



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 PRO RYCHLOSTNÍ DISCIPLÍNY

RADAR-BASED MEASUREMENT FOR SPEED SPORT DISCIPLINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN LACH

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ MARŠÍK

BRNO 2016

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

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2015/2016

**Zadání bakalářské práce**

Řešitel: **Lach Martin**

Obor: Informační technologie

Téma: **Radarové měření pro rychlostní disciplíny**

**Radar-Based Measurement for Speed Sport Disciplines**

Kategorie: Zpracování obrazu

Pokyny:

1. Nastudujte literaturu související se zpracováním radarového signálu a s metodami pro odhad rychlosti. Zaměřte se na sportovní disciplíny jako je sjezdové lyžování, rychlobruslení, cyklistika a další rychlostní disciplíny.
2. Po dohodě vytipujte algoritmus vhodný pro extrakci informace o rychlosti z radarových dat.
3. Navrhněte detektor pro měření rychlosti v rámci výše zmíněných sportovních disciplín.
4. Implementujte funkční program navržený v předchozím bodě.
5. Nasbírejte reálná data na zapůjčeném HW v autentickém prostředí. Na těchto datech proveďte sérii vhodných testů pro zjištění spolehlivosti a přesnosti systému.
6. Diskutujte dosažené výsledky a navrhněte 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

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

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

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

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

Vedoucí: **Maršík Lukáš, Ing.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2015

Datum odevzdání: 18. května 2016

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



doc. Dr. Ing. Jan Černocký  
vedoucí ústavu

## Abstrakt

Tato práce se zabývá radarovým měřením rychlosti sportovců. Cílem práce je implementovat detektor, který snímá sportovce, měří a zobrazuje jejich rychlost. Dokáže rozpoznat jednotlivé sportovce, určit jejich maximální rychlost a směr. Výstupem práce je mimo jiné knihovna v jazyce C sloužící k analýze radarových dat. Práce se zabývá vysvětlením pojmu radar. Popisuje různé typy radarů, jejich funkci a vlastnosti. Dále jsou vysvětleny pojmy důležité pro zpracování signálu. Následuje analýza problému a popis implementace. V závěru jsou testy a vyhodnocení úspěšnosti.

## Abstract

This thesis is focused on radar speed measurement of sportsmen. The aim is to implement system which determines and visualizes speed of sportsman. The outcome of this work is among other library in C for analysis of radar data. The work deals with explanation of radar. It describes the different types of radars, their functions and characteristics. The following chapter explains the terms important for signal processing. Next are analysis of the problem and description of implementation. At the end of the thesis are tests and evaluation of success.

## Klíčová slova

Radar s kontinuální vlnou, zpracování signálu, Dopplerův jev, měření rychlosti

## Keywords

Continuous wave radar, signal processing, Doppler effect, speed measurement

## Citace

LACH, Martin. *Radarové měření pro rychlostní disciplíny*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Maršík Lukáš.

# Radarové měření pro rychlostní disciplíny

## 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.

.....

Martin Lach  
16. května 2016

## Poděkování

Děkuji panu Ing. Lukášovi Maršíkovi za vedení mé práce, přínosné rady a zapůjčení radarového systému.

© Martin Lach, 2016.

*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

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>O radarech</b>	<b>3</b>
2.1	Vysvětlení důležitých pojmů . . . . .	5
2.2	Radary s kontinuální vlnou . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Zpracování signálu</b>	<b>9</b>
3.1	Diskrétní Fourierova transformace . . . . .	9
3.2	Vlastnosti konkrétních radarových modulů . . . . .	11
3.3	Prototypy algoritmů . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Návrh detektoru</b>	<b>16</b>
4.1	Analýza . . . . .	16
4.2	Vlastnosti implementovaného programu . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Implementace v C</b>	<b>21</b>
5.1	Popis datových struktur . . . . .	21
5.2	Zajímavé části algoritmu . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Sběr dat a testování</b>	<b>26</b>
6.1	Testy . . . . .	26
6.2	Výsledky . . . . .	29
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>30</b>
	<b>Literatura</b>	<b>31</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Tato práce se zabývá radarovým měřením rychlosti sportovců. Zatímco zvyšování bezpečnosti v silniční dopravě je vnímáno jako samozřejmost, u sportu je to téma posledních let. Rychlosti lyžařů se s upravenými sjezdovkami a stále pokročilejší technikou zvyšují. Byla zavedena povinnost lyžovat s přilbou, objevila se FIS pravidla bezpečné jízdy. V budoucnosti se třeba u cedulí „Zpomal!“ objeví preventivní radary, které budou lyžaře informovat o vysoké rychlosti. Trend moderní doby je také omezování automobilové dopravy ve městech. Ve velkém se budují cyklostezky, které jsou hojně využívány jak cyklisty, tak jinými sportovci. Pro zvýšení atraktivity mohou přispět radary, které zobrazují rychlost projíždějících sportovců a ti proti sobě mohou soupeřit.

