .	14
3.3 Frekvenčná analýza . . . . .	16
<b>4 Návrh</b>	<b>18</b>
4.1 Zpracovanie signálu . . . . .	19
4.2 Prahovanie a detekcia vozidiel . . . . .	20
4.3 Výpočet rýchlosti . . . . .	23
4.4 Korekcia rýchlosti . . . . .	23
<b>5 Implementácia</b>	<b>24</b>
<b>6 Testovanie a vyhodnotenie</b>	<b>26</b>
6.1 Testovanie . . . . .	26
6.2 Vyhodnotenie . . . . .	27
<b>7 Záver</b>	<b>29</b>
<b>Literatúra</b>	<b>30</b>
<b>Prílohy</b>	<b>31</b>
<b>A Výsledky testov</b>	<b>32</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Na bezpečnosť v cestnej premávke je už dlhodobo prikladaný veľký dôraz. Už dlhodobo funguje projekt *Road Safety* ktorú v celosvetovom meradle zastrešuje FIA a OSN. Cieľom tejto iniciatívy je znížiť počet smrteľných nehôd. Jednou z najčastejších príčin dopravných nehôd, často aj fatálnych, je nedodržovanie maximálnej povolenej rýchlosti. Meranie a kontrola dodržiavania maximálnej povolenej rýchlosti by nemala byť používaná len represívne a to pomocou vyberania pokút. Mala by slúžiť aj ako prevencia pomocou zobrazovania aktuálnej rýchlosti vozidla.

Radarové meranie rýchlosti patrí k dlhšie známym spôsobom merania rýchlosti. Radar funguje na princípe vysielania vysokofrekvenčného signálu ktorý sa čiastočne odráža od objektov pred radarom. Tieto odrazy sú radarom následne zachytené a ďalej spracované. Táto pôvodne vojenská technológia si postupom času našla cestu aj na uplatnenie v civilnom sektore. Svojou čoraz väčšou cenovou dostupnosťou sa táto technológia dostala do radarov v mestách a obciach ktoré upozorňujú vodičov na prekročenie maximálnej povolenej rýchlosti, takisto sa začala v hojnej miere objavovať v automobilovom sektore v podobe rôznych asistenčných systémov. Pri týchto systémoch sa ako veľmi výhodné ukázalo používanie radarov v súčinnosti s videokamerami. Používanie radarov sa stalo obľúbeným vďaka ich schopnosti fungovať v tme alebo za nepriaznivého počasia ako napríklad silný dážď, hmla alebo sneženie.

Cieľom tejto práce je správne detekovanie vozidiel a zmeranie rýchlosti vozidiel s jej adekvátnou korekciou. Korekcia rýchlosti je nutná z toho dôvodu, že presnosť nameranej rýchlosti klesá so zväčšujúcim sa uhlom natočenia radaru k ceste. Hlavný dôraz je kladený na získanie dát z radaru ktoré sú potrebné pre správnu korekciu nameranej rýchlosti.

V kapitole 2 je popísaná história, zloženie, rozdelenie a princíp fungovania radarov. Ďalej sú bližšie popísané radary s kontinuálnou vlnou ktoré sú v práci použité. Kapitola 3 obsahuje popis spracovania radarového signálu pomocou analógovo-digitálneho prevodu signálu, segmentácie signálu a popis rýchlej Fourierovej transformácie. Kapitola 4 popisuje návrh detektora a v kapitole 5 je krátky popis implementácie návrhu. V kapitole 6 je popísaný spôsob testovania a spísané vyhodnotenie výsledkov testov.

## Kapitola 2

# Radary

Slovo radar vychádza z anglického slovného spojenia „**R**adio **D**ection **A**nd **R**anging“. V slovenčine je taktiež používaný evivaletný výraz rádiolokátor. Radar je elektronické zariadenie, ktoré je schopné zistiť vzdialenosť, rýchlosť alebo smer objektu. Princíp radaru je založený na vysielaní elektromagnetických vln, ktoré sa od objektu čiastočne odrazia a radar je schopný ich zachytiť. Tieto vlny nie sú ovplyvnené počasím alebo tmou [9].

Rýchlosť šírenia elektromagnetického vlny vo vzduchu je konštantná a je rovná približne rýchlosti svetla. Konštantná rýchlosť umožňuje určiť vzdialenosť medzi objektami a radarom na základe omeškania medzi vyslaným signálom a prijatím odrazeného signálu. Množstvo odrazeného signálu závisí od vlastností materiálu objektu. Najväčšiu odrazivosť majú elektricky vodivé materiály ako napríklad kovy [9].

Počas obdobia 2. svetovej vojny zaznamenal radar a technológie s ním spojené prudký vývoj. V tomto období slúžil radar primárne na monitorovanie lietadiel vo vzdušnom priestore. Časom sa radarové technológie začali využívať aj v civilnom živote. Momentálne je radar využívaný vo veľkom množstve civilných aplikácií ako napríklad kontrola a riadenie letovej a lodnej prevádzky, meranie rýchlosti vozidiel a iné. Radar sa stal neodmysliteľnou súčasťou meteorológie kde sa používa pre zisťovanie polohy dažďových mrakov. V geológii je využívaný na mapovanie podložia[8]. Radarové technológie sú využívané v kozmickom výskume napríklad na snímanie povrchu planét[8]. Klesajúca cena urobila z radaru dostupnú technológiu ktorá prenikla do automobilového priemyslu vo forme rôznych asistenčných systémov.

## 2.1 História

Vynájdenie a vývoj radaru nie je možné pripísať žiadnemu jednotlivcovi, pretože znalosti týkajúce sa radaru sú súhrnom objavov niekoľkých vedcov. Bez týchto dielčích častí by nebolo možné radar skonštruovať. V roku 1865 škótsky fyzik James Clerk Maxwell prezentoval teóriu o existencii elektromagnetických vln. Tvrdil, že elektrické a magnetické polia sa pohybujú v priestore v tvare vln a rýchlosťou svetla. Dnes je táto teória známa pod názvom *Maxwellove rovnice*. Nemecký fyzik Heinrich Rudolf Hertz objavil v roku 1886 elektromagnetické vlny, čím potvrdil Maxwellovu teóriu. [9]

Nicola Tesla prezentoval v roku 1900 názor, že odraz elektromagnetických vln by mohol byť použitý na detekovanie pohybujúcich sa kovových predmetov. Christian Hulsmeyer si nechal v roku 1904 patentovať *telemobiloscope*. Tento prístroj bol prvým radarom a jeho test poukázal na použiteľnosť radaru [9].

Ďalším veľkým mílnikom bolo vynájdenie magnetrónu v roku 1921 americkým fyzikom Albertom Wallacom Hullom. Magnetrón je trubica ktorá slúži ako oscilátor mikrovlnného žiarenia. Pracuje na princípe ohýbania toku elektrónov pomocou magnetického poľa [9].

Albert H. Taylor a Leo C. Young lokalizujú drevenú loď za pomoci radaru v roku 1922. Prvé lokalizovanie lietadla sa podarilo v 1930 a zaslúžil sa zato Lawrence A. Hyland. V roku 1936 technici George F. Metcalf a William C. Hahn vyvinuli *Klystron*, ktorý sa stane dôležitou súčasťou radarov. Môže byť použitý ako zosilovač alebo ako trubica oscilátora [9] [8].

Počas 2. svetovej vojny dochádza k intenzívnemu vývoju na poli radarových technológií kvôli lokalizácii nepriateľských lietadiel. Po skončení vojny sa pracovalo na vylepšovaní radarových technológií a postupne sa radar začína viac využívať v civilnej oblasti. [9]

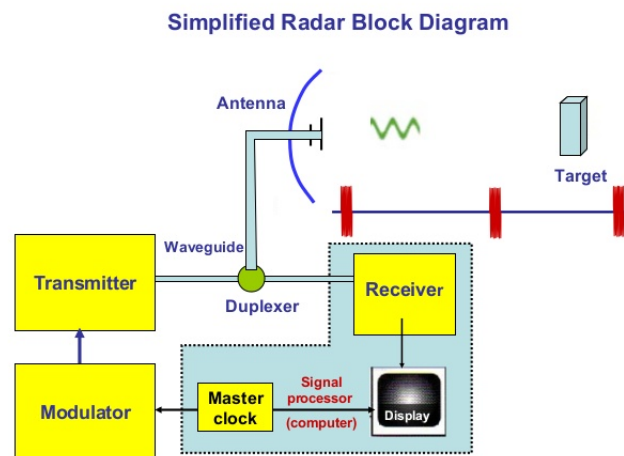


## 2.2 Zloženie radaru

Pre lepšie pochopenie princípu fungovania radaru je dôležité poznať jeho vnútornú štruktúru. Popíšeme si len základné komponenty radaru. Tieto komponenty sa nachádzajú v takmer každom radare, v závislosti od typu radaru môžu byť pridané špeciálne komponenty.

Medzi základné časti patria [8][9]:

- Vysielač (angl. Transmitter) - Produkuje krátke vysokovýkonné pulzy ktoré sú vysielané do priestoru pomocou antény.
- Prepínač (angl. Duplexer) - Zabezpečuje prepínanie medzi vysielačom a prijímačom aby bolo možné používať len jednu anténu. Prepínanie je potrebné pretože citlivý prijímač by mohol byť poškodený silným vysielaním. V radaroch s kontinuálnou vlnou sa duplexer väčšinou nevyskytuje pozri podkapitoly 2.5 2.6.
- Prijímač (angl. Receiver) - Zosilňuje slabý odrazený signál na takú úroveň aby ho bolo možné ďalej spracovať.
- Anténa (angl. Antenna) - Umožňuje vysielanie energie z vysielača do priestoru a zachytávanie odrazenej energie od objektu.
- Indikátor (angl. Indicator) - Mal by poskytovať kontinuálny, ľahko zrozumiteľný grafický obraz relatívnej polohy objektov. Pri niektorých typoch radarov nie je vyžadovaný.



