

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

RADAROVÉ MĚŘENÍ RYCHLOSTI PRO SPORTOVNÍ UDÁLOSTI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DANIEL RADOŠ

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

RADAROVÉ MĚŘENÍ RYCHLOSTI PRO SPORTOVNÍ UDÁLOSTI

RADAR-BASED SPEED MEASUREMENT FOR SPORT EVENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DANIEL RADOŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ MARŠÍK

BRNO 2015

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje měření rychlosti se zaměřením na sportovní události. V úvodě této práce jsou spomenuty základní principy radarů a jejich rozdělení. Poté je část práce věnovaná použitému radaru s kontinuální vlnou, využívající Dopplerův jev a také principu postupnému zpracování signálů, který vede až k výpočtu výsledné rychlosti měřeného objektu. Nakonec jsou zvolené metody implementovány a vyzkoušeny na reálných datech. K závěru práce je provedeno vyhodnocení a možné pokračování této práce.

Abstract

The Bachelor thesis is dedicated to speed measurement focused on sport events. In introduction of this thesis, basic principles of radar and their dividing are mentioned. Following part of thesis is dedicated to continuous wave radar, using Doppler effect and also principle of sequential signal processing, followed by resultant speed calculation of measured object. Ultimately, selected methods are implemented and tested using real data. In the end, the implemented application is evaluated and the possible continuation of this work is stated.

Klíčová slova

radar, Dopplerův jev, měření rychlosti, radar s kontinuální vlnou, zpracování signálu, kosinový faktor

Keywords

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

Citace

Daniel Radoš: Radarové měření rychlosti pro sportovní události, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2015

Radarové měření rychlosti pro sportovní události

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Maršíka. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Daniel Radoš
19. května 2015

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce, panu Ing. Lukášovi Maršíkovi, za vedení mé práce, cenné návrhy a rady k hlubšímu pochopení problematiky a zapůjčení radarového modulu, které vedlo ke zkvalitnění této práce.

© Daniel Radoš, 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 | 3 |
| 2 Radar | 5 |
| 2.1 Základne časti a princíp činnosti radaru | 6 |
| 2.2 Rozdelenie radarov | 7 |
| 2.3 Frekvenčné pásma | 8 |
| 2.4 Radarová rovnica | 9 |
| 2.5 Dopplerov jav | 10 |
| 2.6 Radary s kontinuálnou vlnou | 11 |
| 3 Spracovanie signálu | 14 |
| 3.1 Použité radarové moduly | 14 |
| 3.2 Analógovo-digitálny prevod signálu | 18 |
| 3.3 Segmentácia signálu | 18 |
| 3.4 Frekvenčná analýza | 20 |
| 3.5 Meranie rýchlosti | 20 |
| 3.6 Uhlová korekcia signálu | 22 |
| 4 Implementácia | 24 |
| 4.1 Návrh pomocou programu Matlab | 24 |
| 4.2 Návrh a implementácia v C++ | 26 |
| 5 Vyhodnotenie | 30 |
| 5.1 Testovanie aplikácie | 30 |
| 5.2 Zhodnotenie výsledkov | 33 |
| 6 Záver | 34 |
| A Obsah DVD | 37 |
| B Manual | 38 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Základný princíp radaru [5]. | 5 |
| 2.2 | Bloková schéma CW radaru ¹ | 6 |
| 2.3 | Grafické rozdelenie radarov podľa typu ² | 7 |
| 2.4 | Dopplerov jav pri pohybujúcom sa objekte sprava (dlhšia vlnová dĺžka) doľava (kratšia vlnová dĺžka) ³ | 10 |
| 2.5 | Znázornenie nedokonalosti lineárneho priebehu radarového modulu K-MC4 [2]. | 12 |
| 2.6 | Rozdiel vyslaného a prijatého signálu FM-CW radaru pre meranie vzdialenosti a znázornenie Dopplerovho posunu f_D k meraniu rýchlosti objektu [17]. | 13 |
| 3.1 | Ukážka radarového modulu K-MC1 [3]. | 15 |
| 3.2 | Citlivosť antén a ich uhlový rozsah radarového modulu K-MC4 [2]. | 16 |
| 3.3 | Bloková schéma modulu K-MC4 s dvoma prijímacími anténami [2]. | 17 |
| 3.4 | Bloková schéma modulu K-MC1 ktorý využíva zosilnenie signálu na oboch kanáloch [3]. | 17 |
| 3.5 | Fázový posun v zaostávajúcom signále prijatom anténou Rx1 [2]. | 18 |
| 3.6 | Radarový výstup a viditeľný fázový posun medzi kanálmi I (modrá) a Q (červená) | 19 |
| 3.7 | Najpoužívanejšie oknové funkcie [9]. | 20 |
| 3.8 | Aplikácia hammingovho okna na predošlom príklade. | 21 |
| 3.9 | Príklad možného výstupu frekvenčného spektra zobrazujúceho frekvenčný vrchol. | 21 |
| 3.10 | FSK modulácia - dve diskrétné frekvencie f_1 a f_2 a skokový rozdiel f_{step} medzi nimi [4]. | 23 |
| 4.1 | Radarový výstup a frekvenčné spektrum pri behu športovca. | 25 |
| 4.2 | Radarový výstup a frekvenčné spektrum pri odkope lopty. | 26 |
| 4.3 | Bloková schéma návrhu behu aplikácie. | 27 |
| 4.4 | Výsledná podoba grafického užívateľského rozhrania pri priebežnom spracovávaní signálu. Súčasťou aplikácie je aj informácia o rekordnej hodnote a smere pohybu objektu. | 29 |
| 5.1 | Priebeh vykresľovania aktuálnych rýchlostí objektov, červenou značená strela a modrou prihrávka po zemi. | 32 |

Kapitola 1

Úvod

Šport slúžil v histórii, najmä prostredníctvom olympijských hier, k odstráneniu vojen. V súčasnosti sa stal šport veľmi populárny a hlavne v profesionálnej sfére sa začal klásť dôraz na neustále zdokonaľovanie a vylepšovanie techniky k zvýšeniu atraktivity športu. K tomuto prispelo aj nasadenie radaru do športového odvetvia. V tejto práci je pozornosť venovaná univerzálnemu meraniu rýchlosti so zameraním na rôzne športové odvetvia.

História radaru siaha až do počiatku 20. storočia, kde svojím experimentovaním s odrazom elektromagnetických vln od lode získal v roku 1904 nemecký inžinier Christian Hülsmeyer patent na svoj vynález. Keď v roku 1935 odprezentovali vedci Robert Watson-Watt a Arnold Wilkins funkčnosť radaru zachytiť odrazenú vlnu od lietadla, nastal zvrät v nasadení výskumu radarovej techniky s masívnymi investíciami [14]. Po vyslaní vysokofrekvenčného signálu zachytáva radar spätný, odrazený signál od objektov a cieľov. Tento signál nesie informáciu o rýchlosti a vzdialenosti objektu. Radar bol pôvodne používaný len vo vojenskej technike za druhej svetovej vojny v prísne stráženom režime. Slúžil k navigácii vojsk a detekcii objektov vzdušných, pozemných a námorných síl. Po druhej svetovej vojne sa začali vyvíjať aj ďalšie typy radarov k špecifickým účelom vojenskej a civilnej techniky.

S plynúcim časom sa stávajú radary cenovo dostupným riešením pre viacero civilných odvetví. V doprave je najvýznamnejším využitie radaru k meraniu rýchlosti vozidiel. Najnovšie modely áut využívajú rôznych automobilových asistentov pri cúvaní, kontrole odstupu od vozidiel a detekcii slepých zón za vozidlom. Veľké využitie radarov sa vyskytuje v odvetví meteorológie. Meteorologické radary sú určené k detekcii zrážkovej oblačnosti. Z prijatého signálu sme schopní zistiť veľkosť mrakov, množstvo vodných kvapiek a rýchlosť vetra.

V novodobej histórii prispievajú radary v športe k zaznamenávaniu štatistických údajov športovcov a ich výkonov. Športové radary sa zameriavajú na meranie rýchlostí pohyblivých predmetov, predovšetkým guľatých tvarov, ako sú lopty používané v tenise, futbale, bejzbale, ale i iných tvarov, ako napríklad puk v hokeji. Meranie nemusí byť zamerané len na predmety, ale i na samotných športovcov a ich výkon. Športovec sa tak môže sústrediť v prípadnom tréningu na určité partie svojej hry a cielene zlepšovať svoj výkon. Informácie o rýchlosti sú veľmi atraktívne aj pre oko diváka, čo spôsobuje stále väčšie a väčšie nasadzovanie radarov do športových udalostí.

Táto práca sa zaoberá meraním rýchlosti v športových udalostiach so zameraním na projektily a športovcov samotných. V texte budú popísané techniky spracovania signálu a vyextrahovania informácie o rýchlosti cieľného objektu. V kapitole 2 je popísaný princíp činnosti a základné časti radaru ako takého spolu s rozdelením radarov do skupín na základe kritérií funkčnosti a režimu vysielania signálu. Kapitola 3 sa zaoberá postupným spracovaním signálu, od výstupu z radaru s uloženou informáciou cieľného objektu, až po

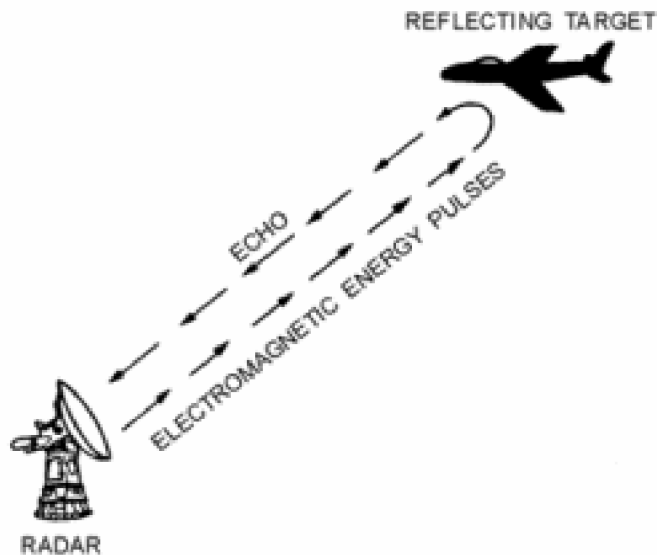
samotné vyhodnotenie rýchlosti tohto objektu. V obsahu kapitoly sú taktiež zahrnuté jednotlivé techniky merania rýchlosti a teoretické vysvetlenie pre základ merania vzdialenosti objektu. Samotnú implementáciu výslednej aplikácie obsahuje kapitola 4, v ktorej sú použité teoretické znalosti z predchádzajúcich kapitol. Kapitola 5 zahŕňa vyhodnotenie merania rýchlosti použitými technikami a porovnávanie s referenčnými výsledkami pre určenie presnosti aplikácie. Záver práce, ako aj ďalší možný vývoj do budúcnosti, je uvedený v kapitole 6.

Kapitola 2

Radár

Radár (pochádza z angl. výrazu **RA**dio **D**etecting **ANd** **R**anging) je elektromagnetické zariadenie slúžiace k detekcii a lokácii objektov, ako sú lietadlá, lode, vozidlá, ľudia alebo prírodné prostredie. V princípe ide o šírenie elektromagnetických vln v priestore. Môže pracovať na krátke alebo dlhé vzdialenosti v nepriaznivých podmienkach, ako je tma, hmla, dážď a sneh za dosiahnutia výsledkov s vysokou presnosťou.

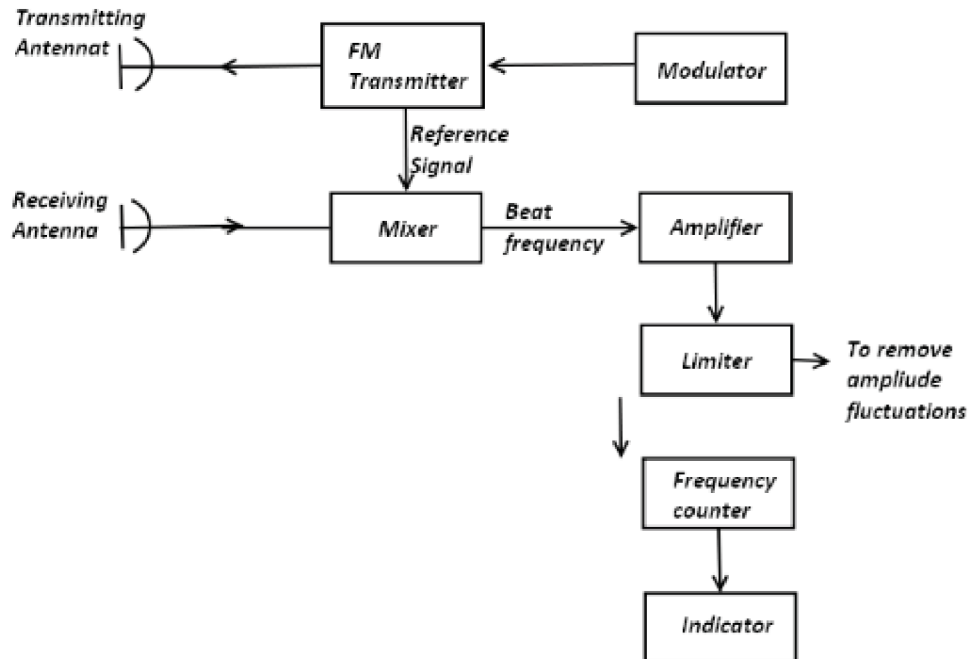
Radár vysiela elektromagnetické vlny do priestoru alebo k určitému cieľu, ktoré sa odrážajú od okolitých objektov. Časť odrazenej energie sa vracia späť k radaru a časť je odrazená iným smerom. Táto energia sa nazýva **echo**, pre lepšie pochopenie základného princípu činnosti radaru slúži ilustračný obrázok 2.1. Echo, ktoré sa vracia späť k radaru, nielenže detekuje prítomnosť cieľa, ale na základe porovnania prijatého signálu a signálu odoslaného, sme schopní určiť rôzne vlastnosti cieľa, ako napríklad, rýchlosť, vzdialenosť alebo smer pohybu objektu [14] [17].