Radary se začaly ve velkém využívat během druhé světové války. A to pro vojenské účely, pro detekci cílů a navigaci. Díky svým vlastnostem a snižování cen si postupem času našly cestu i do civilní oblasti.

V kapitole 2 se zabývám vysvětlením pojmu radar. Popisuji různé typy radarů, jejich funkci a vlastnosti. Dále se zabývám pojmy důležitými pro zpracování signálu a detailním popisem vlnových radarů, se kterými jsem dále v práci pracoval.

Kapitola 3 začíná popisem vlastností analyzovaného signálu. Následuje pohled na konkrétní modely radarů, se kterými jsem pracoval. Vytvořil jsem několik programů v matlabu, na kterých jsem zkoušel různé přístupy.

Kapitola 4 je zaměřena na problémy měření sportovců radarem. V podkapitole Analýza jsou shrnuta praktická omezení radarového měření, porovnání se současným řešením a možná podoba řešení.

V kapitole 5 popisuji výsledný program, jeho součásti a funkce. Zvláště se věnuji vysvětlení datových struktur, které jsou zásadní pro práci s implementovanou knihovnou.

V kapitole 6 se zabývám sběrem dat v reálných podmínkách, metodikou testů a jejich výsledky.

## Kapitola 2

# O radarech

Radary se v dnešní době používají ve vojenské i civilní oblasti. Můžeme je najít téměř ve všech oblastech. Využívají se na silnicích pro měření rychlosti, v automobilech pro aktivní tempomaty a nouzové brždění, v letectví pro řízení letového provozu a měření výšky nad povrchem, ve vojenství pro vyhledávání cílů, nebo včasné varování. Informace byly převzaty z [9] a [6].

Radary pracují s elektromagnetickými vlnami o vlnových délkách od desetin po stovky centimetrů (0,2 – 150 cm). Tyto vlny se šíří vzduchem konstantní rychlostí – blízké rychlosti světla. Když narazí na překážku, jsou odraženy a dají se opět zachytit. S vhodnou anténou je možné signál přesně směřovat. Radary podle typu měří několik veličin. Například dobu, za kterou se vyslaný puls odrazil a vrátil zpět, změnu frekvence, nebo změnu fáze vln. Výhodou radarů je, že nejsou závislé na světle, mohou tedy bez omezení fungovat ve dne i v noci.

Vývoj technologie radaru nebyl přímočarý. Na jeho vynalezení se podílelo množství vědců z celého světa. Velký pokrok ve vývoji přinesla druhá světová válka. Zde uvádím přehled největších milníků v historii radarů.

- 1865 Skotský fyzik J. C. Maxwell vytvořil teorii elektromagnetického pole, ve které předpověděl existenci elektromagnetického vlnění šířícího se prostorem rychlostí světla.
- 1886 Německý fyzik Heinrich Rudolf Hertz začal provádět pokusy s jiskrovým výbojem, při nichž objevil elektromagnetické vlnění předpovězené Maxwellovou teorií.
- 1897 Italský vynálezce G. Marconi začal využívat elektromagnetické vlnění k přenosu signálu od vysílače k přijímači.
- 1904 Německý fyzik Ch. Huelsmeyer prováděl pokusy s odrazem rádiových vln od lodí na Rýnu.
- 1927 Německý fyzik H. Hollmann při pokusech s odrazem rádiových vln od lodí a letadel poprvé použil mikrovlny. Během 2. světové války se podílel na konstrukci německých radarů.
- 1935 Skotský elektrotechnik sir R. Watson-Watt zkonstruoval první prakticky použitelný přístroj pro rádiovou detekci letadel pomocí mikrovln. Stal se tak skutečným vynálezce radaru.