Obr. 2.1: Blokový diagram radaru [4]

## 2.3 Dopplerov jav

Radary vysielajú elektromagnetické vlny s určitou frekvenciou. Táto frekvencia môže byť konštantná alebo premenná v čase, záleží od typu radaru. Objekty, ktoré sú statické, vzhľadom k radaru, odrážajú vlny vyslané radarom s rovnakou frekvenciou. Ak sa však objekt pohybuje frekvencia odrazených vln sa mení na základe smeru pohybu a rýchlosti objektu. Tento jav sa nazýva *Dopplerov jav*. Tieto zmeny frekvencie môžu byť vysvetlené nasledovne. Ak sa zdroj vln pohybuje smerom k pozorovateľovi, potom každá nasledujúca vlna je vyslaná z bližšieho miesta ako vlna predchádzajúca. Z toho vyplýva, že každá vlna dosiahne pozorovateľa v kratšom časovom úseku ako predchádzajúca. Tým pádom čas medzi príchodom po sebe nasledujúcich vln je redukovaný, čo vedie k zvýšeniu frekvencie pozri obr. 2.2. Pri pohybe zdroja vln od objektu dochádza k znižovaniu frekvencie.[7]

Vzťah pozorovanej frekvencie a vysielanej je daný nasledovne:

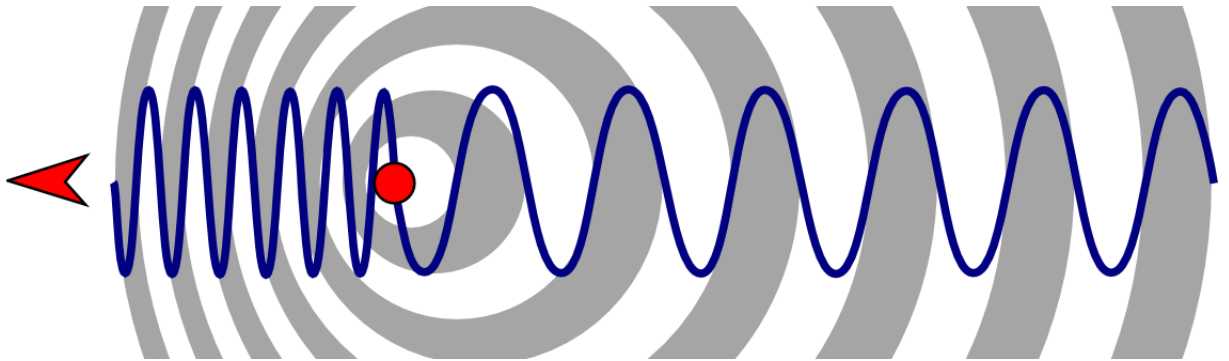
$$f = \left( \frac{c + v_r}{c + v_s} \right) f_0 \quad (2.1)$$

kde  $f$  je pozorovaná frekvencia,  $f_0$  je vysielaná frekvencia,  $c$  je rýchlosť šírenia elektromagnetickej vlny v prostredí,  $v_r$  je rýchlosť pozorovateľa (prijímača) a  $v_s$  je rýchlosť zdroja vln.

Musíme počítať s tým, že radar vysielá aj prijíma. Dopplerov jav tomto prípade vytvára pohybujúci sa objekt na ktorý dopadajú vlny o frekvencii  $f$ . Následne sa vlny odrazia od objektu, čím sa z objektu stáva vysielateľ o inej frekvencii. Celková zmena frekvencie je určená vzťahom[8]:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (2.2)$$

kde  $f_d$  je rozdiel medzi vysielanou a prijatou frekvenciou,  $v_r$  je rýchlosť objektu a  $\lambda$  je vlnová dĺžka signálu.



Obr. 2.2: Objekt sa pohybuje zprava do ľava. Pozorovatelia naľavo zaznamenajú zníženie frekvencie, pozorovatelia napravo zníženie.

## 2.4 Rozdelenie radarov podľa typu

Pomocou radarov je možné zistiť niekoľko typov informácií o objekte ako napríklad rýchlosť, vzdialenosť atď. V závislosti od toho aké informácie má radar poskytovať sa líšia požiadavky na funkčnosť a použitie technológií[9]. Podľa toho, či radar poskytuje obrazový výstup ich delíme na:

- **Zobrazovacie** – Tento typ radaru dokáže zobrazíť pozorovaný objekt alebo územie. Zobrazovanie radary sa použili na mapovanie povrchu Zeme, iných planét a pre kategorizáciu cieľov vo vojenských systémoch.[9]
- **Nezobrazovacie** – Zástupci týchto radarov sú výškomery a merače rýchlosti. Tieto radary merajú len jednu veličinu.

Podľa toho či radary spolupracujú s inými zariadeniami alebo nie ich delíme na:

- **Primárne** – Radar je aktívny, to znamená, že vysiela aj prijíma elektromagnetické vlny. Funguje na princípe vyslania vysokofrekvenčného elektromagnetického vlnenia následného zachytenia odrazeného vlnenia a jeho spracovania.[9]
- **Sekundárne** – Opäť sa jedná o aktívny radar avšak tentoraz je pre činnosť potrebná spolupráca s ďalším zariadením. V tomto prípade musí cieľ obsahovať zariadenie s názvom *traspoder* (transmitting responder) alebo tiež *odpovedač*. Traspoder prijme signál a následne pošle odpoveď. Výhodou tohoto systému je, že táto odpoveď obsahuje oveľa viac údajov ako pri primárnom radare ako napríklad výška objektu, identifikačný kód atď. Tento systém sa využíva pri riadení leteckej prevádzky.[9]

Radary je ďalej možné rozdeliť podľa priebehu vysiellaného signálu a to na:

- **Pulzné** – Funguje na princípe vyslania krátkych elektromagnetických signálov (pulzov). Po vyslaní pulzu sa radar prepne do pasívneho režimu kedy prijíma odrazené pulzy. Používa zvyčajne jednu anténu na prijímanie aj vysielenie. Omeškanie medzi vyslaným a prijatým pulzom sa použije na výpočet vzdialenosti objektu. Rýchlosť objektu sa počíta pomocou Dopplerovej frekvencie pozri podkapitolu 2.3. Využitie v leteckej prevádzke a v meteorologických radaroch.[8][9]
- **S kontinuálnou vlnou** (angl. continuous wave) – Vysielenie a prijímanie signálu prebieha nepretržite, z toho dôvodu je nutné použiť dvoch antén. Vzdialenosť objektu nie je možné merať pomocou omeškania signálu. Z tohto dôvodu sa používa technika frekvenčnej modulácie alebo fázového posunu. Tieto radary sa používajú na kratšie vzdialenosti a kde je treba nepretržité meranie.[9]

## 2.5 Radar s kontinuálnou vlnou

Radar vysiela neprerušovaný periodický signál o frekvencii  $f_{Tx}$ . Následne je zachytený signál  $f_{Rx}$ , ktorý má hodnotu:

$$f_{Rx} = f_{Tx} + f_d \quad (2.3)$$

kde  $f_d$  je Dopplerova frekvencia.

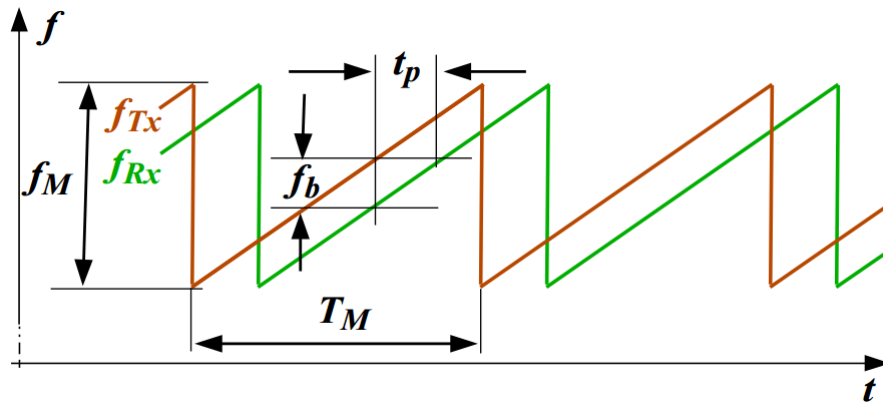
Radar s kontinuálnou vlnou bez modulácie sa dá použiť len na meranie rýchlosti. Na výstupe radaru je periodický signál ktorý vznikne odpočítaním prijatej frekvencie od odoslanej. Ak je objekt statický na výstupe nie je žiaden periodický signál. Tento periodický signál je popísaný pomocou funkcie kosínus. Táto funkcia je párna, čo znamená, že nie je možné určiť smer pohybu objektu. Radar preto obsahuje dva výstupy I a Q medzi ktorými je fázový posun  $\frac{\pi}{2}$  pre objekt pohybujúci sa k radaru a  $-\frac{\pi}{2}$  pre objekt pohybujúci sa od radaru[1].

Pre meranie vzdialenosti sa pri tomto radare musí použiť niektorá z techník frekvenčnej modulácie. Pri použití frekvenčnej modulácie sa Dopplerova frekvencia nedá zistiť priamo ale musí sa dopočítať. Najčastejšie používané techniky sú:

- **Pílová modulácia** – Frekvencia signálu sa mení lineárne. Najskôr sa frekvencia vysielaťného signálu lineárne zvyšuje a potom sa skokovo zníži. Na výstupe radaru je periodický signál nazývaný *Beat Frequency* pozri obr. 2.3. Jedná sa o rozdiel prijímanej a vysielaťnej frekvencie v čase  $t$ . Tento rozdiel je konštantný. Vzdialenosť sa počíta pomocou vzťahu[3]:

$$R = \frac{c_0}{2} \frac{f_b}{f_M} T_M \quad (2.4)$$

kde  $R$  je vzdialenosť objektu,  $c_0$  je rýchlosť svetla,  $f_b$  je beat frekvencia,  $f_M$  je hĺbka modulácie a  $T_M$  je perióda modulácie pozri obr. 2.3.



Obr. 2.3: Ukážka pílovej modulácie na stacionárnom objekte. Hnedá čiara je vysielaťný signál, zelená prijímaťný.[3]

- **Trojuholníková modulácia** – Frekvencia vysielaného signálu sa mení lineárne. Na rozdiel od pílovej modulácie pozri obr. 2.3 zostupná hrana klesá lineárne nie skokovo. Pri tejto modulácii je možné súčasne merať s vzdialenosťou aj rýchlosť za pomocou Dopplerovej frekvencie  $f_D$ [3]. Pri stacionárnom telese je beat frekvencia  $f_b$  konštantná. Ak sa teleso pohybuje rozlišujeme beat frekvenciu na vzostupnej hrane  $f_{b1}$  a zostupnej hrane  $f_{b2}$ . Dopplerova frekvencia  $f_D$  sa vypočíta[3]:

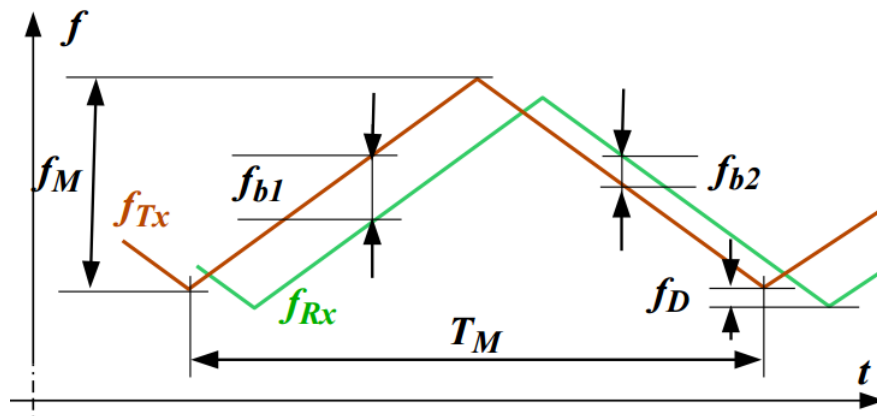
$$f_D = f_{b1} - f_{b2} \quad (2.5)$$

Počítanie vzdialenosti je obdobné ako pri vzťahu 2.4, len s malou zmenou[3]:

$$R = \frac{c_0}{2} \frac{f_b}{f_M} \frac{T_M}{2} \quad (2.6)$$

Nevýhodou tejto metódy je obmedzená maximálna vzdialenosť ktorej výpočet vychádza takisto z vzťahu 2.4 [3]:

$$R_{MAX} = \frac{c_0}{2} \frac{T_M}{2} \quad (2.7)$$

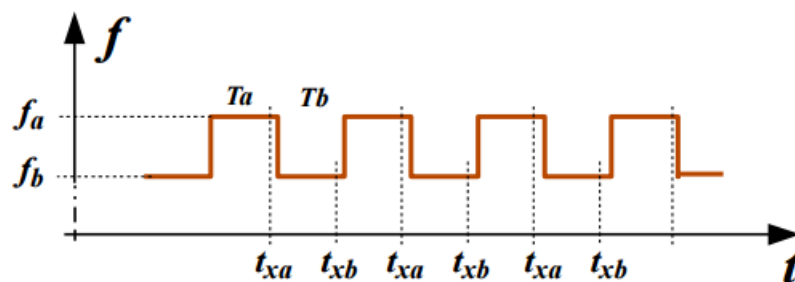


Obr. 2.4: Ukážka trojuholníkovej modulácie na pohybujúcom sa objekte. Hnedá čiara je vysielaný signál, zelená prijímaný.[3]

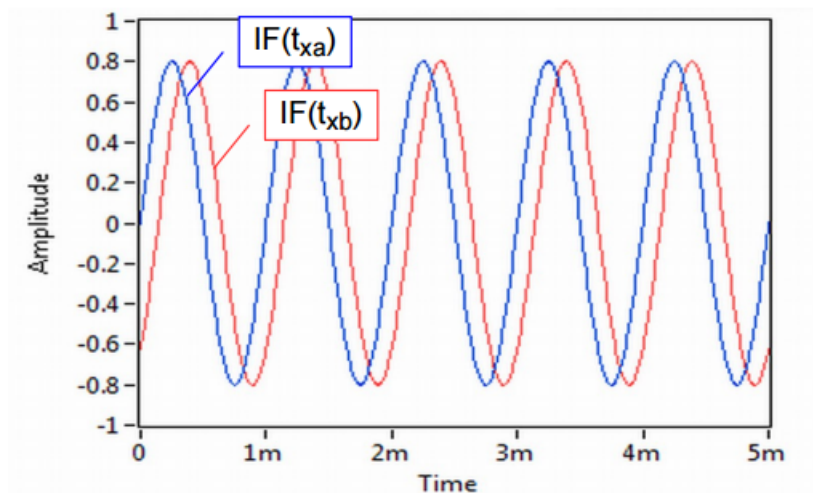
- **Frequency shift keying (FSK)** – Funguje na princípe periodických diskretných zmien frekvencie signálu (frekvencie  $f_a$  a  $f_b$ ). Vďaka malému kroku  $f_a - f_b$  bude Dopplerovská frekvencia takmer rovnaká len bude mať inú fázu pre obidve vyslané frekvencie pozri obr. 2.6. Pre meranie vzdialenosti sa využíva fázového rozdielu medzi týmito frekvenciami[3]:

$$R = \frac{c\Delta\phi}{4\pi(f_a - f_b)} \quad (2.8)$$

kde  $R$  je vzdialenosť,  $\Delta\phi$  je fázový posun.  $\phi$  môže nadubúdať hodnoty  $0^\circ$  až  $180^\circ$  a jeho znamienko určuje smer pohybu. FSK je možné použiť len na pohybujúce sa objekty, pretože tieto objekty majú Dopplerovskú frekvenciu. Výhodou je, že je možné detekovať viaceré objekty s rôznymi rýchlosťami.[3]



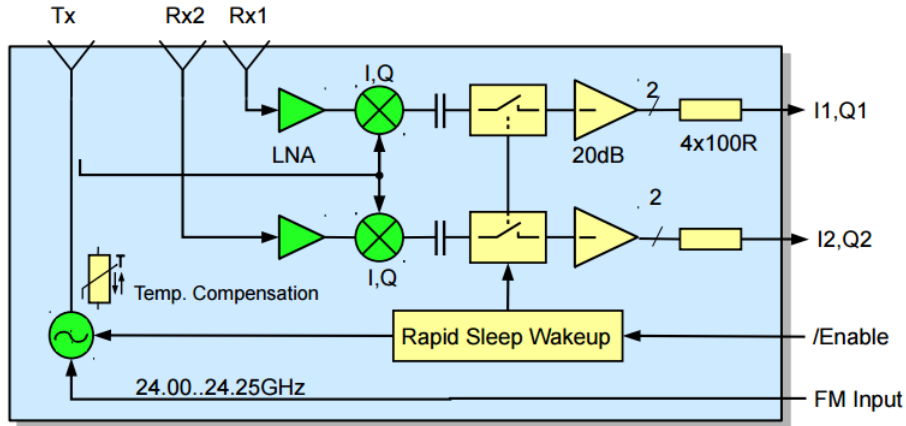
Obr. 2.5: FSK modulačná schéma  $t_{xa}$  a  $t_{xb}$  sú vzorkovacie body .[3]



Obr. 2.6: Výsledné Dopplerove frekvencie  $IF(t_{xa})$  a  $IF(t_{xb})$  sú výstupy pre frekvencie  $f_a$  a  $f_b$  .[3]

## 2.6 Radarový modul K-MC4

Pre meranie bude použitý modul K-MC4 od firmy RFbeam Microwave GmbH. Tento modul disponuje dvoma prijímacími anténami  $R_{x1}$  a  $R_{x2}$  pozri obr. 2.7. Vďaka tejto konfigurácii je možné merať uhol pohybujúcich sa objektov. Vysielač anténa  $T_x$  vysiela nepretržitý signál s frekvenciou 24.15 GHz.[2]



Obr. 2.7: Blokový diagram K-MC4.[2]

Pretože má radar dve antény tak jeho výstup tvoria 4 signály  $I1$  a  $Q1$  resp.  $I2$  a  $Q2$ . Z týchto dvojíc signálov je pred spracovaním signálu nutné vytvoriť komplexný signál, spôsobom :

$$complex_n = I_n + Q_n * i \quad (2.9)$$

kde  $n$  značí poradové číslo antény, našom prípade 1 a 2.

Vysielač rozsah antény radaru je  $30^\circ$  v horizontálnej rovine a  $12^\circ$  vo vertikálnej rovine [2]. Vzhľadom k osi radaru sú tieto hodnoty  $\pm 15^\circ$  v horizontálnej a  $\pm 6^\circ$  vo vertikálnej rovine.

Ak sa objekt nepohybuje na radar priamo ale pod nejakým uhlom tak dochádza ku skresleniu nameranej rýchlosti, jedná sa o *faktor kosínového uhla*. Keďže tento typ radaru poskytuje aj uhol pohybujúceho sa telesa, tak tento uhol môže byť použitý pri korekcii nameranej rýchlosti. Princíp zistenia uhlu spočíva v tom, že na každú anténu dopadá signál s posunutou fázou pozri obr. 2.8. Fáza je uhol ktorý zvierá imaginárna časť signálu a reálna časť. Na základe tohoto poznatku fázu vypočítame:

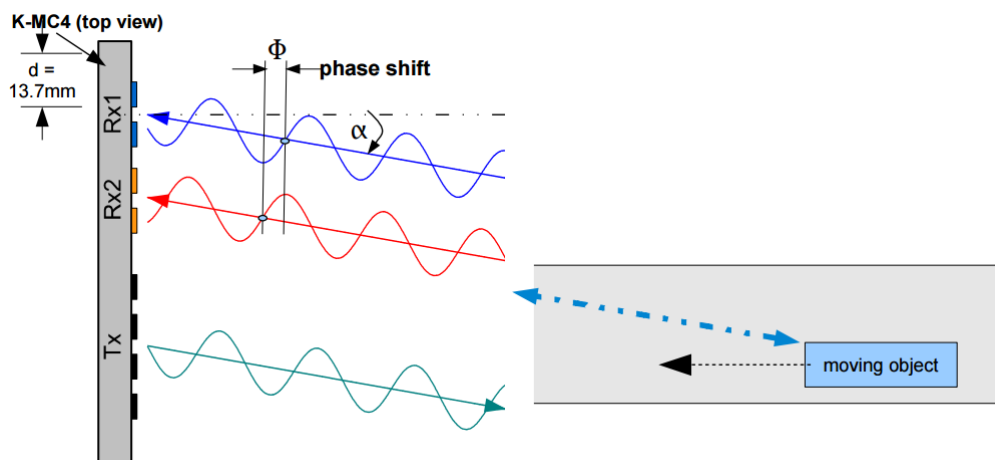
$$\beta = \tan \frac{Q_n}{I_n} \quad (2.10)$$

kde  $n$  značí  $n$ -tú frekvenciu zo signálu,  $Q$  imaginárna zložka a  $I$  reálna zložka frekvencie,  $\beta$  je fáza.

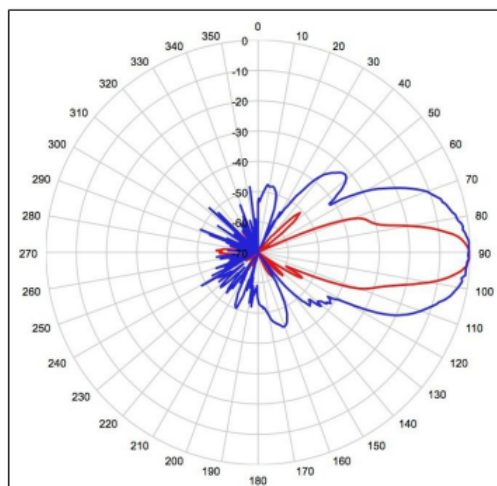
Uhol v stupňoch sa počíta z nasledujúceho vzťahu[2]:

$$\alpha = \frac{\phi}{k} \quad (2.11)$$

kde  $\alpha$  je vypočítaný uhol v stupňoch,  $\phi$  je fázový posun  $\beta_1 - \beta_2$  a  $k$  je konštanta s hodnotou 6.7.