Obrázek 2.1: Základný princíp radaru [5].

2.1 Základne časti a princíp činnosti radaru

Radarové systémy, rovnako ako aj iné zložité elektronické systémy, sú zložené z niekoľkých hlavných podsystemov a mnoho jednotlivých doplňujúcich okruhov. Táto časť popisuje činnosť jednotlivých častí radaru, ktoré sú základom pre radary s nepretržitou, kontinuálnou vlnou. Princíp jeho fungovania je uvedený neskôr, na strane 8. Blokovaná schéma radaru je znázornená na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Blokovaná schéma CW radaru¹.

Základné, jednotlivé prvky radaru s kontinuálnou vlnou [5] [10] [15]:

- **Modulátor** - Radiofrekvenčný generátor (označovaný ako RF) generuje stabilné frekvencie, ktoré predáva vysielaču.
- **FM Transmitter/Vysielač** - Vysielač preposiela referenčný signál výstupnej anténe a detektoru. Potrebný výkon získava použitím výkonného oscilátora (magnetron) alebo mikrovlnným zosilňovačom (klystrón), ktorému asistuje nízkonapäťový RF zdroj.
- **Anténa** - Jedna anténa vysiela signál z vysielača ako elektromagnetické vlnenie s konštantnou rýchlosťou, pričom druhá anténa zachytáva odrazený signál, ktorý privedie k pripojenému detektoru s minimálnou stratou. Veľkosť antény je úmerná vlnovej dĺžke, a teda nepriamo úmerná frekvencii.
- **Mixér/Detektor** - Porovnáva referenčný signál z vysielača s prijatým signálom prijímacej antény. Výsledok je posielaný na zosilňovač.

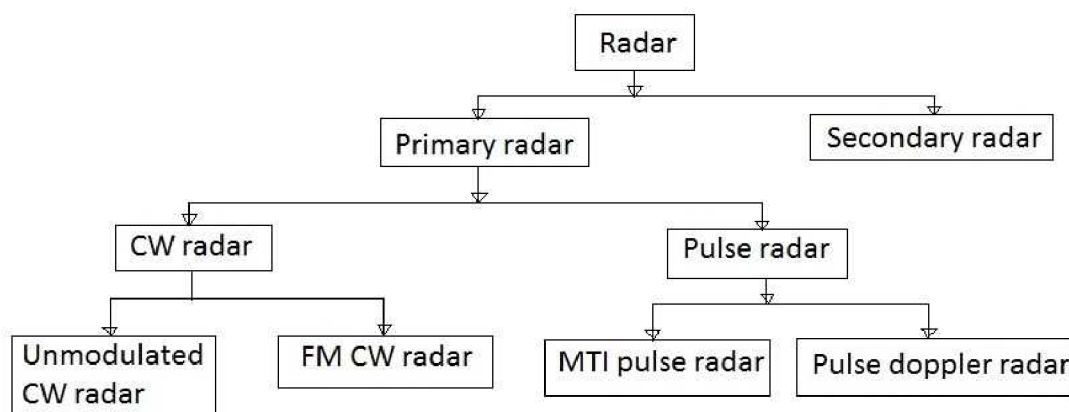
¹Prebrané z internetovej stránky: <http://www.nptel.ac.in/courses/101108056/module2/lecture5.pdf>.

- **Amplifier/Zosilňovač** - Zosilňovač zosilní prijaté signály, ktoré sú nakoniec predané indikátoru.
- **Indikátor** - Využíva prijaté signály z prijímača pre vytvorenie kontinuálneho a zrozumiteľného grafického obrazu pozorovateľovi s cieľovou informáciou.

Výhodou radaru s kontinuálnou vlnou je to, že celý obvod prijímača a vysielača môže byť vyrobený z polovodičových súčiastok na jednej doske plošných spojov ako neoddeliteľná súčasť [17].

2.2 Rozdelenie radarov

Typy radarov môžeme rozdeliť do skupín na základe konštrukcie, výkonu, presnosti, rozmeru, spôsobu zobrazovania a iných rôznych kritérií. Najzákladnejšie delenie podľa **funkcie** rozoznáva radary [7] [17]:



Obrázek 2.3: Grafické rozdelenie radarov podľa typu².

- **Primárne** - Vysiela elektromagnetické vlnenie do priestoru, ktoré sa odráža od cieľného objektu, pričom časť odrazeného signálu sa vracia späť k anténe a následne signál spracuje. Primárnymi radarmi môžeme získať informácie o polohe (vzdialenosť a výška) a rýchlosti objektu.
- **Sekundárne** - Pracuje na princípe dotaz–odpoveď. Skladá sa z troch častí, „dotazovač“ vyšle signál k objektu, ktorý k správne fungovaniu potrebuje „odpovedač“, ten je súčasťou vybavenia dotazovaného objektu. Signál vyhodnotí a pošle odpoveď k pozemnému prijímaču sekundárneho radaru. Hlavné využitie sekundárnych radarov je kontrola riadenia leteckej dopravy. Signál vyslaný priamo od objektu tak obsahuje viac informácií ako môže získať primárny radar (napr. identifikačný kód, vzniknuté technické problémy na palube lietadla).
- **Pasívne** - Slúžia ako sledovacie systémy a nie je možné tieto radary zamerať, pretože nevysielajú žiaden signál. Polohu objektu získava na základe elektromagnetických vln,

²Prebrané z internetovej stránky: <http://www.rfwireless-world.com/Tutorials/radar-tutorial.html>.

ktoré objekty sami vysielajú v podobe komunikácie s letiskom, elektromagnetického rušenia a rôznych zdrojov žiarenia.

Ďalším dôležitým rozdelením je rozdelenie radarov podľa **režimu**, v ktorom vysielajú elektromagnetické vlny, (týka sa len primárnych radarov) [5] [7] [17]:

- **Pulzné radary** - Pracuje len s jednou anténou, ktorá sa striedavo pripája k vysielateľu a prijímaču. Líši sa od radarov s kontinuálnou vlnou tým, že nevysiela sústavne, ale vo veľmi krátkych elektromagnetických impulzoch s vysokým výkonom. Tieto impulzy trvajú obvykle 0,1–50 ms. Vysielač je zapnutý na veľmi krátku dobu a rádio-frekvenčná energia je prenášaná, vysielač sa potom vypne a pulz cestuje z vysielateľa rýchlosťou svetla. Keď pulz zasiahne objekt, odrazí sa a začne cestovať späť k radarovému systému pohybujúc sa rovnakou rýchlosťou ako pri vyslaní impulzu. Impulz je prijatý radarovým systémom a časový interval medzi vyslaním a prijatím je spracovaný a zobrazený na indikátore. Využitie nachádza v radaroch s väčším dosahom.
- **Radary s kontinuálnou vlnou** - Sú označované ako CW (Continuos Wave) a vyznačujú sa vysielaním a prijímaním neprerušovaného signálu. Preto musia mať radary s kontinuálnou vlnou dve antény, jedna pre vysielanie a druhá pre príjem signálu 2.2. Základný, nemodulovaný CW radar prenáša signál konštantnou frekvenciou a amplitúdou. S využitím Dopplerovho javu sme schopní pri pohybujúcom sa objekte získať jeho rýchlosť. Nedokážeme ale získať jeho vzdialenosť z dôvodu nezmerateľnosti času medzi vyslaním a následným prijatím echa. Modulovaním frekvencie tak získavame frekvenčne modulovaný radar s kontinuálnou vlnou označovaný ako FM-CW (Frequency Modulated Continuos Wave).

2.3 Frekvenčné pásma

Využiteľné radarové systémy pracujú na rôznych kmitočtoch začínajúcich na stovkách Khz, končiac až frekvenciou 110 GHz. Frekvenčné spektrum je rozdelené do viacerých pásiem. Jednotlivé pásma s príslušnými kmitočtami sú uvedené v tabuľke 2.1 [15] [10]:

| Frekvenčné pásmo | Frekvenčný rozsah [GHz] | Vlnová dĺžka [cm] |
|------------------|-------------------------|-------------------|
| VHF | 0,03–0,3 | 100–10000 |
| UHF | 0,3–1 | 30–100 |
| L | 1–2 | 15–30 |
| S | 2–4 | 7,5–15 |
| C | 4–8 | 3,75–7,5 |
| X | 8–12 | 2,5–3,75 |
| Ku | 12–18 | 1,67–2,5 |
| K | 18–27 | 1,11– 1,67 |
| Ka | 27–40 | 0,75–1,11 |
| V | 40–75 | 0,4–0,75 |
| W | 75–110 | 0,27–0,4 |

Tabuľka 2.1: Frekvenčné radarové pásma, ich rozsah a vlnová dĺžka.

Radary s frekvenčným pásmom VHF a UHF sú využívané najmä v meteorológii a vesmírnych ústavoch pre ich dosah, ktorý je rádovo v stovkách kilometrov. Zaručuje to

veľkosť antény a tým malý útlm signálu. Pásmo L a S sú určené pre radary s dlhým dosahom a ich využitie slúži k letovej prevádzke a vojenským účelom.

Kmitočty nad pásmom S sú lepšie pre kvalitnejšie sledovanie a rozpoznávanie cieľov. Radary pásma C a X boli využívané k protivzdušnej obrane a pre radary k presnému sledovaniu rakiet. Trieda pásma K bola využívaná v 2. svetovej vojne no neskôr bola rozdelená na 3 skupiny Ku, K a Ka kvôli zle zvolenej vlnovej dĺžke. Pásmo K má uplatnenie v radaroch na malé až stredné vzdialenosti. Vysoký útlm signálu nad triedou Ka spôsobuje, že pásma V a W sa vyznačujú len veľmi malým dosahom do pár desiatok metrov [15].

2.4 Radarová rovnica

K zvyšovaniu maximálneho dosahu radaru je potrebný čo najväčší výkon prijímaného signálu odrazeného od objektu. Citlivosť prijímača je zásadná pre ďalšie zpracovanie signálu a získania tak potrebných informácií. Výkon prijatého signálu je závislý na zisku antény, daný vzťahom:

$$G_0 = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (2.1)$$

Anténa nám pomáha k usmerneniu energie do požadovaného smeru. Rovnicu hustoty vyžarovaného výkonu v požadovanom smere tak definujeme ako:

$$P_d = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (2.2)$$

Keď energia dopadá na objekt, väčšina je vstrebaná alebo rozptýlená do okolia. Malá časť sa ale odrazí a vracia sa späť k radaru. Objekty rôznych tvarov, veľkostí a materiálov odrážajú odlišné množstvo energie, nazývané relatívna odrazivá plocha vyjadrená v m^2 (RCS – radar cross section). Skombinovaním relatívnej odrazivej plochy a vzťahu 2.2 dostávame vzťah:

$$P_d = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (2.3)$$

Použitie rovnakej antény pre vysielanie a prijímanie môžeme vyjadriť vzťahom pre celkový prijatý výkon:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.4)$$

Celkový prijatý výkon je výsledkom násobenia rovnice 2.3 s efektívnou plochou A prijímajúcej antény. Efektívna plocha je vyjadrená zo vzťahu pre zisk antény 2.1. Na prijímač sa dostane len veľmi slabý signál, ktorého dôvodom je až štvrtá mocnina vzdialenosti objektu [13] [12] [14].

K výpočtu maximálneho dosahu radaru potrebujeme započítať aj vplyv šumu. Šum je rušivý signál, ktorého zdrojom sú signály z okolia ako aj samotný prijímač, v ktorom vzniká šum zahrievaním súčiastok. Vyjadrenie šumu:

$$N = (F - 1) k T_0 B \quad (2.5)$$

Pomer signál/šum (SNR – Signal to noise ratio) je daný pomerom prijatého výkonu a šumu:

$$SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 (F - 1) BL} \quad (2.6)$$

Maximálny dosah radaru určíme úpravou predchádzajúcej rovnice:

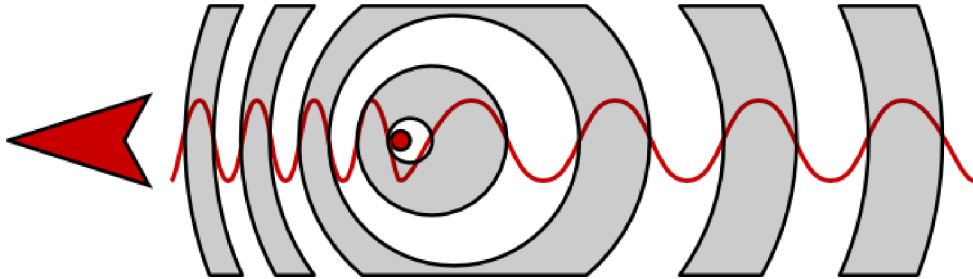
$$R_{MAX} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 SNR k T_0 (F - 1) BL}} \quad (2.7)$$

do výsledného vzťahu bolo treba zakomponovať aj rôzne straty signálu symbolizované premennou L [12] [10].