- 1939 Prakticky současně zkonstruovali H. Boot a J. Randall ve Velké Británii a H. Hollmann v Německu magnetron - speciální elektronku, která se brzy stala nejrozšířenějším zdrojem mikrovln pro radary.
- 1940 Radary se začaly v široké míře používat k navigaci lodí a letadel, k pátrání po nepřátelských lodích a letadlech, k řízení palby dělostřelectva, nebo jako všestranné palubní radary stíhaček a bombardérů. Jsou vyvíjeny v USA, Rusku, Německu, Francii a Japonsku.

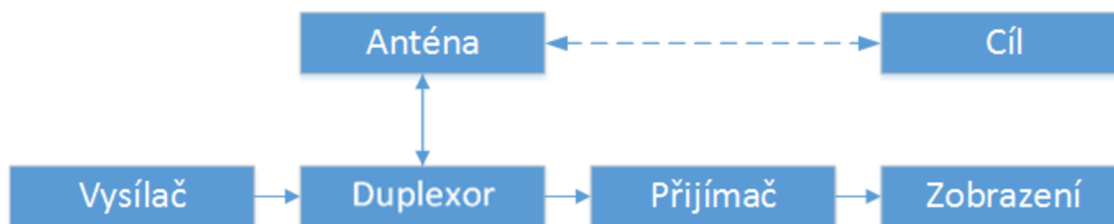
### Rozdělení radarů

- Primární – vysílač i přijímač jsou na jednom místě. Vyhodnocují odraz vlastního vyslaného signálu. Signál se odráží do všech směrů a zpět k radaru se dostane pouze zlomek jeho energie. Primární radary dělíme na:
  - Pulzní – tyto radary se nejčastěji používají k lokalizaci lodí, nebo letadel. Činnost probíhá v periodách. Střídá se fáze vyslání, kdy je vyzářen krátký impuls, a přijímání, kdy radar zachytává odrazy tohoto impulsu. Podle doby od vyslání impulsu k zachycení jeho odrazu se určí vzdálenost od radaru. Touto technologií je možné zachytit více objektů, které jsou v různé vzdálenosti. Používají jednu směrovou anténu, díky které je možné přesně určit polohu objektu.
  - Vlnové – tyto radary mohou sloužit k určování rychlosti, nebo jako pohybová čidla. Radar vysílá nepřerušeno a také neustále přijímá odezvu. Disponuje nejméně dvěma anténami. Jedna slouží pro vysílání, druhá pro příjem. Antény jsou oddělené, aby nedocházelo ke zpětné vazbě. Na rozdíl od pulzních radarů zde není možné jednoduše určit čas mezi vysláním a příjmem signálu, tím pádem ani vzdálenost objektu.
    - \* Bez modulace – vysílají vlnu o stálé frekvenci a mohou určit pouze rychlost jednoho objektu.
    - \* Modulované – mění frekvenci vysílané vlny. To umožňuje vypočítat jak rychlost objektu, tak i vzdálenost. Je možné zachytit více objektů.
- Sekundární – nepřijímají odezvu vlastního signálu. K funkci potřebují aktivní odpovídač. Mohou fungovat pouze ve spolupráci s další jednotkou. Využívají se při řízení letového provozu, kdy pozemní radar vyšle signál a pokud ho jednotka v letadle zachytí, odešle odpověď. Ta je na zemi zpracována. Nevýhoda je, že radar *vidí* pouze objekty se zapnutým odpovídačem. Výhoda je, že do odpovědi se dají zakódovat dodatečné informace, jinak radarem nezjistitelné – např. označení letadla, výška, rychlost, směr, ...