Obr. 2.8: Ukažka fázového posunu signálu medzi prijímajúcimi anténami.[2]



Obr. 2.9: Diagram znázorňujúci citlivosť radaru v horizontálnej (modrej) rovine a vo vertikálnej (červenej) rovine.[2]



## Kapitola 3

# Spracovanie signálu z radaru

Výstup radaru je analógový signál, ktorý je potrebné zdigitalizovať pomocou A/D prevodníku. S digitalizáciou je spojené vzorkovanie a kvantovanie signálu z ktorých dostaneme pôvodný signál reprezentovaný ako postupnosť čísel. Následne sa signál rozdelí do rámcov. Zo signálu sa odstáni jednosmerná zložka a aplikuje sa okenná funkcia, aby boli vylepšené vlastnosti spracovaného signálu. Na takto upravený signál sa použije frekvenčná analýza. Výsledok frekvenčnej analýzy nám poskytuje informácie o jednotlivých frekvenciách ktoré sa nachádzajú v pôvodnom signále.

### 3.1 Analógovo-digitálny prevod signálu

Prevod analógového signálu na digitálny prebieha vzorkovaním a následne kvantovaním. Vzorkovanie je periodické meranie analógového signálu a kvantovaním sa namerané hodnoty uložia v digitálnej podobe.

Vzorkovanie je možné vysvetliť tak, že pôvodný signál je vynásobený periodickým sledom *Dirackových impulzov*. Dirackov impulz má nekonečnú výšku, nulovú šírku a jeho plocha alebo mocnosť je rovná 1. Po násobení dostaneme periodický sled Dirackových impulzov, ale s mocnosťami ktoré sú dané hodnotami pôvodného signálu vo vybraných bodoch[5]. Vzorkovaciu frekvenciu vypočítame podľa vzťahu:

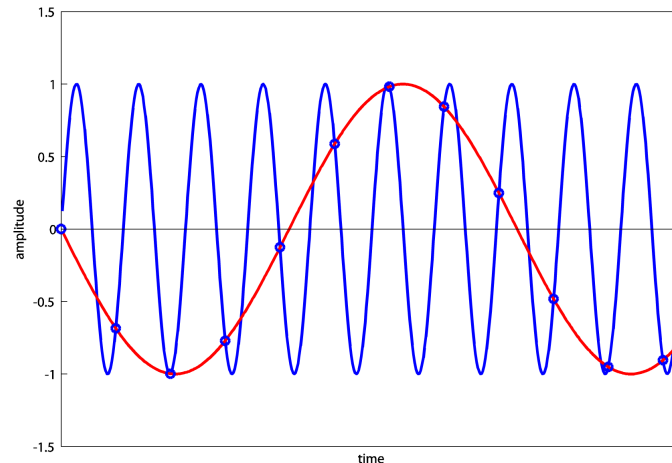
$$F_s = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

kde  $F_s$  je vzorkovacia frekvencia a  $T$  je vzorkovacia perióda.

Pri vzorkovaní je nutné dodržať *Nyquistov vzorkovací teorém*[5]:

$$F_s > 2f_{max} \quad (3.2)$$

kde  $f_{max}$  je maximálna frekvencia obsiahnutá v pôvodnom signále. Ak by táto podmienka nebola dodržaná došlo by k *aliasingu* pozri obr. 3.1. To znamená, že kópie pôvodného spektra sa prekrývajú a nie je možné zrekonštruovať pôvodný signál[5].



Obr. 3.1: Ukážka aliasingu. Modrý signál je pôvodný a červený je rekonštruovaný.

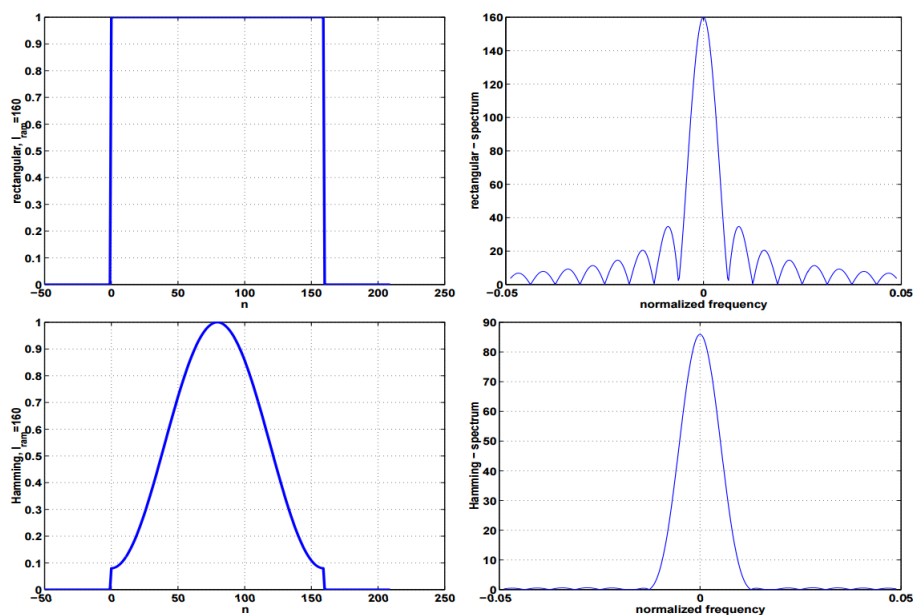
## 3.2 Segmentácia signálu

Signál sa rozdelí na menšie časti tzv. rámce. Rozdelenie na rámce sa využíva z dôvodu jednoduchšej spracovateľnosti pomocou frekvenčnej analýzy. Dĺžka rámcov by mala byť dostatočne malá aby bolo možné považovať signál na danom úseku za stacionárny, ale na druhej strane dostatočne veľká, aby bolo možné dostatočne presne odhadnúť požadované parametre[5]. Pre spracovanie pomocou rýchlej Fourierovej transformácie je vhodné zvoliť dĺžku rámca ako mocninu čísla dva. Pre zarovnanie rámca a zvýšenie rozlíšenia sa používa technika zvaná *zero-padding*. Pri tejto technike sa signál doplní nulami. Toto pridanie núl neprináša žiadnu dodatočnú informáciu, efekt dosiahnutý touto technikou je možné chápať ako interpoláciu výstupných hodnôt[6].

Prekrývanie rámcov sa využíva pre plynulejší prechod medzi hodnotami v spektre. Malé alebo žiadne prekrytie zaručuje rýchly časový posun a malé nároky na pamäť. Spektrá sa však môžu byť medzi jednotlivými rámcami odlišné, čo je vlastnosť nežiaduca. Veľké prekrytie rámcov zaručuje pomalý časový posun a plynulý priebeh spektra avšak nároky na pamäť sú veľké. Výsledné spektrá rámcov môžu byť príliš podobné, čo je neželané pri rozpoznávaní. Je nutné nájsť kompromis.[5]

Jednosmerná zložka neobsahuje žiadnu užitočnú informáciu, naopak môže byť pre ďalšie spracovanie rušivá [5]. Je preto potrebné ju odstrániť odpočítaním strednej hodnoty. Keďže frekvenčná analýza spracováva signál po rámcoch, jednosmerná zložka sa odstráni priamo z rámcov odpočítaním strednej hodnoty daného rámca.

Na takto upravený rámec je následne použitá okenná funkcia. Jedná sa o vynásobenie rámca okennou funkciou v časovej oblasti tzv. *windowing*, čo odpovedá konvolúcii spektra rámca so spektrom okennej funkcie [5]. Táto technika sa používa na zlepšenie vlastností pre frekvenčnú analýzu. Medzi najpoužívanejšie patria *pravouhlé okno* a *Hammingovo okno*. Pravouhlé okno je selektívnejšie (má užší centrálny lalok) pozri obr. 3.2, ale v spektre výsledného signálu sa vyskytnú väčšie vysokofrekvenčné komponenty [5]. Hammingovo okno utlmí signál na okrajoch vďaka čomu je signál „čistejší“, avšak je menej selektívne pozri obr. 3.2 [5].



Obr. 3.2: Porovnanie pravouhlého a Hammingovho okna v časovej a frekvenčnej oblasti.[5]

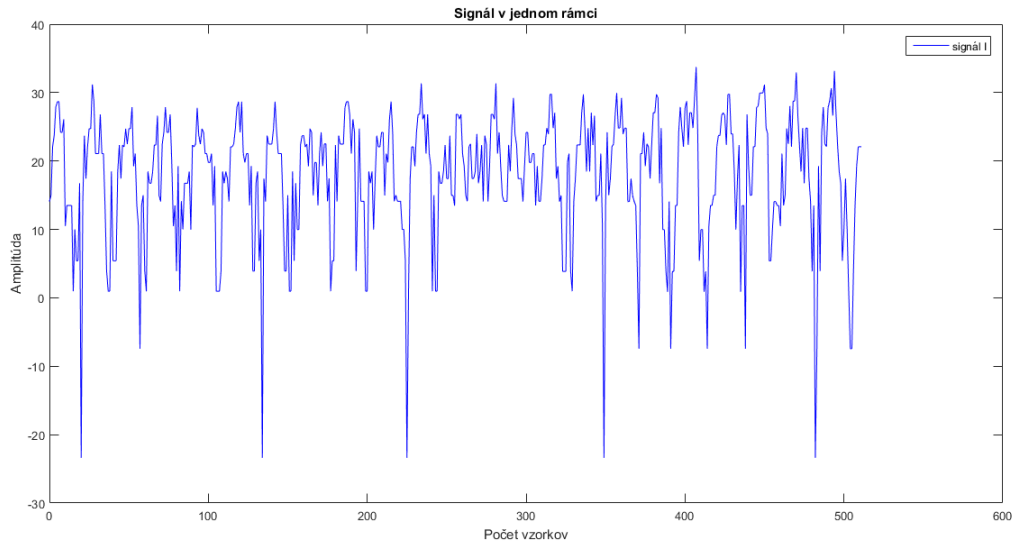
### 3.3 Frekvenčná analýza

Frekvenčná analýza signálov s diskretným časom sa počíta pomocou *diskrétnej Fourierovej transformácie* (DFT). DFT dostane na vstup postupnosť  $N$  hodnôt (vzorkov) rámca a výstupom DFT je  $N$  koeficientov. Tieto koeficienty reprezentujú zastúpenie frekvencií v signále tzv. frekvenčné spektrum[5][6]:

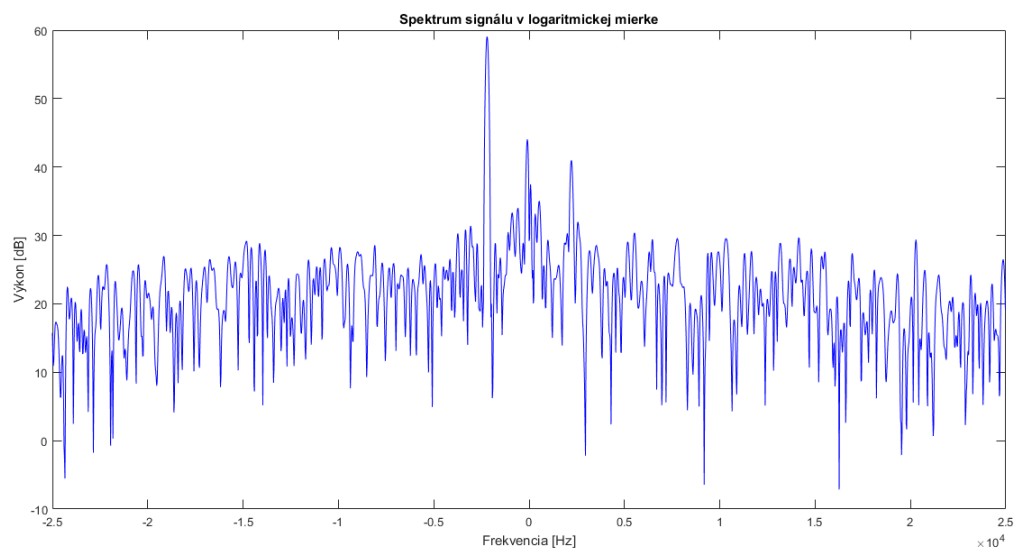
$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (3.3)$$

pre  $k = [0, N - 1]$ . Pre výpočet sa však častejšie používa *rýchla Fourierova transformácia* (FFT), jedná sa o výpočet DFT pre  $N = 2^k$ , kde  $k$  je celé číslo. FFT produkuje rovnaké hodnoty ako DFT, ide len o inú implementáciu. Zložitosť DFT je  $2N^2$  zatiaľ čo pri FFT je to  $N \log_2 N$  [6].