2.5 Dopplerov jav

Dopplerov jav bol prvýkrát popísaný v roku 1842 v Prahe a je pomenovaný podľa jeho predstaviteľa, rakúskeho fyzika Christiana Dopplera. Popisuje zmenu vlnovej dĺžky elektromagnetických vln (platí pre celé vlnové spektrum) a frekvencie prijímaného signálu voči signálu vysielanému, v dôsledku relatívnej nenulovej rýchlosti zdroja alebo pozorovateľa [11].

Teda, ak sa zdroj vysielaného signálu pohybuje smerom k pozorovateľovi, potom sa frekvencia zvyšuje. Dôsledok je daný tým, že každá vysielaná vlna je bližšie k pozorovateľovi ako tá predchádzajúca. A zase naopak, pri pohybe zdroja smerom od pozorovateľa, navyšuje sa čas prijatia každej nasledujúcej vlny a frekvencia tak klesá (viď obrázok 2.4) [14].



Obrázok 2.4: Dopplerov jav pri pohybujúcom sa objekte sprava (dlhšia vlnová dĺžka) doľava (kratšia vlnová dĺžka)⁴.

Pri pohybujúcom sa zdroji s frekvenciou f_0 smerom k pozorovateľovi frekvencia narastá a dá sa vyjadriť vzťahom [14] [15]:

$$f = \frac{v}{v - v_s} f_0 \quad (2.8)$$

Pre zmenu, pri pohybujúcom sa zdroji s frekvenciou f_0 smerom od pozorovateľa frekvencia klesá, vyjadrujúc vzťah [14] [15]:

$$f = \frac{v}{v + v_s} f_0 \quad (2.9)$$

⁴Prebrané z internetovej stránky: <http://astro.unl.edu/naap/esp/dopplereffect.html>.

Zmena frekvencie odrazeného signálu voči vyslanému signálu je jav nazývaný ako Dopplerov posun. Tento jav je najčastejšie využívaný najmä pri meraní rýchlosti objektu, popísaný ako [10] [14] [15]:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \quad (2.10)$$

kde:

- f_D je Dopplerov posun, rozdiel medzi vyslanou a prijatou frekvenciou
- v vyjadruje rýchlosť pohybujúceho sa objektu
- λ označuje vlnovú dĺžku

Zo vzťahu vyplýva, že približujúci sa objekt vytvára pozitívnu hodnotu f_D a naopak, vzdalujúci sa objekt tvorí zápornú hodnotu Dopplerovskej frekvencie f_D [15] [11].

2.6 Radary s kontinuálnou vlnou

Ako bolo popísané v sekcii 2.2, radary s kontinuálnou vlnou sú ideálnym riešením pre meranie rýchlosti objektu. K základnému meraniu s využitím Dopplerovho posunu postačí CW radar. Ak je potrebné rozšíriť meranie o informáciu vzdialenosti objektu, poprípade využitia inej techniky merania rýchlosti, ako napríklad FSK technika, popísaná neskôr, je k tomu potrebný FM-CW radar.

Frekvenčne modulovaný radar s kontinuálnou vlnou je špeciálny typ radaru, ktorý vyšiel nepretržitý-spojité signál. Na rozdiel od nemodulovaného CW radaru využíva frekvenčnú moduláciu, mení svoju pracovnú frekvenciu v čase. To poskytuje FM-CW radarom možnosť merania vzdialenosti sledovaných objektov. Pre meranie vzdialenosti FM-CW radarom sa najviac využíva **lineárna frekvenčná modulácia signálu**. Pri tejto modulácii je kladený veľký dôraz na to, aby bola zmena frekvencie čo najviac lineárna [6]. Na obrázku 2.6 je znázornená približná linearita modulačného priebehu, ktorú sa snažia výrobcovia radarov doladiť rôznymi korekciami pomocou softvérových nástrojov.

Frekvencia vyžarovaného signálu sa periodicky zvyšuje a znižuje, v okamihu prijatia odrazeného signálu od objektu sa frekvencia líši od vyžarovaného signálu o Δf v rozdielnom čase Δt . Efekt znázorňuje obrázok 2.6, kde červená vlna znázorňuje vyžarujúci signál Tx a zelená prijaté echo signálu Rx [10] [17].

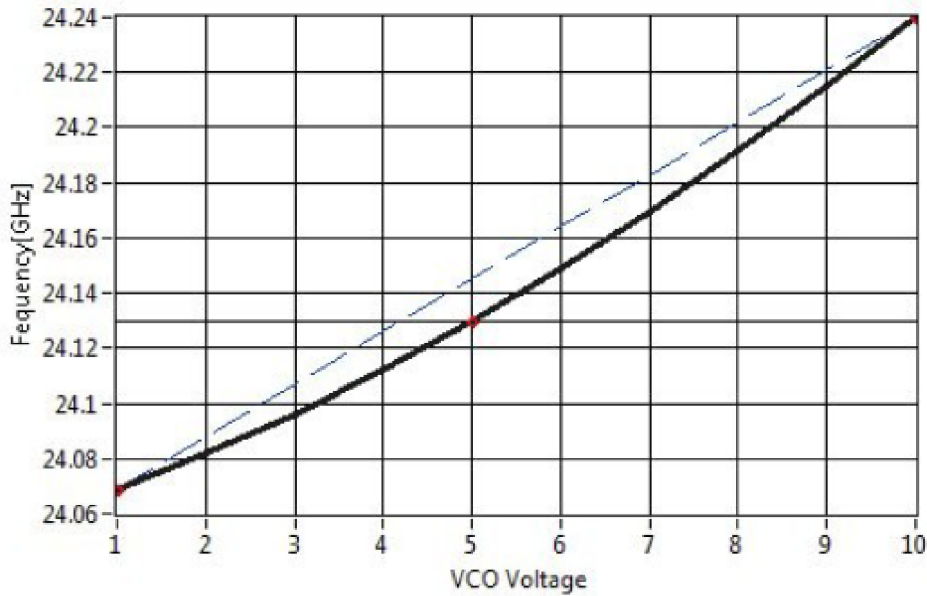
$$\Delta f = f_{TX} - f_{RX} \quad (2.11)$$

Rozdiel frekvencií znázorňuje vzťah 2.11. Použitie rozdielu frekvencií Δf nám pomáha k výpočtu vzdialenosti objektu od zdroja R a môže byť popísaný ako:

$$R = \frac{c_0|\Delta t|}{2} = \frac{c_0|\Delta f|}{2(df/dt)} = \frac{c_0f_b|\Delta f|}{2T_m} \quad (2.12)$$

kde:

- c_0 je rýchlosť svetla
- Δt znázorňuje časový rozdiel medzi vyslaným a prijatým signálom
- Δf je meraný frekvenčný rozdiel



Obrázek 2.5: Znáozornenie nedokonalosti lineárneho priebehu radarového modulu K-MC4 [2].

- df/dt vyjadruje frekvenčné preladenie za jednotku času
- f_b je tzv. *beat frekvencia*
- T_M znázorňuje časovú periódu jedného priebehu signálu

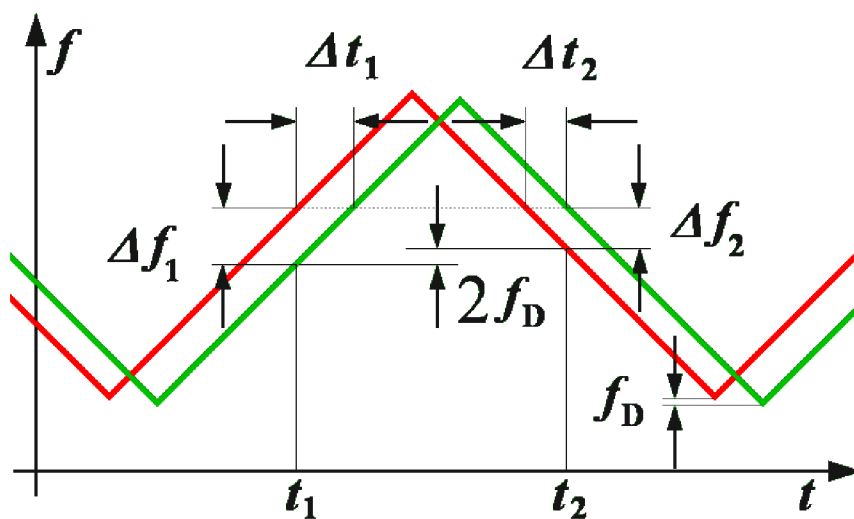
Rozdiel frekvencií Δf sa uvádza ako absolútna hodnota, pretože záporné čísla pre frekvenciu neexistujú. Z rovnice je evidentné, že Δf je úmerná vzdialenosti R . Radar meria v závislosti na smere pohybu objektu a lineárnej modulácii len súčet alebo rozdiel medzi Δf pre informáciu o vzdialenosti a využitie Dopplerovho efektu pre meranie rýchlosti pohybujúceho sa objektu. K určeniu rozdielovej frekvencie Δf , rovnica 2.14, si musíme vyjadriť frekvencie Δf_1 a Δf_2 pre ktoré platí vzťah:

$$\Delta f_1 = \Delta f + f_D \quad (2.13)$$

$$\Delta f_2 = \Delta f - f_D$$

$$\Delta f = \frac{1}{2} (\Delta f_1 + \Delta f_2) \quad (2.14)$$

K rôznym meraniam sa využívajú rôzne modulačné priebehy signálov. Najčastejšie sa pri FM-CW radaroch využívajú modulačné priebehy s pilovým alebo trojuholníkovým priebehom. Výhoda trojuholníkového priebehu spočíva v periodickom lineárnom zvyšovaní a znižovaní frekvencie, z ktorého môžeme súčasne merať rýchlosť aj vzdialenosť objektu. Metóda môže byť kombinovaná s Dopplerovým javom, kde sa využíva časť trojuholníkového a časť dopplerovho priebehu [17].



Obrázek 2.6: Rozdiel vyslaného a prijatého signálu FM-CW radaru pre meranie vzdialenosti a znázornenie Dopplerovho posunu f_D k meraniu rýchlosti objektu [17].

Kapitola 3

Spracovanie signálu

Kapitola sa venuje bližšiemu popisu radaru s kontinuálnou vlnou použitému v tejto práci a postupnému spracovaniu výstupného radarového signálu na požadované spracované informácie o detekovanom objekte.

Výstup radaru tvorí analógový signál, ktorý je treba pred samotnou úpravou signálu zdigitalizovať pomocou A/D prevodníku, postup je popísaný v kapitole 3.2. Následne je signál treba rozdeliť do jednotlivých rámcov rovnakej dĺžky. Pred samotnou frekvenčnou analýzou je potreba ešte odstrániť jednosmernú zložku signálu. Na jednotlivé segmenty sa aplikuje oknová funkcia, aby sa tak vylepšili vlastnosti spracovávaného signálu, viď kapitola segmentácie signálu 3.3. Signál je tak dostatočne pripravený k frekvenčnej analýze, ktorá poskytne informácie o zastúpení jednotlivých frekvencií v spracovávanom signále, detailnejší postup je popísaný v kapitole 3.4. K presnejšiemu umiestneniu špičiek v spektre použijeme prídanie núl na koniec každého segmentu, metódou nazývanou *zero padding*.

3.1 Použité radarové moduly

K získaniu potrebných radarových signálov je potreba použiť samotný radarový modul. Naše dáta bola získané pomocou dvoch nezávisle merajúcich radarových modulov K-MC1, znázornený na obrázku 3.1 a K-MC4 od Švajčiarskej firmy RFbeam Microwave GmbH.

Pri meraní radarovými modulmi je kvalita prijímaného signálu ovplyvňovaná uhlom natočenia radarového modulu, to potom ovplyvňuje celkovú vypočítanú rýchlosť objektu. Pri pohybujúcom objekte sa generuje Dopplerov signál na oboch kanáloch Q a I. Fázový posun medzi týmito kanálmi je daný závislosťou na smere pohybu objektu. Približujúci sa objekt generuje fázový posun 90° medzi výstupmi I a Q a pri opačnom smere je generovaný posun -90° medzi I a Q.

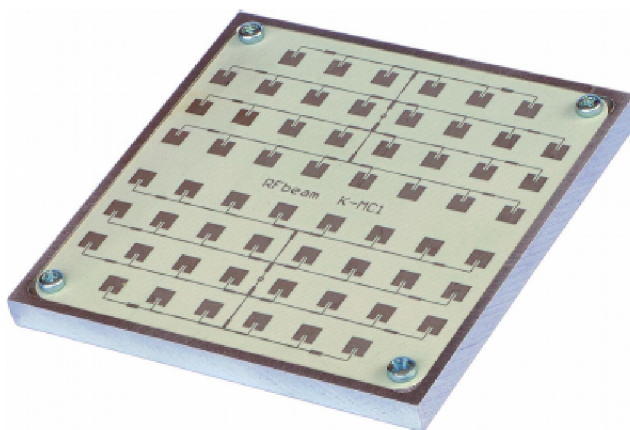
Charakteristika modulu K-MC1

Radarový modul je charakterizovaný ako radar na krátke až stredne dlhé vzdialenosti s obvyklou vysielačiou frekvenciou 24,15 GHz. Radarový modul K-MC1 používa jednu vysielačiu a jednu prijímaciu anténu. Jeho hlavnou výhodou je použitie dvoch rozdielne zosilnených výstupných zložiek pre kanál I, reálnej zložky, ako aj pre kanál Q, zložky imaginárnej. Jednotlivé kanály sú zosilnené o 15dB a 47dB (viď obrázok 3.4).