### Součásti radaru

Schéma pulzního radaru je na obrázku 2.1. Tento typ radaru byl sestaven jako první a všechny ostatní z něj vychází. Vysílač vytvoří krátký vysoce výkonný puls, který je přes duplexor přiveden k anténě. Ta přemění energii na elektromagnetické vlny, které se šíří prostorem. Jak je vidět, radar využívá pouze jednu anténu. Duplexor slouží k časovému dělení. Při vysílání pulsu je s anténou spojen vysílač a obráceně při přijímání přijímač. Tím se zabráňuje zpětné vazbě a je zajištěna ochrana citlivé elektroniky přijímače. Zobrazovač převádí signály do vizuální podoby snadno pochopitelné uživatelem.



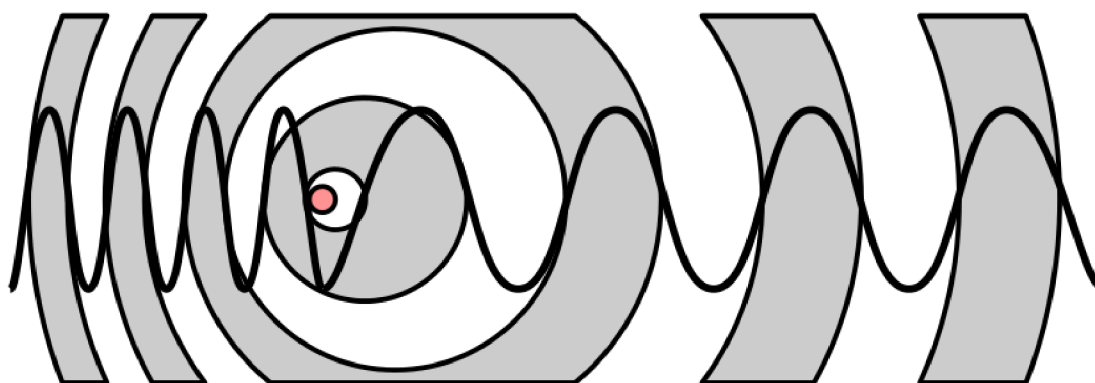


Obrázek 2.1: Schéma pulzního radaru

## 2.1 Vysvětlení důležitých pojmů

### Dopplerův jev

Při zjišťování rychlosti se počítá s Dopplerovým jevem. Frekvence se mění podle vzájemné rychlosti přijímače a zdroje signálu. Zobrazeno na obrázku 2.2. Nejznámějším příkladem tohoto jevu je měnící se tón sirény pohybujícího se vlaku, nebo klaksonu jedoucího auta. Vztah mezi pozorovanou frekvencí  $f$  a vyslanou frekvencí  $f_0$  je dán rovnicí 2.1, kde  $c$



Obrázek 2.2: Znázornění frekvence, zdroj se pohybuje doleva. Zdroj obrázku [8]

je rychlost vln,  $v_r$  rychlost pozorovatele a  $v_s$  rychlost zdroje. Pokud je měřená rychlost v porovnání s  $c$  zanedbatelně malá, vztah je možné zjednodušit na rovnici 2.2. Pro účely radarových měření nás zajímá pouze změna frekvence ( $\Delta f$ ), kterou vyjadřuje 2.3. Tato rovnice počítá se zdrojem signálu a jeho příjemcem, kteří se vůči sobě pohybují. U radaru jsou ale vysílač i přijímač umístěny na jednom místě. Signál je vyslán směrem od radaru a objektem je odražen nazpět, kde je zachycen přijímačem. Změna Dopplerovy frekvence tedy proběhne dvakrát, proto upravujeme vztah na konečnou rovnici 2.4.

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

$$f = \left(1 + \frac{\Delta v}{c}\right) f_0 \quad (2.2)$$

$$\Delta f = \frac{\Delta v}{c} f_0 \quad (2.3)$$

Předmět	pták	člověk	malá loď	auto	nákladní auto	koutový odraz
RCS [m <sup>2</sup> ]	0,01	1	10	100	200	20379

Tabulka 2.1: Radiolokační odrazná plocha běžných objektů

$$\Delta f = \frac{2\Delta v}{c} f_0 \quad (2.4)$$

## Radiolokační odrazná plocha – RCS

Převzato z [9].