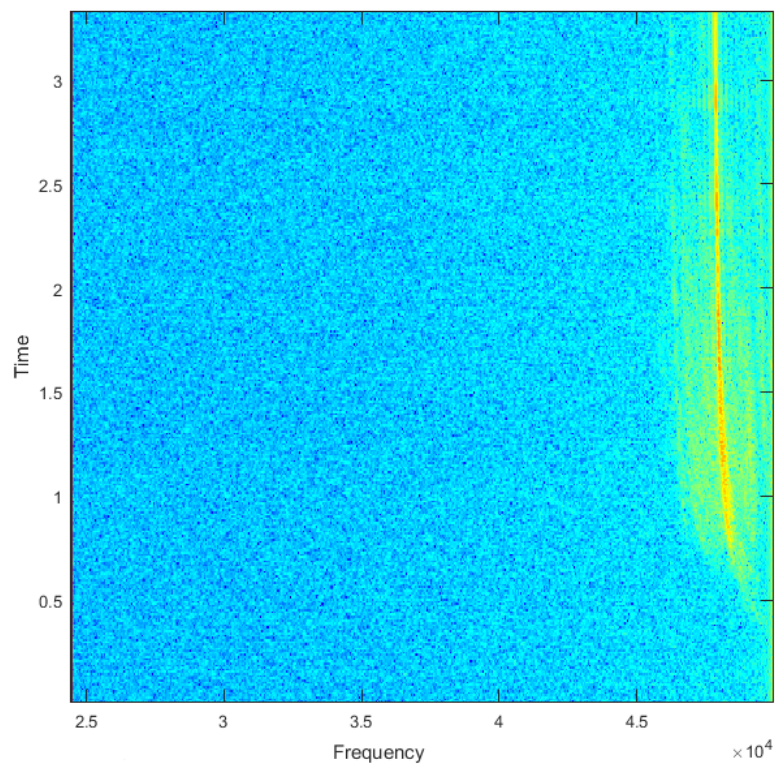
Frekvenčné rozlíšenie DFT udáva počet vstupných vzorkov. Zvýšením ich počtu sa zvyšuje frekvenčné rozlíšenie, no pridaním vzorkov signálu do rámca môže spôsobiť nestacionárnosť rámca. Využíva sa technika zero padding ktorá bola popísaná na začiatku podkapitoly 3.2. Na znázornenie priebehu spektra (presnejšie spektrálnej hustoty výkonu) v čase sa používa spektrogram[5] pozri obr. 3.5. Čím je farba červensšia tým je energia signálu vyššia.



Obr. 3.3: Ukážka signálu I v jednom rámci.



Obr. 3.4: Ukážka spektra pedošlého rámca z 3.3. Je možné zreteľne vidieť dominantnú frekvenciu.

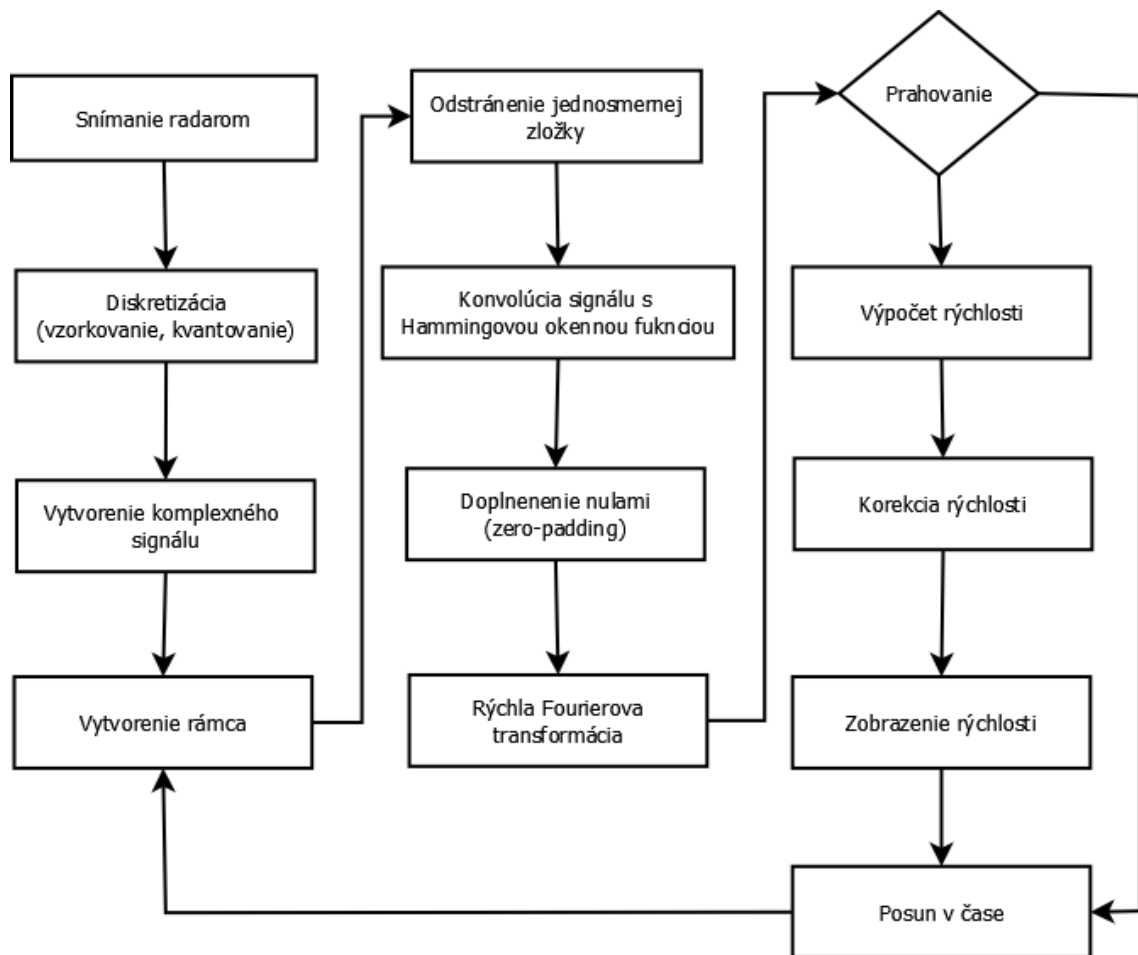


Obr. 3.5: Ukážka spektrogramu pri prejazde auta smerujúceho od radaru.

# Kapitola 4

## Návrh

Cieľom kapitoly je popísať návrh detektora na meranie rýchlosti vozidiel pomocou radarových modulov a využitia princípu Dopplerovho javu. V návrhu je treba počítať s tým, že potrebujeme merať rýchlosť vozidiel pohybujúcich sa smerom k radaru ako aj smerom od radaru. V kapitole sa popisujú jednotlivé časti návrhu zobrazeného v obr. 4.1 .

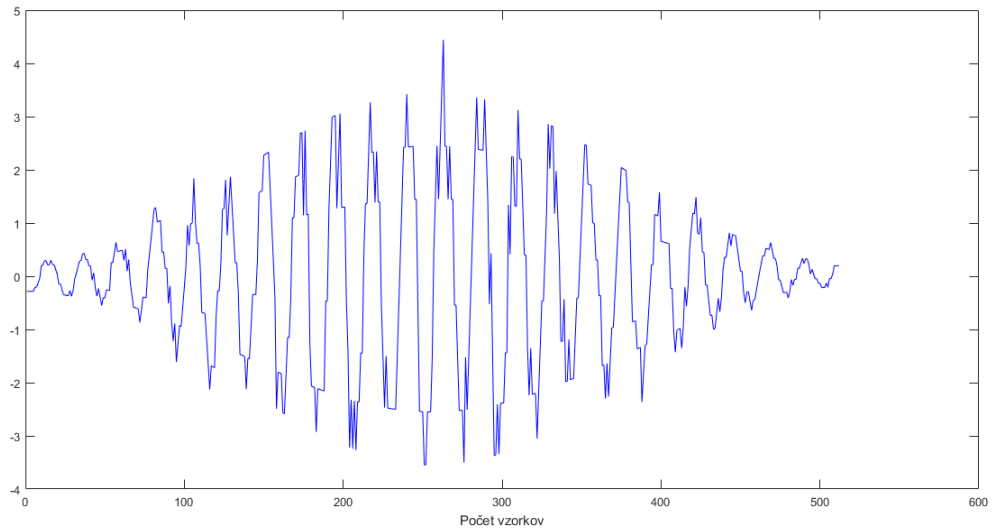


Obr. 4.1: Blokový diagram návrhu.

## 4.1 Zpracovanie signálu

Táto sekcia popisuje časť detektora ktorá je v obr. 4.1 zobrazená ako prvé dva stĺpce zľava. Na začiatku sa vytvorí komplexný signál spojením dát z kanálov I a Q pozri podkapitolu 2.6. Pri vytváraní rámca je nutné nastaviť veľkosť rámca a prekrytie rámcov pozri podkapitolu 3.2. Od veľkosti rámca závisí rozlíšenie v čase. Pri rozhodovaní sa o veľkosti rámca sa musí dodržať podmienka o minimálnej veľkosti rámca. Po vybratí vhodnej veľkosti a prekrytia rámcov je signál rozdelený na jednotlivé rámce.