Zosilnený signál je využívaný najmä pri meraní technikou FSK, popísanou v sekcii 3.5. Nevýhodou zosilneného signálu pri použití modulovaného signálu je nežiaduci vplyv nabíjania a vybíjania predzapojeného kondenzátoru, ktorý ovplyvňuje výstupný priebeh

signálu. Súčasťou radaru je aj metóda rýchleho prebudenia zo spánku do prevádzkového režimu, tzv. *RSW Rapid Sleep Wakeup*, ktorá tak rapídne znižuje spotrebu energie. Ďalšie vlastnosti:

- citlivosť antén a uhlový rozsah je 12 stupňov horizontálne a 25 stupňov vertikálne
- rozmery modulu sú 65x65x6 mm
- napájanie 5 V
- zisk prijímacej antény 18,5 dB



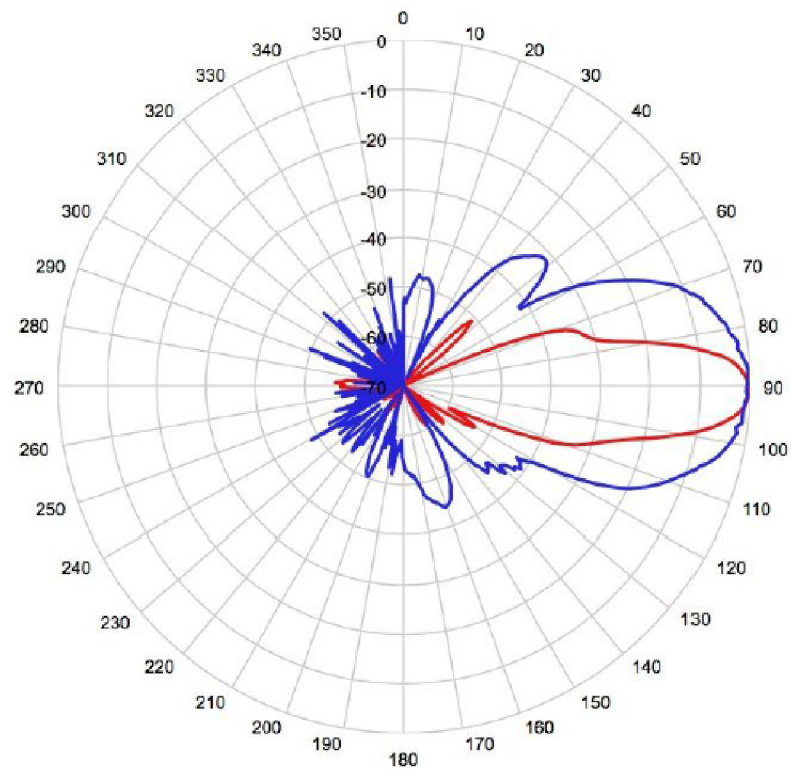
Obrázek 3.1: Ukážka radarového modulu K-MC1 [3].

Charakteristika modulu K-MC4

Je podobne ako K-MC1 určený na krátke vzdialenosti s typickou vysielaciu frekvenciou 24,15 GHz. Hlavnou zmenou pri module K-MC4 je fakt, že využíva dve prijímacie antény (viď obrázok 3.3), čo narozdiel od modulu K-MC1, ktorý využíva len jednu prijímaciu anténu, dáva možnosť merať uhol pohybujúceho sa objektu. Táto technika je nazývaná ako *Phase-Comparison Monopulse* [2]. Modul taktiež využíva techniku rýchleho prebudenia RSW, ako modul K-MC1. Ďalšie vlastnosti radarového modulu:

- citlivosť antén a teda uhlový rozsah znázorňuje obrázok 3.2 a hodnota je 12 stupňov horizontálne a 30 stupňov vertikálne
- rozmery modulu sú 78x98x7 mm
- napájanie 5 V
- zisk prijímacej antény 13,0 dB

Dve prijímacie antény napomáhajú k lepšiemu vyhodnoteniu rýchlosti meraného objektu, ten svojím pohybom smerom k radaru mení uhol snímania a signál postupne zaostáva (viď obrázok 3.5).



Obrázek 3.2: Citlivosť antén a ich uhlový rozsah radarového modulu K-MC4 [2].

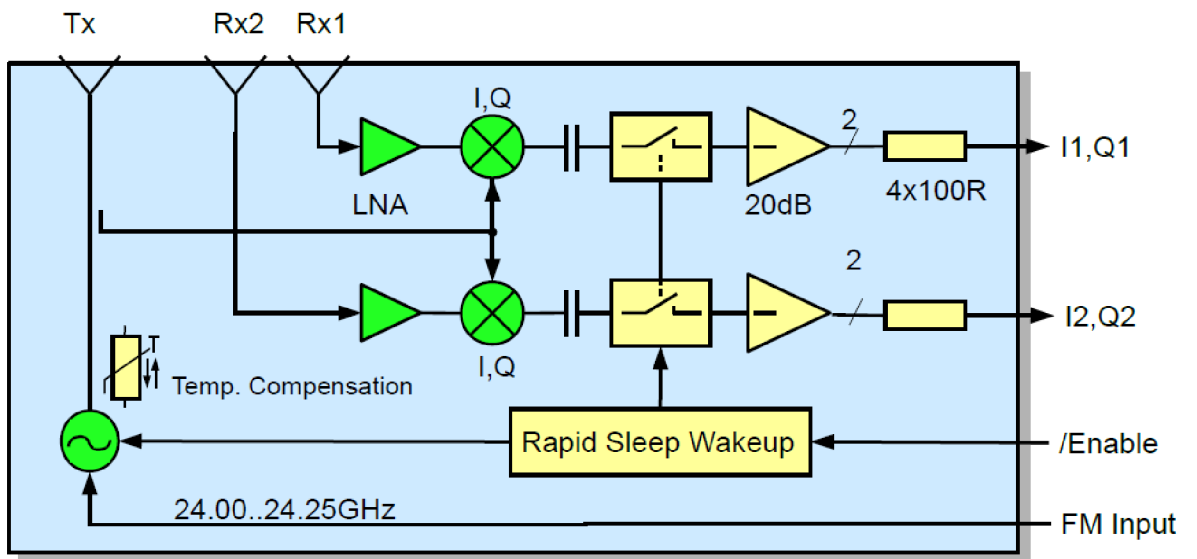
So zvyšujúcim sa uhlom sa prudko znižuje presnosť meraných hodnôt. Najvýhodnejším spôsobom, ako získať patričný uhol, je práve použitie 2 a viac prijímacích antén. Vzťah je možné popísať ako [9]:

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{\lambda \Delta \Omega}{2\pi d} \quad (3.1)$$

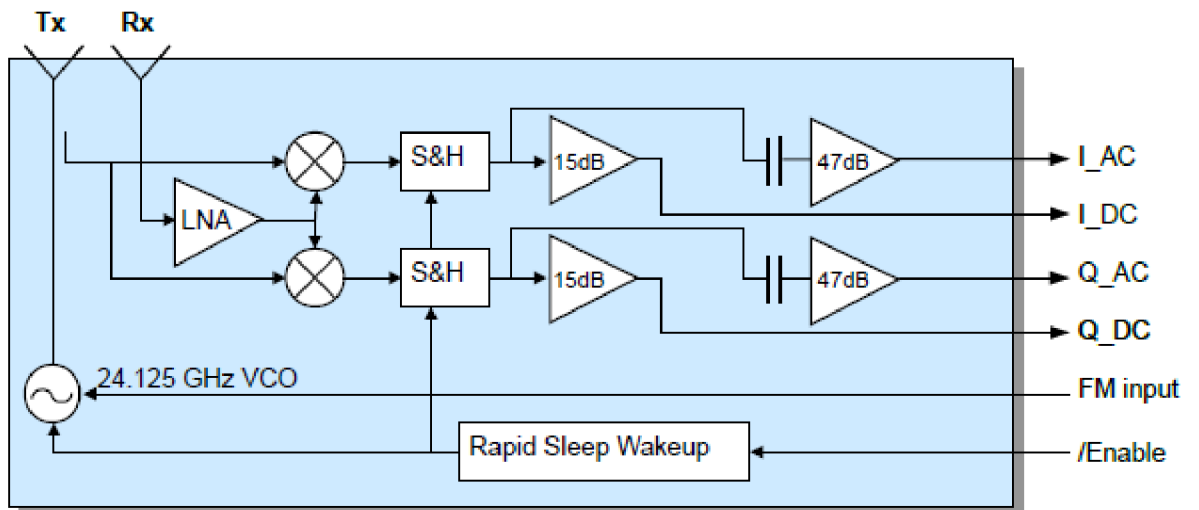
kde:

- λ je vlnová dĺžka prijímaného signálu
- $\Delta \Omega$ značí fázový rozdiel medzi dvoma signálmi
- d označuje vzdialenosť antén (viď obrázok 3.5), líši sa u jednotlivých typov, ale obvykle je to polovica dĺžky vlny alebo menej.

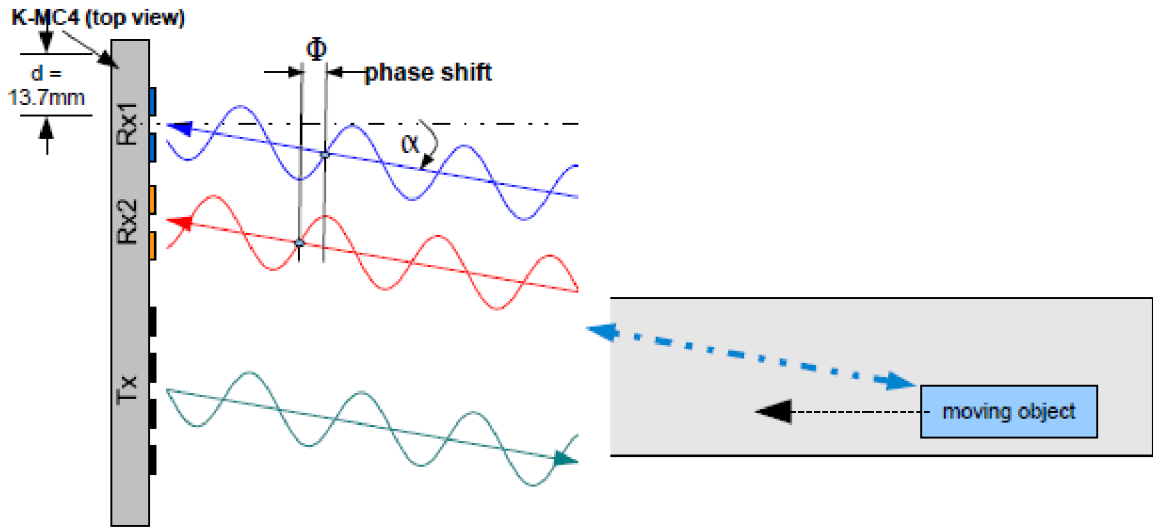
Použitie tejto techniky a jej presnosť sa odzrkadľuje od kvality SNR (viď 2.6) [8] [9].



Obrázek 3.3: Bloková schéma modulu K-MC4 s dvoma prijímacími anténami [2].



Obrázek 3.4: Bloková schéma modulu K-MC1 ktorý využíva zosilnenie signálu na oboch kanáloch [3].



Obrázek 3.5: Fázový posun v zaostávajúcim signále prijatom anténou Rx1 [2].

3.2 Analógovo-digitálny prevod signálu

Aby sa dal signál upravovať, je potreba previesť analógový signál na digitálny a to za pomoci **A/D prevodníku**. Samotný proces zahŕňa 2 kroky digitalizácie: **vzorkovanie** a **kvantovanie**.

Vzorkovanie je násobenie signálu periodickým radom Diracových impulzov, teda získanie jednotlivých vzoriek z analógového signálu, ktoré ho budú ďalej počas spracovania reprezentovať a riadia sa vzťahom vzorkovacej frekvencie 3.2. Dodržanie Nyquistovej podmienky vzorkovacieho teorému 3.3 nám zaručí úspešnú spätnú rekonštrukciu signálu, vďaka ktorej predídeme javu skreslenia signálu nazývaného *aliasing* [14] [16].

$$F_s = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

kde, T je vzorkovacia perióda

$$F_s > 2f_{max} \quad (3.3)$$

Zo vzťahu vyplýva, že je potrebné zvoliť vzorkovaciu frekvenciu tak, aby bola dvojnásobne vyššia ako maximálna frekvencia vyskytujúca sa vo vzorkovanom signále.