Velikost cíle a jeho odrazivost energie radaru mohou být shrnuty do pojmu radiolokační odrazná plocha – RCS. Značí se  $\sigma$ . Udává se v m<sup>2</sup>, což značí, že se opravdu jedná o plochu. Kdyby se veškerá energie radaru, která dopadne na plochu cíle, odrazila rovnoměrně do všech směrů, pak by se RCS rovnala ploše kterou vidí vysílač. V praxi je část energie pohlcena a zbytek není odražen rovnoměrně do všech směrů. Proto je velmi složité RCS vypočítat a obvykle se určuje měřením. Radiolokační odrazná plocha závisí na:

- Geometrii objektu
- Směru ozáření radarem
- Vysílané frekvenci
- Použitých materiálech

Radiolokační odrazná plocha některých objektů je v tabulce 2.1.

## Maximální dosah radaru – radar range equation

Převzato z [9].

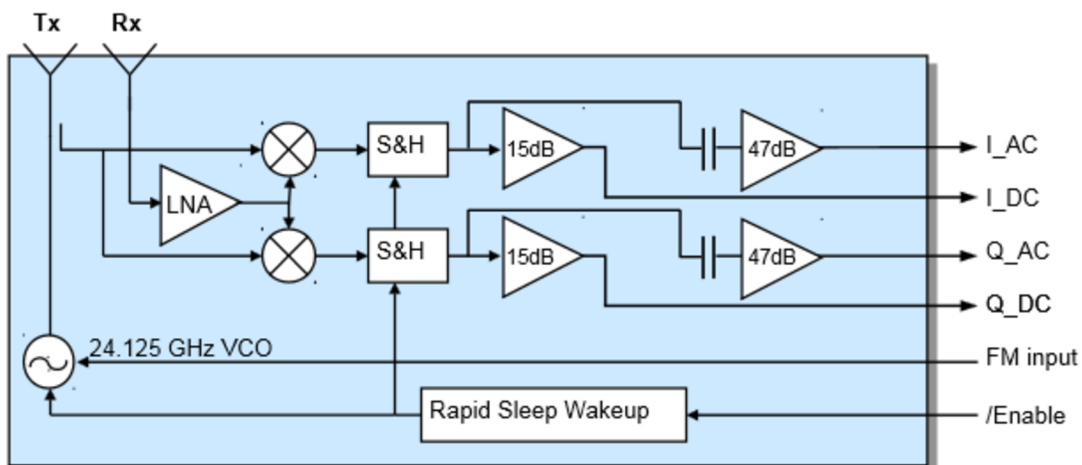
Známa rovnice 2.5 udává závislost vyslané energie, která je přenášena vlnami, na přijatých odrazech. Energie odraženého signálu vracejícího se do antény  $P_e$  závisí na vyslané energii  $P_s$ , vzdušné vzdálenosti cíle od radaru  $R$ , vlnové délce  $\lambda$ , zisku antény  $G$  a odrazivých vlastnostech cíle (radiolokační odrazná plocha  $\sigma$ ). Touto rovnicí se popisuje výkonnost radaru. Je známá jako radarová rovnice.

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_{emin} \cdot (4\pi)^3}} \quad (2.5)$$

## 2.2 Radary s kontinuální vlnou

V této práci budu vyhodnocovat data z vlnových radarů. O jejich funkci se tedy roze-  
píši podrobněji. Pracují ve frekvenčním pásmu K, které přibližně odpovídá frekvencím 20  
– 30 GHz. V České Republice toto pásmo nepodléhá zvláštním opatřením, ani žádným  
omezením. Na schématu 2.3 je zobrazen vlnový radar KMC-1. Anténou  $T_x$  je nepřetržitě  
vysílán signál generovaný oscilátorem. Anténa  $R_x$  slouží pro příjem odraženého signálu.  
Přímo v jednotce radaru je mixer  $\otimes$ , ve kterém se porovnává signál z oscilátoru s přijatým  
signálem. Výstupem je jejich rozdíl, viz rovnice 2.6.