Od každého rámca je následne odstránená jednosmerná zložka signálu pozri podkapitolu 3.2, ktorá nám neposkytuje žiadne relevantné informácie. Odstránenie jednosmernej zložky sa dosiahne odpočítaním strednej hodnoty rámca. Na takto upravené rámce je aplikovaná Hammingova okenná funkcia pozri podkapitolu 3.2, ktorá vyhladí krajné hodnoty rámcov a tak vytvorí lepšie spracovateľný signál pre frekvenčnú analýzu.

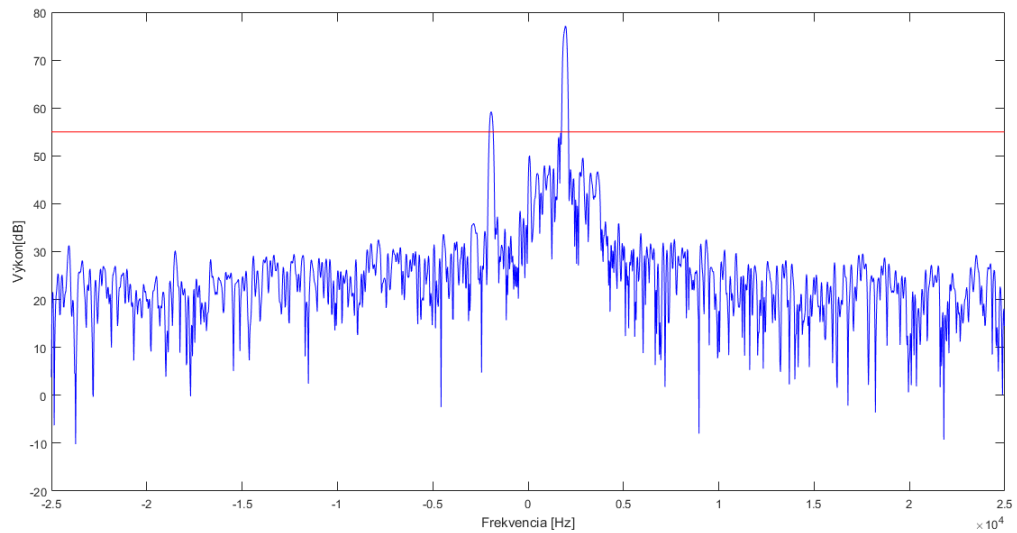


Obr. 4.2: Ukážka signálu po aplikácii hammingovej okennej funkcie.

Pre zvýšenie rozlíšenia sa použije metóda *zero-padding* pozri podkapitolu 3.2, teda metóda doplnenia núl. Tento spôsob nepridáva žiadnu novú informáciu, dôjde len k interpolácii spektra, nad ktorým sa vykoná rýchla Fourierova transformácia pozri podkapitolu 3.2. Výstupom transformácie je frekvenčné spektrum pozri obr. 3.4.

## 4.2 Prahovanie a detekcia vozidiel

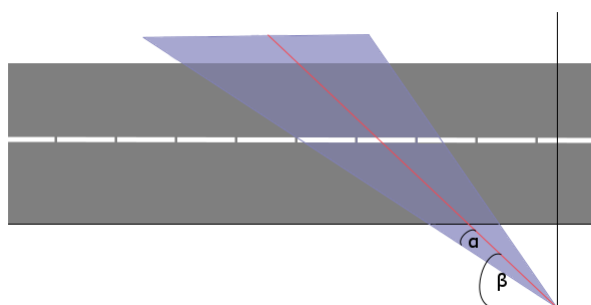
Pre každý rámec je nutné zistiť maximálnu frekvenciu z daného rámca. Podľa tejto frekvencie sa následne počíta rýchlosť. Maximálna frekvencia sa nájde aj v takom rámci v ktorom pred radarom neprechádzalo žiadne vozidlo. Z tohto faktu je možné odvodiť, že rýchlosť nemusí byť počítaná pre každý rámec. Z tohoto dôvodu je potrebné určiť prah, ktorý keď bude prekročený tak sa začne počítať rýchlosť aj uhol pod akým sa objekt k radaru pohybuje v danom rámci. Prekročenie prahu ale neznamená, že sa skutočne jedná o vozidlo, preto je nutné vytvoriť niekoľko podmienok pre určenie či sa jedná o vozidlo alebo nie. Určenie správnej prahovej hodnoty je dôležité pretože vozidlo zachytené radarom generuje parazitnú frekvenciu v opačnej strane spektra ako je jeho maximálna frekvencia a je nutné túto frekvenciu odfiltrovať pozri obr. 4.3. Táto parazitná frekvencia je pravdepodobne spôsobená nevyváženosťou zložiek I a Q.



Obr. 4.3: Spektrum vozidla pohybujúceho sa k radaru, kde je možné vidieť, že prah zachytáva aj parazitnú frekvenciu. Červená čiara označuje nastavený prah.



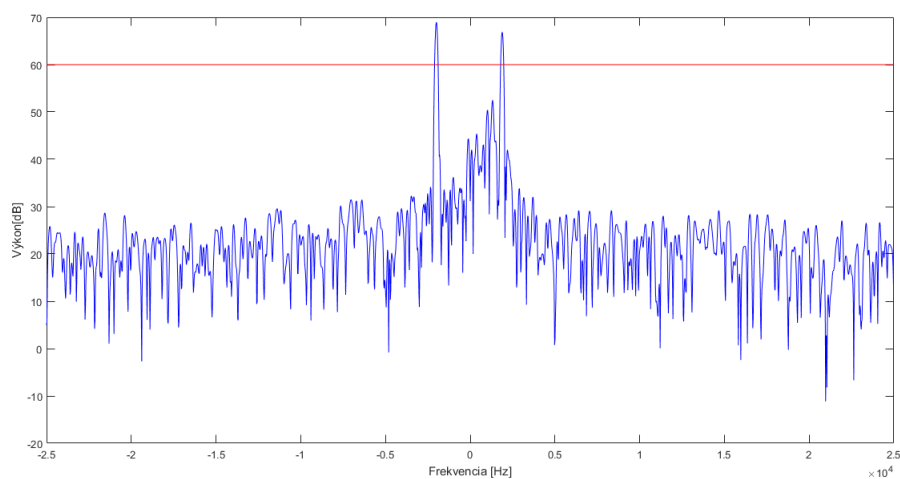
Za vozidlo budeme považovať objekt vtedy ak bola prekročená prahová hodnota v 20 po sebe idúcich rámcoch dovedy považujeme prekročenia prahu za náhodné. Správnu hodnotu prahu je nutné zistiť experimentálnym spôsobom v závislosti od nahrávky. Po prekročení tohto limitu musí byť splnených ešte niekoľko podmienok preto aby bol objekt detekovaný ako vozidlo. Uhol pohybujúceho sa objektu k radaru musí byť v intervale  $\pm 15^\circ$  pozri podkapitolu 2.6 od uhlu natočenia radaru k stredu vozovky ako na obr. 4.4. Táto podmienka zaručuje odfiltrovanie nežiadúcich odrazov od prostredia. Maximálna frekvencia v spektre získaného z druhej antény musí byť približne na pozícii na akej je maximálna frekvencia v spektre prvej antény. Výkonové spektrá oboch antén sú prakticky zhodné ako možno vidieť na obr. 4.6. Poslednou podmienkou je aby sa frekvencia z predošlých troch rámcov nelíšila o viac ako  $\pm 50$  Hz. Ak platia tieto podmienky potom sa jedná stále o to isté vozidlo pri porušení akejkoľvek podmienky sa detekcia tohoto vozidla ukončuje a začína sa odznova detekciou ďalšieho vozidla. Druhý prípad ukončenia detekcie súčasného vozidla je, že ak je vozidlo prehlásené za detekované a maximálna frekvencia neprekročí prah počas nasledujúcich 100 rámcov tak sa detekcia tohoto vozidla ukončí.



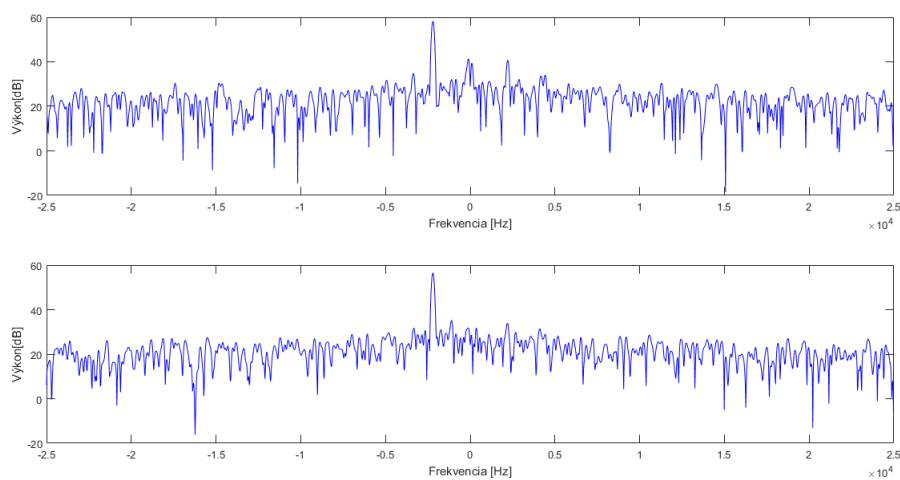
Obr. 4.4: Umiestnenie radaru vzhľadom k vozovke. Uhol  $\alpha$  značí rozsah radaru v horizontálnej osi od osi radaru a uhol  $\beta$  je uhol natočenia radaru vzhľadom k vozovke.

Pri snímaní radarom na ceste s obojsmernou premávkou môže nastať situácia, že v jednom okamihu radar zaznamená vozidlá pohybujúce sa oboma smermi. V tomto prípade ak by sa hľadala maximálna frekvencia v celom spektre tak by sme našli len jednu aj keď frekvencia druhého vozidla prekročila prah ako na obr. 4.5. Mohla by nastať situácia, že druhé vozidlo by bolo detektorom odignorované pretože síce prekročilo prah ale jeho frekvencia je menšia ako frekvencia prvého vozidla. Pre tento prípad je v spektre rámca rozdelené na ľavú a pravú časť. V oboch častiach rozdeleného spektra sa potom hľadá maximálna frekvencia čo by malo zlepšiť detekciu vozidiel vo vyššie spomínanom prípade. Detekcia vozidiel prebieha ako bolo popísané v tejto kapitole jedine tým rozdielom, že sa aplikuje na každú časť rozdeleného spektra zvlášť.

Smer vozidla je možné určiť podľa toho v ktorej časti spektrogramu sa nachádza. Ak sa vozidlo k radaru približuje jeho maximálna frekvencia sa nachádza v kladnej časti spektra, ak sa pohybuje od radaru tak sa nachádza v zápornej časti spektra.



Obr. 4.5: Ukážka spektra pri prechode vozidiel oboma smermi súčasne. Červená čiara označuje nastavený prah.