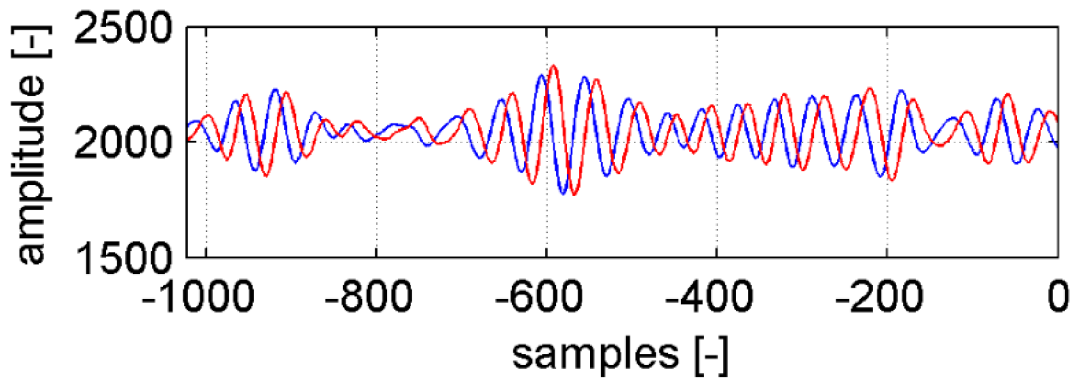
Kvantovanie je proces diskretizovania signálu v čase, kde prebieha prevod jednotlivých signálov na niektorú z kvantizačných úrovní. Kvantovaním sa priradujú diskkrétne hodnoty jednotlivým vzorkám [16].

3.3 Segmentácia signálu

Segmentácia, teda rozdelenie signálu na menšie časti, rámce, slúži k lepšiemu spracovaniu signálu. Dôvod rámcovania signálu spočíva v tom, že celkový signál je považovaný za ná-

hodný a jednotlivé rámce nám dopomáhajú k tomu, aby sa signál javil ako stacionárny, nemenný v čase.

Veľkosť rámca nám ovplyvňuje kvalitu informácie získanej o objekte – čím menší rámec, tým stacionárnejší úsek a presnejšia informácia o objekte. No je potreba dodržať aj minimálnu veľkosť rámca, v ktorom musí byť obsiahnutá aspoň jedna perióda signálu [16]. K neskoršiemu spracovaniu Fourierovou transformáciou volíme veľkosť rámca ako mocniny čísla dva ($2^9, 2^{10}, \dots$). Z toho vyplýva, že veľkosť okna sa bude líšiť vzhľadom na rýchlosť objektu. K rýchlejšiemu objektom, ako sú napr. projektily a lopty, je treba voliť menšiu veľkosť rámca ako pri meraní rýchlosti samotných športovcov. Príklad signálu jedného rámca zobrazuje obrázok 3.6.



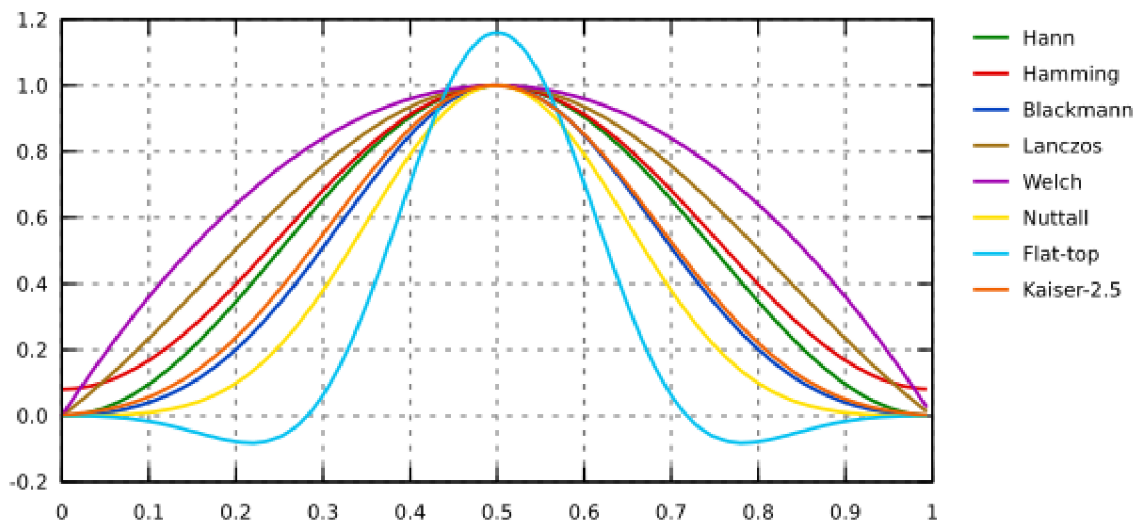
Obrázok 3.6: Radarový výstup a viditeľný fázový posun medzi kanálmi I (modrá) a Q (červená) .

Následujúcim krokom je odstránenie jednosmernej zložky. V prípade neodstránenia jednosmernej zložky nám môže táto zložka výrazne ovplyvniť výsledky frekvenčnej analýzy. **Blokové odstránenie** jednosmernej zložky sa vykoná ako odčítanie strednej hodnoty signálu od každého rámca. V prípade odstránenia v **reálnom čase** sa využíva najčastejšie filter IIR, ktorý generuje dlhodobú predikciu strednej hodnoty signálu a v signále tak zostáva len veľmi nízka alebo vôbec žiadna hodnota jednosmernej zložky [16] [9].

Posledným krokom pred frekvenčnou analýzou je aplikácia oknovej funkcie na každý rámec. Aplikáciou oknovej funkcie sa predíde rozptylu okrajových vzoriek, teda vyhladzuje signál na okrajoch a celkovo zlepšuje tvar krivky, aby vyzerala viac periodicky. Predošlý príklad po spracovaní oknovou funkciou popisuje obrázok 3.8.

Oknových funkcií existuje niekoľko typov (vid' obrázok 3.7), no pre prácu s radarovým signálom, pre ich dobré frekvenčné a amplitúdové rozlíšenie, sú najvýznamnejšie:

- **Hammingovo** okno - najlepšie vlastnosti pre náhodné signály, zvyrazňuje hodnoty v strede rámca a snaží sa potláčať vzorky na krajných hodnotách.
- **Hannovo** okno - podobne ako Hammingovo, ale krajné hodnoty násobí nulovou hodnotou.



Obrázek 3.7: Najpoužívanejšie oknové funkcie [9].

3.4 Frekvenčná analýza

K frekvenčnej analýze je potrebný prevod signálu z oblasti reprezentovanej časom do oblasti frekvenčnej, nazývanej frekvenčné spektrum. Tento krok je vykonaný metódou zvanou, Fourierova transformácia, ktorá je vyjadrená pomocou harmonických signálov. A keďže pracujeme s radom diskretných komplexných čísel, je použitá diskretná Fourierova transformácia (DFT).

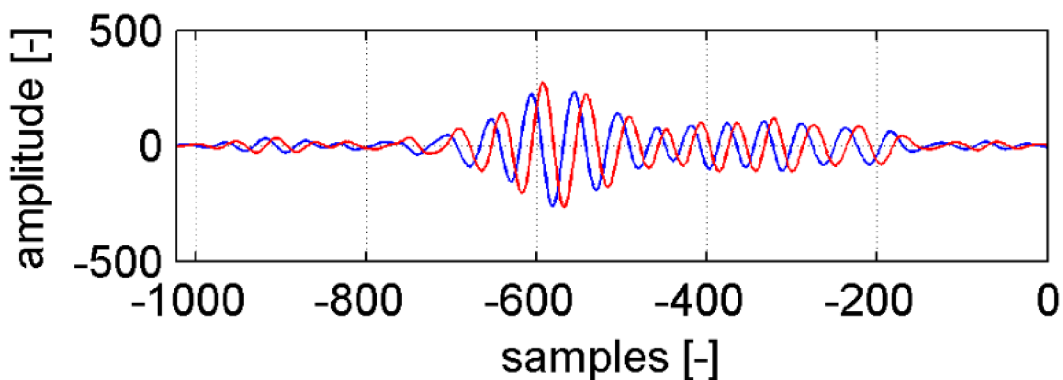
Jednou z metód počítania DFT je rýchla Fourierova transformácia (FFT). Metóda dosahuje rovnaké výsledky, ale v podstatne kratšom čase, pretože pracuje s menšou zložitou ako klasická Fourierova transformácia [1].

K zväčšeniu rozlíšenia výsledného spektra je vhodné aplikovať metódu *zero padding*. Tá nám pridáva na koniec spracovávaného segmentu nuly, čo zvyšuje počet frekvenčných bodov v spektre po prevedení Fourierovej transformácie. Čím viac núl je pridaných, tým je tvar vyhladenejší a výstup detailnejší. V konečnom dôsledku sa rozlíšenie peakov nemení, len sa spresní pozícia peaku, dochádza tak k interpolácii frekvenčného spektra. Ale ak už je rozlíšenie dostatočné, neustále pridávanie núl spôsobuje opačný efekt interpolácie hodnôt [8].

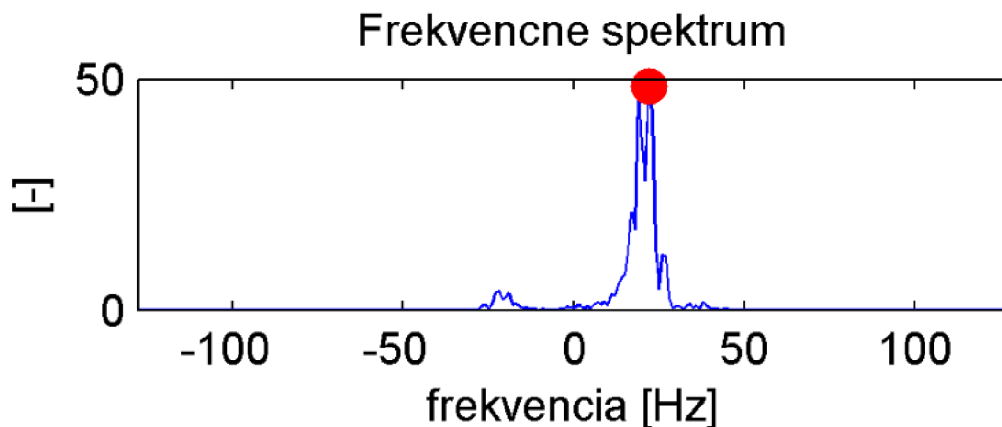
Ako už bolo spomenuté, FFT pracuje s komplexnými číslami, s reálnou a imaginárnou zložkou (kanál I a Q). Výpočet výkonu sa používa k označeniu frekvencií, ktoré sú v spektre najviac zastúpené, teda frekvencií s najväčšou hustotou. Výsledný tvar je uvádzaný v decibeloch. Príklad výstupu z FFT je uvedený na obrázku 3.9. Na obrázku je zvýraznená najviac zastúpená hodnota, dominantný peak, ktorý posluží k výpočtu rýchlosti objektu.

3.5 Meranie rýchlosti

Základ pre meranie rýchlosti radarom s kontinuálnou vlnou je Dopplerov efekt, ktorý bol popísaný v kapitole 2.5. Úpravou vzorca sme schopní odvodiť vzťah 3.4 pre výpočet relatívnej rýchlosti daného objektu, ku ktorému nám napomáha výstup z predchádzajúcej



Obrázek 3.8: Aplikácia hammingovho okna na predošlom príklade.



Obrázek 3.9: Príklad možného výstupu frekvenčného spektra zobrazujúceho frekvenčný vrchol.

frekvenčnej analýzy.

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t} c \quad (3.4)$$

kde:

- v_r je relatívna rýchlosť objektu
- f_d tvorí dopplerova frekvencia, výstup z frekvenčnej analýzy
- c zodpovedá rýchlosti svetla vo vákuu
- f_t označuje vysielaciu frekvenciu radaru

Z frekvenčnej analýzy je potrebné zistiť fázový posun medzi kanálmi I a Q z dôvodu vždy kladnej výstupnej frekvencie. Ak sa cieľ pohybuje smerom k radaru, je tento posun $\frac{\pi}{2}$, no ak sa pohybuje smerom od radaru, posun zodpovedá hodnote $-\frac{\pi}{2}$ [2]. K frekvenčnému

spektru použitom na príklade z obrázku 3.9, po dosadení zodpovedá rýchlosť objektu, v našom prípade beh športovca, rýchlosti $v = 24,1$ km/h.

Existuje ďalšie ekvivalentné riešenie pre meranie rýchlosti objektu v podobe použitej techniky nazývanej aj ako *Frequency Shift Keying*. FSK je špeciálna meracia technika využívajúca dve frekvencie f_1 a f_2 vo vyslanom signále. Každá frekvencia je vysielaná v určitom časovom intervale dĺžky T_{CPI} , po uplynutí doby sa prepína medzi jednotlivými frekvenciami. Rozdiel medzi frekvenciami f_1 a f_2 je nazývaný f_{step} , jeho veľkosť je nízka a je zvolená v závislosti od maximálnej jednoznačnej vzdialenosti objektu. Jedna perióda prepínaného signálu so znázorneným frekvenčným skokom f_{step} je vyobrazená na obrázku 3.10. Veľkosť frekvenčného kroku ovplyvňuje presnosť merania, pretože sa tak mení aj veľkosť rozdielu $\Delta\varphi$ na patričnú vzdialenosť. Nízky frekvenčný krok vo vysielacom signále a s jedným detekovaným objektom nám zaručuje najšť Dopplerovu frekvenciu na rovnakej pozícii, ale s rozdielnym fázovým posunom. Vzťah medzi vzdialenosťou objektu a fázovým rozdielom nám udáva nasledujúci vzorec [4] [8] [9]:

$$R = -\frac{c_0 \Delta\varphi}{4\pi f_{step}} \quad (3.5)$$

kde:

- R označuje výslednú vzdialenosť objektu
- c_0 zodpovedá rýchlosti svetla vo vákuu
- $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ je fázový rozdiel vo frekvenčnom spektre
- f_{step} tvorí frekvenčný krok

Z Dopplerovej frekvencie je tak možné merať vzdialenosť, ako aj rýchlosť cieľného objektu. To je veľkou výhodou metódy FSK, bohužiaľ, ak sa objekt nepohybuje, nie je možné zachytiť Dopplerovu frekvenciu v signále a nie je tak možné vypočítať rýchlosť ani vzdialenosť cieľa. Medzi ďalšiu nevýhodu metódy FSK patrí fakt, že ak je zaznamenávaných viac objektov v jednej chvíli s rovnakou rýchlosťou, nie je možné presne určiť, ktorému objektu prislúcha nameraná Dopplerova frekvencia [4].

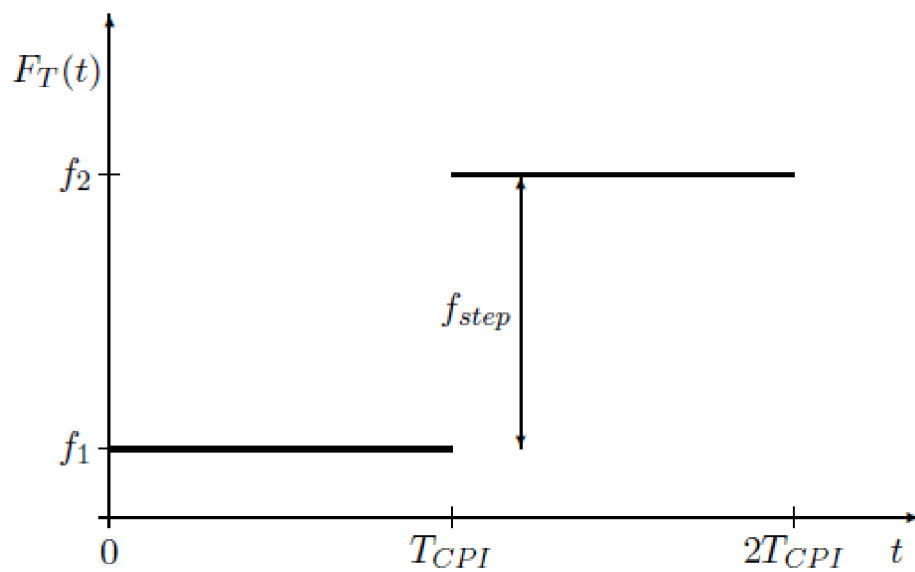
3.6 Uhlová korekcia signálu

Uhol vznikajúci medzi pohybujúcim sa objektom a smerom natočenia radarového modulu spôsobuje odchýlky pri meraní rýchlosti. Tento jav je nazývaný ako faktor kosínusového uhlu. Pri použití len jednej prijímacej antény nie je možné túto informáciu zo signálu dostať. Riešenie v podobe detekcie tohto uhlu prináša použitie minimálne dvoch prijímacích antén (viď sekcia 3.1). Jednoduchou úpravou vzťahu 3.1 pri použití radarového modulu K-MC4 môžeme detekovať uhol pomocou porovnania fáz signálov prijímacích antén, vychádzajúc zo vzťahu [2]:

$$\alpha = \frac{\Delta\Omega}{6.7} \quad (3.6)$$

kde:

- α označuje požadovaný uhol



Obrázek 3.10: FSK modulácia - dve diskkrétne frekvencie f_1 a f_2 a skokový rozdiel f_{step} medzi nimi [4].

- $\Delta\Omega$ zodpovedá fázovému posunu jednotlivých antén s medzerou medzi nimi, $d=13.7$ mm
- 6.7 je stanovená konštanta

Záverečným krokom pre určenie reálnej rýchlosti meraného objektu, je podelenie hodnôt nameranej rýchlosti a vypočítaného uhlu z predošlého vzťahu.

Kapitola 4

Implementácia

Kapitola implementácie popisuje postup návrhu výsledného možného riešenia pre radarové meranie rýchlosti jednotlivých objektov so zameraním na športovcov a projektilov pomocou radarových modulov popísaných v predchádzajúcej kapitole. Nadobudnuté znalosti z predchádzajúcich kapitol a jednotlivé zvolené postupy sú aplikované najskôr v programe Matlab a následne implementované v jazyku C++ s grafickou nadstavbou knižnice Qt.

Namerané dáta boli ukladané do špeciálneho formátu RRC, v ktorom sa ukladajú okrem samotných radarových dát aj informácie o nastavení radarového modulu, ako napríklad jeho typ alebo vzorkovacia frekvencia. Pre jednoduchosť a ľahšiu manipuláciu s dátami v použitej aplikácii bol pomocou programu Matlab prevedený formát RRC na obecnější formát typu CSV. Prevedený súbor obsahuje už len samotné namerané dáta.

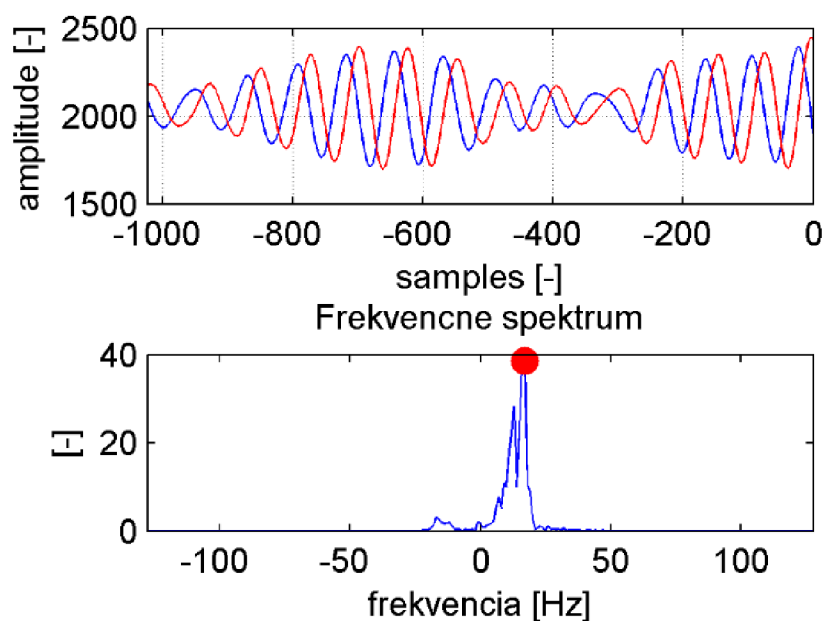
4.1 Návrh pomocou programu Matlab

Prostredie Matlab je dostatočne rošíreným programom, ktorý poskytuje veľké množstvo vstavaných funkcií pre prácu s radarovými signálmi a je tak najlepšou voľbou pre overenie správnosti jednotlivých krokov pri spracovávaní nameraných dát. Netreba samostatne implementovať žiadne potrebné funkcie a spracovanie, s následným vyhodnotením výsledku je o to jednoduchšie a komfortnejšie. V najbližšom bode potrebujeme vedieť, či pracujeme so signálom s frekvenčnou moduláciou alebo so signálom bez použitia modulácie. V našom prípade využívame spracovávanie signálu bez modulácie. K určení rýchlosti meraného objektu nie je frekvenčne modulovaný signál vôbec potreba. Implementácia bude zameraná na určenie rýchlosti pomocou jednoduchého Dopplerovho efektu.

Prvým krokom pri spracovaní dát je výber veľkosti segmentu signálu, teda zvolenie správnej veľkosti jedného rámca, ktorá závisí na type meraných objektov. Keďže sa v signále nenachádzajú synchronizačné bity, nie je potrebné deliť signál na jednotlivé modulačné časti a v signále je tak potrebné odstrániť len jednosmernú zložku, ktorá vznikla prevodom z analógového signálu do digitálnej podoby. Jednosmernú zložku odstránime pomocou vstavanej funkcie *mean*, ktorej úlohou je len odstránenie strednej hodnoty signálu.

Funkcia *hann* je jednou zo širokej škály okénnych funkcií, ktoré Matlab poskytuje. Tá je použitá na samostatné úseky a po jej aplikovaní je signál relatívne periodický a pripravený na ďalšie spracovanie. K vyhladenejšiemu signálu a presnejšiemu umiestneniu špičiek je najideálnejšie použiť metódu zero-padding (v Matlabe funkcia *zeros*), pomocou ktorej sú na konce analyzovaných segmentov pridávané samé nuly.

Po týchto úpravách môžeme pristúpiť k samotnej frekvenčnej analýze, získaniu frek-

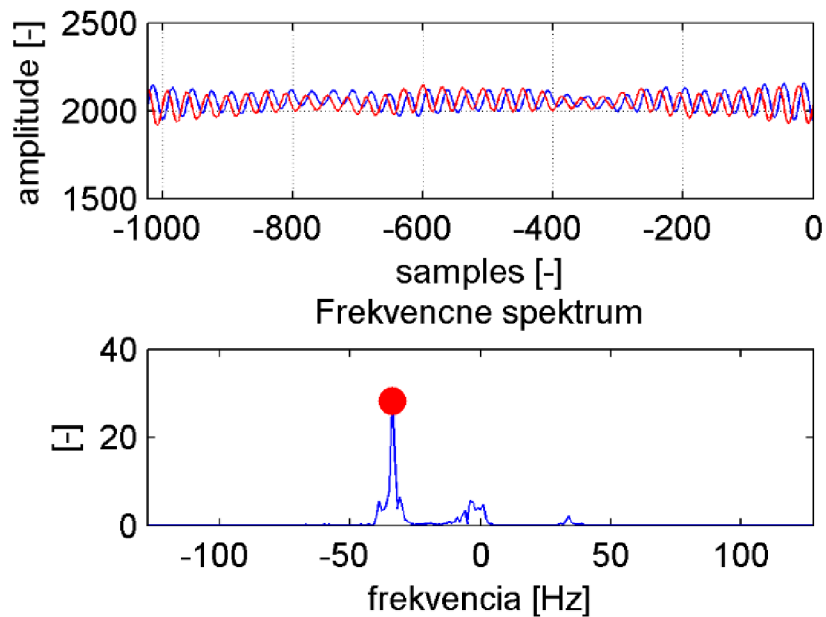


Obrázek 4.1: Radarový výstup a frekvenčné spektrum pri behu športovca.

venčného spektra a vyhľadanie majoritnej frekvencie zastúpenej vo výslednom spektre. Jednotlivé kanály I a Q je najlepšie spojiť do jedného komplexného signálu a nad ním aplikovať rýchlu Fourierovú transformáciu. Komplexný signál tak dáva výhodu jednoduchšieho určenia smeru, ktorým sa objekt pohybuje, pričom nie je potrebné ďalšie prepočítavanie výsledných frekvencií po aplikovaní samotnej transformácie. Využitie tejto transformácie nám prevedie signál z časovej do frekvenčnej domény a tým získanie frekvenčného spektra, k čomu nám napomáha funkcia *fft*. Pre prehľadnejší výstup je ideálne použiť funkciu *fftshift*, ktorá slúži na prehodenie hodnôt záporných a kladných polovic na výstupe Fourierovej transformácie.

Kombináciou funkcií *find* a *max* určíme vo výslednom frekvenčnom spektre dominantnú frekvenciu. Rôzne výsledky pri spracovaní dát testovacích súborov pri šprinte k radaru a kope lopty smerom od radaru na obrázkoch 4.1 a 4.2. Výslednú relatívnu rýchlosť dosiahneme len dosadením výstupnej frekvencie do vzťahu 3.4 na strane 21.

Využitím ďalších funkcií programu Matlab ako, vykreslenie rôznych časových priebehov a spektrogramov umožňuje zobrazenie spracovávaného signálu, ktoré slúži na sprehľadnenie celého priebehu spracovania a napomáha ku kontrole korektnosti aplikovaných metód nad týmto signálom.



Obrázek 4.2: Radarový výstup a frekvenčné spektrum pri odkope lopty.