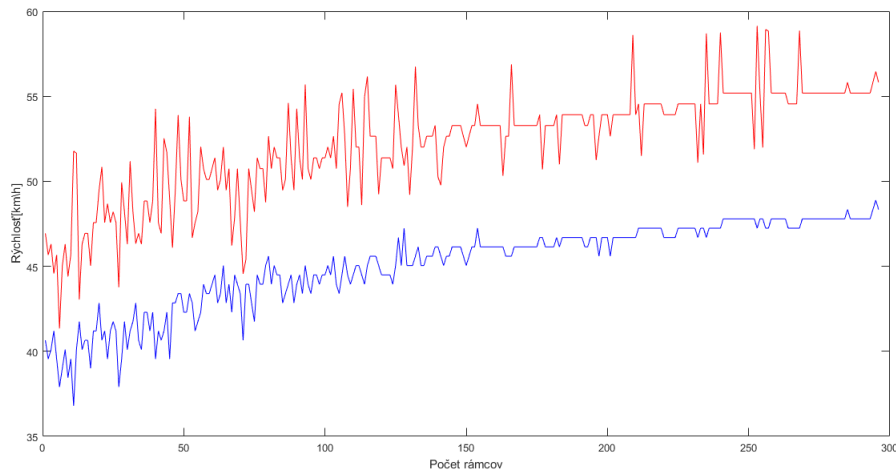
Obr. 4.6: Prvé zhora je spektrum získané z prvej antény, pod ním je spektrum získané z druhej antény. Výkonové spektrá sú prakticky zhodné.

### 4.3 Výpočet rýchlosti

Maximálnu frekvenciu získanu z jednotlivých častí spektra rámca použijeme na výpočet rýchlosti pomocou výpočtu odvodeného zo vzťahu 2.1. Keďže sa vozidlo pohybuje pred radarom dlhšiu dobu ako jeden rámec je potrebné zo všetkých rámcov v ktorých bolo vozidlo detekované získať rýchlosť a následne vypočítať konečnú hodnotu. Výsledná rýchlosť sa bude počítat ako aritmetický priemer rýchlostí vypočítaných z rámcov v ktorých bolo vozidlo detekované. Rýchlosť je možné počítat ako priemer rýchlostí rámcov z toho dôvodu, že časový rozdiel medzi rámcami je tak malý, že pri normálnych podmienkach nie je fyzikálne možné aby bol rozdiel v rýchlostiach v jednotlivých rámcoch extrémne veľký.

### 4.4 Korekcia rýchlosti

Rýchlosť sa koriguje pomocou redukcie faktoru kosínového uhla pozri podkapitolu 2.6. V tejto časti sa spresňuje nameraná rýchlosť objektov ktoré sa nepohybujú po kolmej ose smerom k alebo smerom od radaru. Uhol je možné detekovať len pomocou radaru ktorý disponuje dvomi anténami. Je nutné získať dáta z druhej antény. Pre tieto dáta sa vykoná spracovanie signálu ako bolo popísané vyššie. Následne sa nájde maximálna frekvencia vo frekvenčnom spektre a vypočíta sa uhol podľa vzťahu 2.10. Tento uhol sa obdobným spôsobom vypočíta pre dáta z prvej antény a vypočíta sa ich rozdiel. Výsledný uhol je vypočítaný vzťahom 2.11. Tento uhol nemusí spadať do intervalu  $< -\pi, \pi >$  potom je však nutné tento uhol upraviť tak aby do tohto intervalu spadal. Následne k tomuto vypočítanému uhlu je ešte nutné pripočítať uhol ktorý zvierá osa radaru s vozovkou pozri obr. 2.9, pretože uhol vypočítaný vzťahom 2.11 je uhol ktorý zvierá vozidlo s osou radaru. Potom sa vypočítaná rýchlosť podelí kosínusom výsledného uhla ktorý sme vypočítali. Výsledkom je reálna rýchlosť objektu.



Obr. 4.7: Ukážka porovnania rýchlosti vozidla s korekciou(červená) a bez korekcie(modrá). Radar bol k vozovke nasmerovaný pod uhlom  $30^\circ$ .

## Kapitola 5

# Implementácia

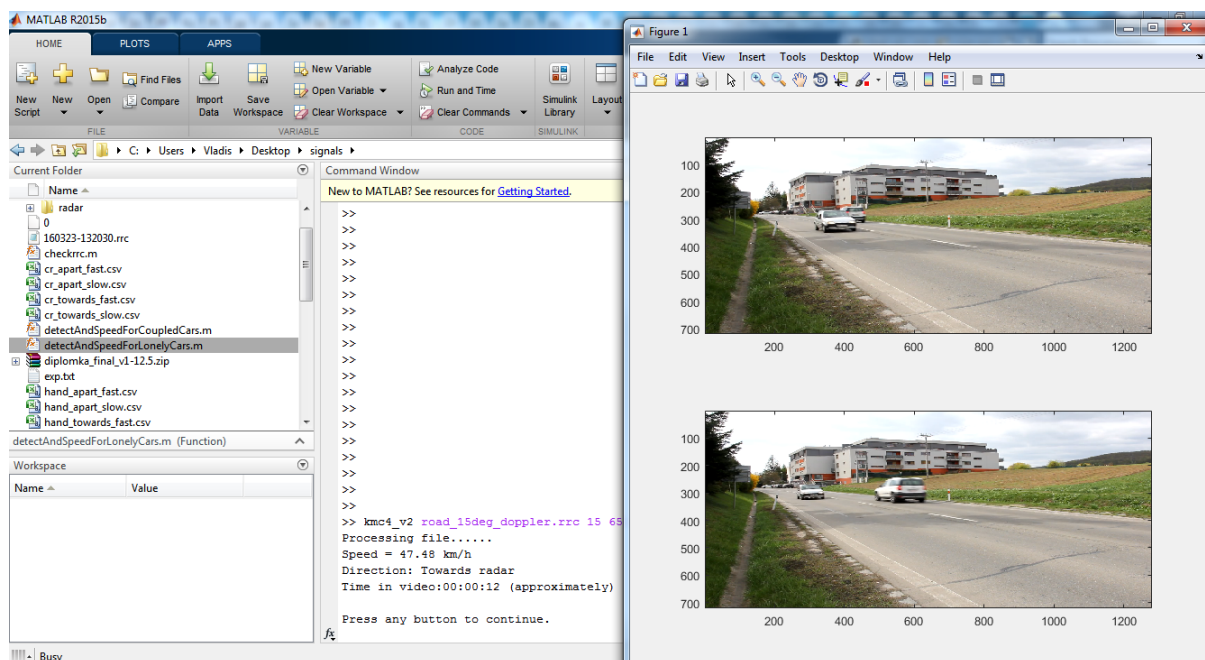
Riešenie bolo implementované ako skript do programu Matlab. Radarové dáta sú načítavané zo súborov typu RRC, ktoré boli získané na zapožičanom radare. Načítavanie a rozdeľovanie signálu do rámcov zabezpečuje skript ktorý poskytol vedúci práce. Ďalším vstupom je video ktoré bolo zosynchronizované spolu s nahrávaním dát. Na začiatku programu sú inicializované konštanty ako vysielacia frekvencia radaru, vlnová dĺžka vysielanej vlny atď. Program pracuje v cykle pokým mu načítací skript posiela rámce resp. až do konca RRC súboru. Ak program zaznamenal auto a ukončil jeho detekciu tak vypíše jeho priemernú rýchlosť, smer pohybu a čas kedy sa približne nachádza vo videu. Zároveň sa zobrazia dva obrázky vyňaté z videa pozri obr. 5.1. Prvý obrázok zobrazí vozidlo zhruba v polovici času keď bolo vozidlo detekované. Druhý obrázok zobrazuje vozidlo na začiatku detekcie. Implementované týmto spôsobom je to z dôvodu, aby sa predišlo prípadným zákrytom od vozidiel idúcich v protismere.

Program umožňuje prehliadanie súboru ručne tak, že zobrazí aj obrázky auta a čaká na používateľa aby mohol pokrčovať v spracovávaní súboru. Druhá možnosť je spustiť program len s výpisom do súboru. V súbore budú uvedené rovnaké informácie ako boli popísané v prvom odstavci.

Pri implementácii bolo využitých niekoľko Matlab funkcií. Pri odstraňovaní jednosmernej zložky bola použitá funkcia `mean()`, vďaka ktorej sa vypočítala stredná hodnota rámca ktorá bola následne od rámca odpočítaná. Na vygenerovanie hammingovej okennej funkcie bola využitá funkcia `hamming()`. Funkcia `fft()` sa využila na výpočet rýchlej fourierovej transformácie kde vstupom bol signál po odtránení jednosmernej zložky, aplikácii hammingovho okna a rozšírením nulami. Fázový posun medzi signálmi sa vypočítaval pomocou funkcie `angle()`.

Po rozbalení súboru sa vytvorí adresárová štruktúra ktorú je nutné pridať do systémovej cesty pre Matlab. Program sa spustí ako klasický Matlab skript. Skript má názov `kmc4_v2` a má 6 parametrov:

- Cesta k súboru RRC
- Uhol natočenia radaru k vozovke v stupňoch
- Prah pre detekciu v decibeloch
- Cesta k videu
- Názov výstupného súboru
- Prepínač len pre vypisovanie do súboru - 0 so zobrazením obrázkov, 1 len výpis do súboru



Obr. 5.1: Ukážka programu.

## Kapitola 6

# Testovanie a vyhodnotenie

Kapitola sa zameriava na otestovanie implementovaného riešenia. Vyhodnocovanie bude prebiehať na troch nahrávkach radarových dát ktoré zachytávajú obojsmernú premávku. Tieto nahrávky boli zachytené za pomoci vedúceho práce a radar je v nich k vozovke natočený v uhloch  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  a  $45^\circ$ . Výsledky implementovanej aplikácie sú porovnané s referenčnými výsledkami ktoré poskytol vedúci práce.

### 6.1 Testovanie

Testovanie detektora vozidiel bolo uskutočnené na všetkých troch nahrávkach. Boli skúšané rôzne nastavenia prahov pre detekciu. Testovanie sa zamieravalo nato, či boli detekované všetky vozidlá, či nenastla dvojnásobná detekcia vozidla alebo nedošlo k rozdeleniu dlhších vozidiel na viac vozidiel.

Testovanie merania rýchlosti bolo uskutočnené na dvoch nahrávkach pre radar natočený k vozovke o  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  a  $45^\circ$ . Referenčné dáta boli poskytnuté k vozidlám ktoré smerovali k radaru, preto sú testy vykonané len na týchto vozidlách. Testy boli vykonané z rôznymi nastaveniami veľkosti rámcov a prekrytia rámcov a zero-paddingu. Nastavenia pre rámce sú uvedené v tabuľke. [6.1](#)

Varianta nastavenia	Veľkosť rámca	Prekrytie	Veľkosť po zero-padding
1	256	128	1024
2	512	256	2048
3	256	128	512

Tabuľka 6.1: Parametre nastavenia rámcov pre testovanie

Pri testovaní bola zistená veľmi veľká citlivosť aplikácie na hodnotu prahu. Pri každej úprave parametrov rámca musel byť upravený aj prah. Následne dochádzalo k situácii kedy detektor rozdelil dlhšie vozidlá na viacero vozidiel. V tomto prípade bola braná v úvahu posledná nameraná rýchlosť. Výsledky možno vidieť v tabuľke [A.1](#).