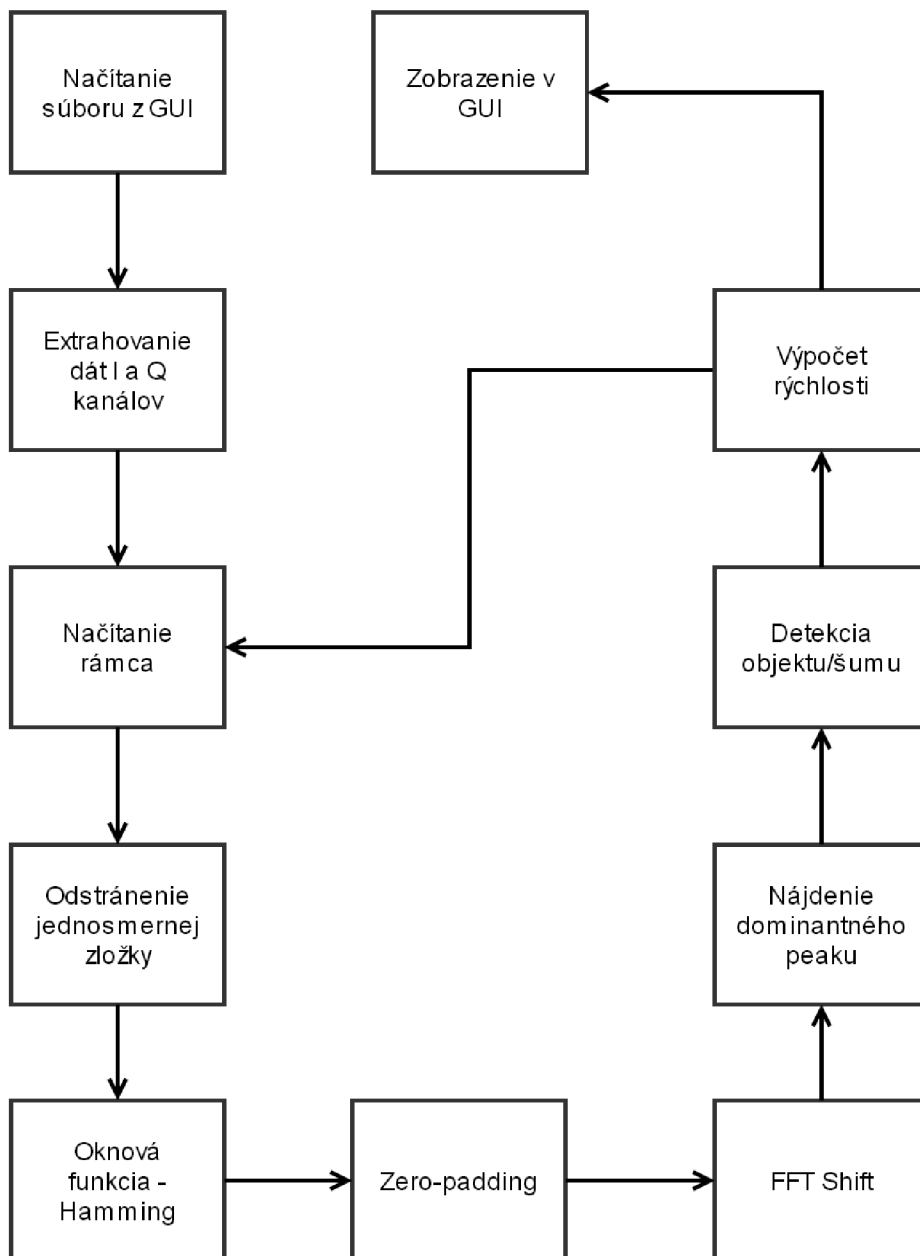
4.2 Návrh a implementácia v C++

Návrh aplikácie ako aj samotná implementácia je inšpirovaná výpočtnými funkciami a postupmi aplikovanými v predošlom návrhu v Matlabe. Ako implementačný jazyk bol pre jeho rozširiteľnosť a patričnú znalosť zvolený jazyk C++ s knižnicou pre grafickú nadstavbu Qt. Jedná sa o jednu z najpopulárnejších multiplatformných knižníc pre vytváranie programov s grafickým prostredím.

Pri výpočtoch Fourierovej transformácie bola využitá knižnica FFTW3, dostupná na oficiálnych stránkach <http://www.fftw.org>. Bola použitá verzia 3.3.4, ktorá je schopná pracovať pod OS Unix ako aj pod systémom Windows. Aplikácia bola tvorená pod operačným systémom Ubuntu 14.04, no jej výsledná podoba je prenositeľná na ostatné platformy. Postup implementácie a následný beh programu sa riadi blokovou schémou návrhu aplikácie, ktorú je možné vidieť na obrázku 4.3.

Projekt aplikácie obsahuje 2 základné triedy `Rychlost` a `Widget`, ktoré spolu úzko spolupracujú na základe zasielania signálov o vykreslení rýchlosti vo vytvorenom užívateľskom rozhraní. Po zadaní súboru užívateľom v grafickom prostredí je spustené vlastné vlákno, implementované v triede `Vlakno`, ktoré beží v cykle až do samotného konca postupného spracovania celého vstupného súboru. V priebehu života vlákna sú postupne načítavané rámce o veľkosti 1024 hodnôt, predávané výpočetnej metóde. Riadiaca výpočetná metóda obsahuje implementované postupy spracovania signálu z kapitoly 3.

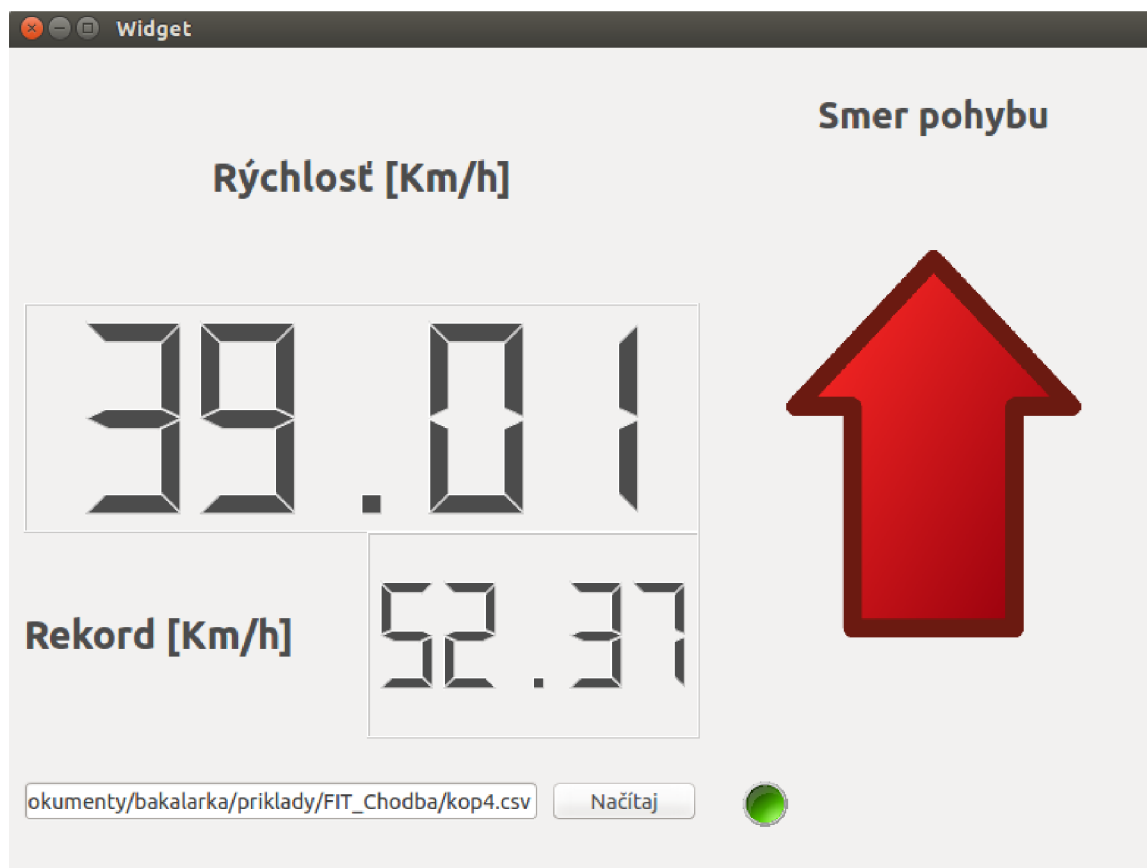
Na výstupe metódy je pred vykreslením rýchlosti obsiahnutej v jednom rámci potrebné ešte overiť, či sa náhodou nejedná o nejaký nežiadúci jav, šum. Ak je zistené, že daný rámec neobsahuje žiadny detekovaný objekt s vlastnou rýchlosťou, tak sa hodnota jednoducho zahodí a k vykresleniu nedochádza. Nastáva návrat do bodu ďalšieho načítania rámca a opakovanie príslušných metód. Ale ak bol objekt vyhodnotený ako vyhovujúci, použije sa a jeho príslušná hodnota o rýchlosti je vykreslená na LCD displeji. V priebehu spracovania



Obrázek 4.3: Bloková schéma návrhu behu aplikácie.

signálu sa na užívateľskom rozhraní zobrazuje blikajúca ikona, ktorá signalizuje aktívny stav. V aplikácii sú na displeji zobrazované rýchlosti aktuálne spracovávaných dát. Aplikácia obsahuje aj ďalší displej s uloženou hodnotou o dosiahnutom rýchlostnom rekorde v danej nahrávke. Pre lepšiu informatívnosť a prehľadnosť je taktiež zobrazovaný smer pohybu objektu, čo postačuje na to, aby sa displej vykresľoval len s kladnými hodnotami.

Používateľovi sú pre jednoduchosť používania aplikácie skryté nastavenia rôznych hodnôt a premenných, tie sú po konzultácii s vedúcim práce, pánom Ing. Maršíkom a samotnom testovaní uložené v aplikácii napevno. Jedinou prácou užívateľa je tak zadanie správneho súboru na jeho analýzu. Ukážka navrhutej aplikácie, zachytenej pri vyhodnocovaní rýchlosti testovacieho súboru, sa nachádza na obrázku 4.4 .



Obrázek 4.4: Výsledná podoba grafického užívateľského rozhrania pri priebežnom spracovávaní signálu. Súčasťou aplikácie je aj informácia o rekordnej hodnote a smere pohybu objektu.

Kapitola 5

Vyhodnotenie

Kapitola sa venuje výslednému testovaniu implementovanej aplikácie s použitými radarovými modulmi K-MC1 a K-MC4. Vyhodnocovanie bude prebiehať na uložených nameraných dátach so zameraním na rôzne športové činnosti. Testovanie bolo prevedené na športovom ihrisku s využitím futbalových lôpt, ako aj samotných športovcov.

Dáta boli postupne merané v kategóriách behu, šprintu, prihrávk a striel na stanovený cieľ. Detekcia objektov bola zameraná na vzdialenostný rozsah 0–40 metrov. Vyhodnotenie rýchlostí v implementovanej aplikácii je porovnávané s výstupmi z Matlabu a dodanej výpočetnej aplikácie od vedúceho práce, pána Ing. Maršíka.

5.1 Testovanie aplikácie

Pre jednotlivé kategórie bolo nameraných niekoľko nahrávok pre určenie presnosti vyhodnocovania aplikácie. Presnejších hodnôt sa dosahovalo pri dlhších nahrávkach, pri ktorých bol detekovaný väčší počet rámcov ako vyhovujúcich a výsledná rýchlosť sa tak dostatočne priblížila skutočnej rýchlosti objektu. Test určenia smeru pohybu objektu bol najzákladnejším testom a vo všetkých nahrávkach bol tento smer správne vyhodnotený.

Športovci

V prvej časti boli dáta testované so zameraním na športovcov pri situácii rýchlej chôdze, behu a šprintu smerom k radaru. Súčasťou vyhodnotenia je tabuľka 5.1 porovnania maximálnych rýchlostí z výstupov aplikácií. Prvé meranie prebiehalo na radarovom module K-MC1 a test bol zameraný na pohyb jedného objektu.

| Typ merania | Matlab [km/h] | Aplikácia Šport [km/h] |
|----------------------|---------------|------------------------|
| Chôdza - športovec 1 | 15.34 | 15.82 |
| Beh - športovec 1 | 18.13 | 17.73 |
| Šprint - športovec 1 | 24.1 | 25.37 |
| Chôdza - športovec 2 | 13.14 | 13.37 |
| Beh - športovec 2 | 18.63 | 23.73 |
| Šprint - športovec 2 | 25.2 | 27.28 |

Tabuľka 5.1: Výsledky maximálnych rýchlostí športovcov pri meraní s radarovým modulom K-MC1.

Z tabuľky je vidieť, že výstupy z oboch aplikácií sa odlišujú len minimálne. Väčší rozdiel v nameraných rýchlostiach sa objavuje len pri nahrávke behu druhého športovca, ktorý mohol byť ovplyvnený rýchlejšim pohybom časti tela športovca, ako napríklad premávanie rukou. Matlab dokázal túto hodnotu správne odfiltrovať a zahodiť. Na detekovanie chybných použitých hodnôt poukazuje tabuľka 5.2.

| Typ merania | Počet detekovaných hodnôt | Chybné detekovaných hodnôt | Chyba [%] |
|-------------|---------------------------|----------------------------|-----------|
| Chôdza | 481 | 13 | 2.7 |
| Beh | 337 | 10 | 2.97 |
| Šprint | 214 | 12 | 5.94 |

Tabuľka 5.2: Tabuľka chybovosti vyhodnocovania rýchlosti pri meraní športovcov.

V zobrazenej tabuľke je vidieť, že pri pomalších cieľoch je počet detekovaných hodnôt vyšší ako pri rýchlejšom objekte. Z toho dôvodu narastá percento chybovosti pri chybné detekovanej hodnote, čo má v prípade malého počtu detekovaných hodnôt väčší dopad na určovanie priemernej rýchlosti objektu.