## 6.2 Vyhodnotenie

Testovaním detekcie vozidiel bola zistená veľmi veľká citlivosť na zmenu detekčného prahu v závislosti od nahrávky a nastavení pre tvorbu rámcov. Optimálne nastavenie prahu sa pohybuje v intervale  $< 55, 65 >$  decibelov.

Pri hodnotách nižších dochádza k výraznému rozdeľovaniu dlhších vozidiel a takisto aj k rozdeľovaniu vozidiel typu SUV a podobných. Zároveň dochádza veľmi často k tomu, že sú parazitné frekvencie identifikované ako vozidlo pohybujúce sa v opačnom smere pozri obr. 4.3.

Pri hodnotách ktoré ten prah prekračujú je síce potlačené rozdeľovanie dlhších vozidiel ale na druhej strane dochádza k nedetekovaniu malých prípadne stredne veľkých vozidiel. V špeciálnych prípadoch môže nastať dvojité detekcia vozidla v tom prípade ak je vozidlo určitý čas zakryté veľkým vozidlom prechádzajúcim v opačnom smere pozri obr. 6.1. Toto je možné vysvetliť tým, že aplikácia detekuje vozidlo ešte predtým než je zakryté iným vozidlom no keďže vďaka zákrytu vozidla nemá o ňom žiadnu informáciu tak ukončí jeho detekciu. Akonáhle sa vozidlo dostane zo zákrytu iného vozidla tak aplikácia ho zachytí a považuje ho za nové vozidlo.



Obr. 6.1: Ukážka situácie kedy môže prísť k dvojitej detekcii vozidla.

Ak je nastavenie prahu v zadanom intervale detekcia osamotených vozidiel funguje v každom smere spoľahlivo. Detekcia vozidiel idúcich za sebou v jednom pruhu funguje do určitej vzdialenosti vozidiel medzi sebou. Ak je vozidlo príliš blízko vozidla pred ním, môže dôjsť k nezachyteniu vozidla. Detekcia vozidiel idúcich v oboch smeroch naraz funguje spoľahlivo vďaka rozdeleniu spektra na časť pre vozidlá smerujúce k a od radaru. Problém nastáva pri vyššie popísanom probléme zákrytu.

Hodnota prahu pri testovaní presnosti rýchlosti bola upravovaná pre každý súbor a tiež bola upravovaná pri zmene parametrov rámcov. Tieto úpravy prahu boli učené z dôvodu aby bolo detekované korektné množstvo vozidiel.

Pri testovaní zo súboru v ktorom bol radar natočený o  $15^\circ$  bola najlepšia presnosť dosiahnutá variatov číslo 2 (6.1) kedy sa okrem dvoch prípadov pohybovala odchýlka od referenčného riešenia približne o  $\pm 2$  km/h. Ostatné dva varianty takisto okrem dvoch prípadov preukázali akceptovateľnú odchýlku  $\pm 3$  resp.  $\pm 4$  km/h. Výsledky sú uvedené v tabuľke A.1 v prílohe A.

Výsledky testov so súborom v ktorom je radar natočený o  $45^\circ$  boli veľmi nekonzistentné. Pri niektorých vozidlách došlo k odchýlkam až o 10 km/h naopak pri iných boli výsledky v akceptovateľnom rozmedzí  $\pm 3$  km/h. Ani jedna varianta nastavení pre vytváranie rámcov nevykázala uspokojivé výsledky. Nie je preto možné určiť variantu ktorá by bola v tomto prípade najlepšia. Výsledky sú uvedené v tabuľke A.2 v prílohe A.

S prihliadnutím k výsledkom z prvého testovacieho súboru je možné usúdiť, že pravdepodobne najlepším riešením nastavením pre tvorbu rámcov je dĺžka rámca 512 vzorkov, prekrytie 256 vzorkov a veľkosť rámca po zero-padding 2048 rámcov pri prahu nastavenom na 60 decibelov. Výsledky z prvého testu poukazujú na správne smerovanie návrhu aplikácie. Avšak nie príliš uspokojivé výsledky z druhého testu naznačujú, že sa pravdepodobne jedná o chybu pri detekovaní vozidiel kedy nebolo získaných dostatok vypočítaných rýchlostí na správne určenie konečnej rýchlosti alebo sa môže jednať o nepresne zmeraný uhol natočenia radaru k ceste.



# Kapitola 7

## Záver

Cieľom práce bolo navrhnuť detektor ktorý bude schopný z radarových dát, ktoré boli namerané pod určitým uhlom, detekovať vozidlá a vypočítať ich rýchlosť.

V prvej kapitole práce je rozobratá teória spracovania signálu. Následne je dopodrobna popísaný návrh detektora ktorý umožní detekciu vozidiel a zmeranie ich rýchlosti s príslušnou korekciou. Kapitola 5 popisuje implementáciu navrhnutého detektora v prostredí Matlab. V poslednej kapitole boli vykonané testy na dátach ktoré boli nazbierané snímaním reálnej premávky. Tieto testy boli vyhodnotené porovnaním s referenčnými dátami a boli diskutované ich výsledky.

Testovaním bolo zistené spoľahlivé detekovanie vozidiel v oboch smeroch. Správne detekovanie vozidiel v oboch smeroch považujem za pozitívum aplikácie pretože rozlíšenie parazitnej frekvencie a súčasne prechádzajúceho vozidla môže byť v niektorých prípadoch ťažké. Veľké vozidlá ako napr. kamióny spôsobovali problémy v tom ohľade, že ich detektor rozdelil na viacero vozidiel. Zároveň bola zistená veľmi veľká citlivosť detekcie na zmenu prahu. Ako negatívum by sa dalo označiť experimentálne určenie optimálneho prahu pre každú nahrávku zvlášť. Bolo overené, že sa rýchlosť pri prvej testovacej nahrávke líši od referenčných dát v akceptovateľnej miere  $\pm 3$  km/h. Pri druhej nahrávke bola zistená značná nekozistentnosť výsledkov v porovnaní s referenčnými výsledkami. Je to spôsobené pravdepodobne nedokonalosťou detektora vozidiel alebo nepresným natočením radaru k vozovke.

Ako celok táto práca potvrdila možnosť merania rýchlosti vozidiel pod určitým uhlom. Zároveň potvrdila, že je možné identifikovať vozidlá len na základe ich radarového odrazu.

Ako pokračovanie práce navrhujem vylepšenie samotného detektora vozidiel aby mal konzistentnejšie výsledky z rôznych nahrávok. Ďalej by som navrhoval rozšíriť aplikáciu o meranie rýchlosti v reálnom čase.

# Literatúra

- [1] RFbeam Microwave GmbH: *K-MC1 RADAR TRANSCEIVER* [online]. [cit. 2016-12-8].  
URL [https://www.rfbeam.ch/files/products/15/downloads/Datasheet\\_K-MC1.pdf](https://www.rfbeam.ch/files/products/15/downloads/Datasheet_K-MC1.pdf)
- [2] RFbeam Microwave GmbH: *K-MC4 MONOPULSE RADAR TRANSCEIVER* [online].  
[cit. 2016-12-8].  
URL [https://www.rfbeam.ch/files/products/18/downloads/Datasheet\\_K-MC4.pdf](https://www.rfbeam.ch/files/products/18/downloads/Datasheet_K-MC4.pdf)
- [3] RFbeam Microwave GmbH: *ST200 Radar Evaluation System* [online]. [cit. 2016-12-8].  
URL  
[https://www.rfbeam.ch/files/products/35/downloads/UserManual\\_ST200.pdf](https://www.rfbeam.ch/files/products/35/downloads/UserManual_ST200.pdf)
- [4] Slide Player [online]. [cit. 2016-12-8].  
URL [http://images.slideplayer.com/14/4310231/slides/slide\\_1.jpg](http://images.slideplayer.com/14/4310231/slides/slide_1.jpg)
- [5] Černocký, J.: *Zpracování řečových signálů, studijní opora*. FIT VUT v Brně, 2006.
- [6] Černocký, J.: *Signály a systémy, studijné materiály*. FIT VUT v Brně, 2015.
- [7] Petrescu, F. I.: *A New Doppler Effect*. Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2012,  
ISBN 978-3-8482-2990-1.
- [8] Skolnik, M.: *Radar Handbook*. McGraw-Hill, New York, 3. vydanie, 2008, ISBN  
978-0-07-148547-0.
- [9] Wolff, C.: Radar Tutorial [online]. [cit. 2016-12-1].  
URL <http://www.radartutorial.eu/>

# Prílohy

# Príloha A

## Výsledky testov

Číslo vozidla	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Referencia
1	46.06	47.48	47.64	46.1
2	59.05	57.88	58.06	63.3
3	55.61	55.93	55.93	55.0
4	43.88	44.34	43.34	43.3
5	55.91	56.32	51.42	56.5
6	47.36	46.88	48.59	45.0
7	42.19	40.07	44.01	41.2
8	46.89	45.96	47.78	47.2
9	52.72	52.41	54.02	53.2
10	58.52	57.90	57.43	58.0
11	48.98	49.28	52.6	50.5
12	53.14	54.51	53.8	52.2
13	49.42	49.49	49.91	49.3
14	44.49	44.37	44.78	42.3
15	54.26	54.3	53.88	56.6
16	48.07	47.99	49.85	45.6
17	51.23	50.98	48.2	51.9
18	62.68	59.77	62.69	65.7
19	38.7	38.32	39.72	38.4
20	46.54	51.42	47.97	51.8

Tabuľka A.1: Výsledky pre testovanie pre dáta s 15°, uvedené hodnoty sú v km/h.

Číslo vozidla	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Referencia
1	61.33	58.67	65.83	52.3
2	59.23	69.32	76.86	58.0
3	44.05	50.1	44.63	48.8
4	62.04	56.62	67.94	62.9
5	55.78	59.51	56.91	56.4
6	62.58	65.66	63.04	58.0
7	52.14	48.99	60.26	51.9
8	54.62	60.64	60.53	54.5
9	53.35	56.22	56.87	50.0
10	53.90	52.81	65.39	50.4
11	50.39	53.54	52.88	45.2
12	51.26	48.14	40.03	36.4
13	45.66	44.38	50.71	45.9
14	44.24	47.42	41.41	41.1
15	49.01	50.85	50.76	48.6
16	51.71	54.22	53.55	46.0

Tabuľka A.2: Výsledky pre testovanie pre dáta s  $45^\circ$ , uvedené hodnoty sú v km/h.