Loptové meranie

Radarové meranie prebehlo opäť s modulom K-MC1. K dispozícii bola aj dodaná aplikácia s meraním maximálnej rýchlosti za určitý časový úsek, s ktorou boli, spoločne s výstupmi z Matlabu, výsledné rýchlosti porovnávané.

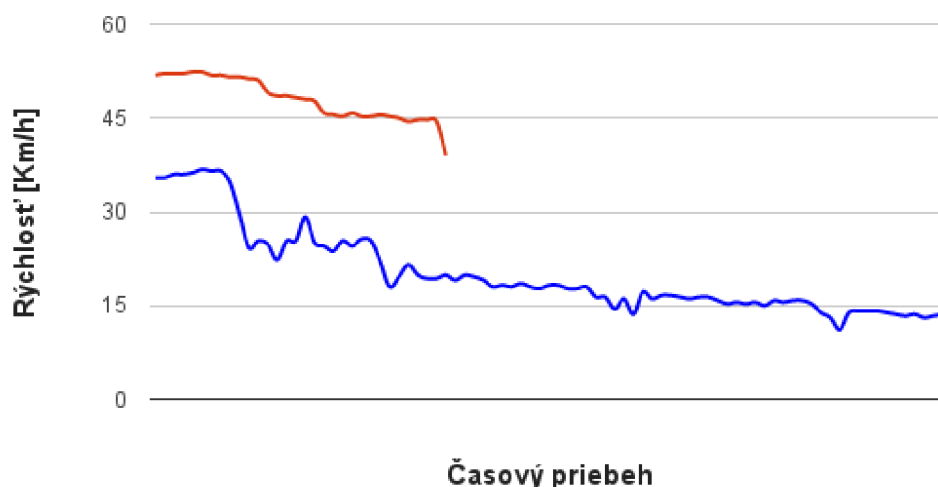
Druhé meranie bolo zamerané na menšie objekty, v našom prípade futbalové lopty. Z bezpečnostného hľadiska bol zvolený opačný smer merania ako v predchádzajúcom prípade, čiže od radaru. Jednotlivé pokusy boli zaznamenávané kolmým smerom od radaru s nulovým natočením. Porovnanie rekordných rýchlostí znázorňuje tabuľka 5.3.

Časový priebeh vykresľovania rýchlosti strely a prihrávky približuje obrázok 5.1. Zatiaľ čo pri strele je časový priebeh kratší ale zato plynulejší ako pri prihrávke po zemi, kde vplyvom možných odrazov vznikajú odchyľky od plynulého spomalenia. Prihrávka stratila vplyvom spomalenia trávnikom, viac ako polovicu svojej pôvodnej detekovanej rýchlosti.

| Typ merania | Matlab [km/h] | Aplikácia Šport [km/h] | Dodaná aplikácia [km/h] |
|-------------|---------------|------------------------|-------------------------|
| Prihrávka 1 | 17.53 | 37 | 37 |
| Prihrávka 2 | 37.25 | 36.82 | 38 |
| Strela 1 | 56.97 | 57.3 | 58 |
| Strela 2 | 59 | 58.93 | 60 |
| Strela 3 | 50.4 | 52.37 | 53 |
| Strela 4 | 57 | 57.01 | 58 |

Tabuľka 5.3: Výsledky maximálnych rýchlostí pri testovaní odkopov lopty od radaru.

Rýchlosti z tabuľky sú takmer identické s referenčnými hodnotami dodanej aplikácie, ktorej rýchlosti sú zaokrúhlené na celé čísla. Tabuľka 5.4 znázorňuje presný počet chybných hodnôt detekované ako vyhovujúce v 2 kategóriách.



Obrázek 5.1: Priebeh vykresľovania aktuálnych rýchlosti objektov, červenou značená strela a modrou prihrávka po zemi.

| Typ merania | Počet detekovaných hodnôt | Chybne detekovaných hodnôt | Chyba [%] |
|-------------|---------------------------|----------------------------|-----------|
| Prihrávky | 190 | 4 | 2.1 |
| Strely | 112 | 10 | 5.36 |

Tabulka 5.4: Chybovosť vykresľovaných hodnôt v aplikácii pri zameraní sa na futbalové lopty.

Pripojenie modulu K-MC4

Následujúce meranie prebehlo s oboma modulmi pripojenými naraz. Jednotlivé nahrávky pokusov boli testované na určovanie rýchlosti pod uhlami 0° a 30° pri prihrávkach a strelách. Testovacie pokusy pri nulovom natočení radarových modulov vykazovali rovnaké hodnoty medzi sebou a s priblíženosťou k dodanej aplikácii ako v predošlých testoch.

Rozličné rýchlostné výsledky boli dosiahnuté až pri uhlovom natočení modulu K-MC4, ktorý je vyhovujúci pre merania pod uhlom. Test bol zameraný na správne určenie kosínusového uhla a prepočítanie výslednej relatívnej rýchlosti. Modul K-MC1 bol natočený pod 0° uhlom a slúžil na porovnanie rýchlosti s natočeným modulom. Nasledujúca tabuľka 5.5 popisuje rýchlostné rekordy pri natočení modulu pod uhlom 30° .

| Typ merania | K-MC1 [km/h] | K-MC4 [km/h] | Dodaná aplikácia [km/h] |
|--------------------------|--------------|--------------|-------------------------|
| Prihravka 1 - 30° | 39.6 | 43.2 | 41 |
| Prihravka 2 - 30° | 43 | 40.2 | 45 |
| Strela - 30° | 46.8 | 50.4 | 48 |

Tabulka 5.5: Výsledné rekordné hodnoty pri meraní s modulom K-MC4 pod uhlom 30° .

5.2 Zhodnotenie výsledkov

Aplikácia bola spočiatku testovaná na určenie veľkosti jedného rámca. Namerané dáta boli testované na hodnotách 512 a 1024. Výsledné rekordné rýchlosti so zameraním sa na športovcov a futbalové lopty boli takmer identické vo všetkých testoch. Líšil sa len počet spracovaných a vykreslených hodnôt na displeji a tým aj priemerná rýchlosť objektu v nahrávke. Pri veľkosti rámca 512 pri meraní športovcov bol počet vykresľovaných hodnôt zbytočne vysoký a spomaľoval priebeh aplikácie. Ako vyhovujúca veľkosť bola zvolená hodnota 1024.

Pri vyhodnotení rýchlostí použitých modulov K-MC1 a K-MC4 pod nulovým uhlom podáva aplikácia veľmi presné hodnoty s minimálnym rozdielom s porovnávanou aplikáciou. Chybovosť určenia vyhovujúcich hodnôt sa pri menších rýchlostiach pohybuje na hranici približne 3%. Ak je rýchlosť vyššia, počet chybne vykreslených hodnôt je približne 5,5%. Zapríčiňuje to menší počet detekovaných rámcov oproti pomalším rýchlostiam.

V teste s pripojením modulu K-MC4 a natočením 30° s osou pohybu objektu boli namerané rýchlosti zobrazované s miernym rozptylom, ale napriek tomu blízko zodpovedali hodnotám porovnaným s referenčnou aplikáciou. Rozdiel v rýchlosti bol približne ± 3 km/h.

Kapitola 6

Záver

Cieľom práce bolo vybrať vhodný algoritmus pre extrakciu informácie o rýchlosti objektu z radarového signálu s následnou implementáciou. So zameraním sa na športové odvetvie s cieľom merať rýchlosť športovcov a samotných projektilov bol vybraný algoritmus využívajúci Dopplerov jav. Výsledná aplikácia bola testovaná pomocou radarov K-MC1 a K-MC4 pracujúcich na režime nepretržitého vysielania a prijímania signálu.

Po zoznámení sa s hlavnými princípmi radaru (kapitola 2) a naštudovaní problematiky spracovania radarového signálu (postup popísaný v kapitole 3) bola navrhnutá a následne v jazyku C++ implementovaná výsledná aplikácia na meranie rýchlosti z nameraných dát. Aplikácia bola otestovaná na serii nazbieraných dát, ktoré zodpovedali situáciám vyskytujúcim sa v tréningovom prostredí športovcov. Vyhodnotenie nameraných dát obsahuje kapitola 5.

Navrhnutá aplikácia je spôsobilá na bežné využívanie pri tréningoch športovcov, pričom využíva pevne nastavené hodnoty pre jednoduchú a intuitívnu obsluhu aplikácie. Výsledky rekordných hodnôt v nahrávkach sa podarilo určiť s presnosťou 1 km/h. Menšie rozdiely sa objavili až pri testovaní pod uhlom, kedy sa rýchlosť výsledných hodnôt líšila v rozmedzí 2-5 km/h.

Ako pokračovanie práce navrhujem zdokonaľiť funkčnosť aplikácie pre použitie v real-time situáciách a navyše zvýšiť presnosť pri určení rýchlosti objektu pod určitým uhlom. Zaujímavé by bolo zdokonalenie detekcie viacerých predmetov pred radarom, bolo by tak treba vytvoriť algoritmus, ktorý by za behu aplikácie nastavoval úroveň hodnoty vyhovujúcich objektov a vyfiltroval len dáta vhodné k určeniu správnej rýchlosti.

Literatura

- [1] Brandwood, D.: *Fourier Transforms in Radar and Signal Processing*. Artech House, 2003, ISBN 1-58-053174-1.
- [2] GmbH, R. M.: K-MC4 MONOPULSE RADAR TRANSCEIVER. [online], 2013 [cit. 2015-03-06].
URL http://www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/datasheets/Datasheet_K-MC4.pdf
- [3] GmbH, R. M.: K-MC1 RADAR TRANSCEIVER. [online], 2013 [cit. 2015-04-08].
URL http://www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/datasheets/Datasheet_K-MC1.pdf
- [4] Hermann Rohling, M.-M. M.: Waveform Design Principles for Automotive Radar Systems. CIE International Conference on Radar, 2001, s. 1–4.
- [5] Hicks, J. L.: Radar Principles. [online], 1998 [cit. 2014-12-30].
URL <http://www.rfcafe.com/references/electrical/NEETS-Modules/NEETS-Module-18-1-11-1-20.htm>
- [6] Igor V. Komarov, S. M. S.: *Fundamentals of Short-Range Fm Radar*. Artech House, 2003, ISBN 1-58-053110-5.
- [7] Kusala, J.: Radarová encyklopedie. [online], 2008 [cit. 2014-12-30].
URL http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/obsah.htm
- [8] Mahafza, B. R.: *Radar Signal Analysis and Processing Using MATLAB*. Chapman and Hall/CRC, 2008, ISBN 1-42-006643-9.
- [9] Maršík, L.: *Accelerated and Embedded Radar Signal Processing Algorithms*. thesis statement, FIT VUT v Brně, 2012.
- [10] Nathanson, F. E.: *Radar Design Principles*. SciTech Publishing, druhé vydanie, 1999, ISBN 1-89-112150-2.
- [11] Parker, M.: Radar basics. [online], 2011 [cit. 2015-01-18].
URL http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1278808
- [12] Richards, M. A.: *Principles of Modern Radar: Basic Principles*. SciTech Publishing, 2010, ISBN 1-89-112152-9.
- [13] Ridenour, L. N.: *Radar system engineering*. McGraw-Hill, prvé vydanie, 1947, ISBN 1-25-882457-4.

- [14] Skolnik, M.: *Introduction to Radar Systems*. USA: The McGraw-Hill Companies, 1981, ISBN 0-07-057909-1.
- [15] Skolnik, M.: *Radar Handbook*. USA: The McGraw-Hill Companies, tretie vydanie, 2008, ISBN 0-07-148547-3.
- [16] Černocký, J.: Zpracování řečových signálu, studijní opora. FIT VUT v Brně. 2006.
- [17] Wolff, C.: Radar Tutorial. [online], 2011 [cit. 2015-01-03].
URL <http://www.radartutorial.eu/index.en.html>

Příloha A

Obsah DVD

K práci je priložené DVD, ktoré je rozdelené do zložiek. Jednotlivý popis zložiek je uvedený v základnom priečinku, v súbore README. DVD obsahuje zložky:

- **Latex** - Obsahuje zdrojové súbory tohto dokumentu spolu s jeho výslednou podobou vo formáte PDF.
- **Aplikácia** - V tejto zložke sa nachádzajú všetky zdrojové kódy implementovanej aplikácie.
- **Nahrávky** - Zložka obsahuje súhrn všetkých nahraných dát z radaru použitých pri testovaní aplikácie.
- **PDF** - V zložke sa nachádza výsledná podoba tohto dokumentu a taktiež manuál k inštalácii aplikácie vo formáte PDF.

Příloha B

Manual

Návod na inštaláciu

Výslednú aplikáciu je možné spustiť v programe Qt Creator. K funkčnosti aplikácie je potrebné mať nainštalovaný balíček s knižnicou **FFTW** pre spracovanie FFT. V prípade tejto práce bola použitá verzia 3.3.4, ktorá je voľne dostupná na oficiálnych stránkach <http://www.fftw.org>. Následne je potrebné upraviť cestu v súbore bakalarka.pro:

```
LIBS += -lfftw3  
INCLUDEPATH += CESTA_K_BALICKU/fftw
```

Po úprave by mala byť aplikácia bez problémov preložiteľná a spustiteľná. Obsluha programu je popísaná v sekcii 4.2. Aplikácia bola implementovaná a testovaná na PC s vybavením: Intel Core i3-370M s taktovaciu frekvenciou 2,4 GHz a 4 GB RAM DDR3.