$$f_d = f_{tx} - f_r \quad (2.6)$$



Obrázek 2.3: Schéma radaru KMC-1. Zdroj [4]

Výstup je tvořen párem kanálů  $I$  a  $Q$ . Na schématu 2.3 jsou dvě dvojice výstupů. Jedna z nich je více zesílená, ale to není pravidlem. V jednoduchých pohybových čidlech najdeme pouze výstup  $I$  – reálnou složku. Podle její frekvence rozeznáme pohybující se objekt. Není ale možné určit, zda se pohybuje směrem k radaru, nebo od něj. U pokročilejších radarů se pracuje i se složkou  $Q$  – imaginární. Její fáze je od  $I$  posunutá o  $0,5\pi$ . Bez modulace je rychlost vypočítána přímo z dominantní frekvence signálu pomocí Dopplerova jevu, viz rovnice 2.4. Při modulaci je nutné Dopplerovu frekvenci vypočítat.

## Modulace

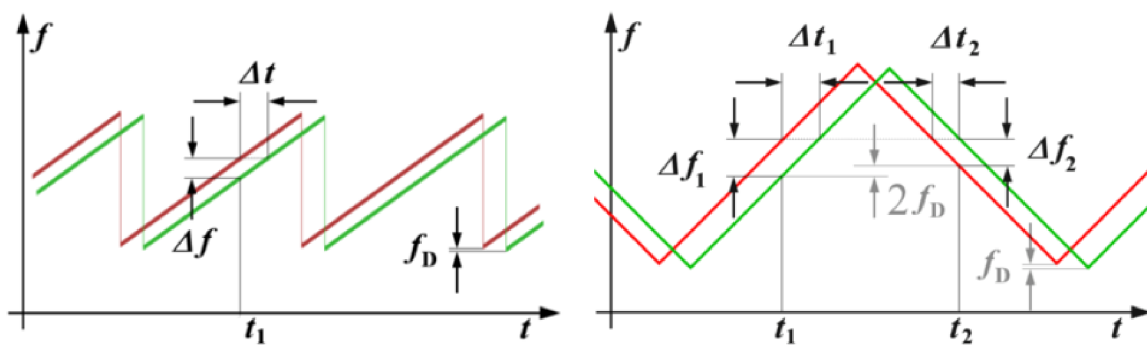
Při modulaci se vysílaný signál v čase periodicky mění. V radarech se používá výhradně změna frekvence  $FM$ , ale je možné měnit i amplitudu  $AM$ . Podle rozdílu frekvencí bývá možné určit dobu, po které je přijat odražený signál. Modulaci je možné provádět několika způsoby. Dva nejpoužívanější jsou:

- Pilový zub, na obrázku 2.4. Změna frekvence je způsobena jednak vzdáleností cíle a také jeho rychlostí – Dopplerovou frekvencí. Při tomto druhu modulace není možné rozlišit, co změnu frekvence způsobilo. Používá se pouze tam, kde je zanedbatelná vzájemná rychlost radaru a objektů. Vzdálenost se vypočítá podle rovnice 2.7, kde  $T_m$  je perioda modulace a  $f_m$  její hloubka.

$$R = \frac{c\Delta f T_m}{2f_m} \quad (2.7)$$

- Trojúhelníková modulace, na obrázku 2.4. Používá se tam, kde je důležitá jak rychlost, tak vzdálenost. Díky rozdílům na náběžné a sestupné hraně je možné rozlišit Dopplerovu frekvenci, rovnice 2.8 od změny frekvence způsobené vzdáleností – rovnice 2.9.

$$f_d = \frac{|\Delta f_1 - \Delta f_2|}{2} \quad (2.8)$$



Obrázek 2.4: Modulace – vlevo pilový zub, vpravo trojúhelníková modulace. Červená linka je vyslaný signál, zelená přijatý. Zdroj: [9]

$$f_r = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2} \quad (2.9)$$

## Kapitola 3

# Zpracování signálu

Signál z radaru je analogový. Aby bylo možné jeho digitální zpracování, je třeba jej pomocí A/D převodníku navzorkovat – převést na diskrétní signál. Následující část byla převzata z [1]. Vzorkování je proces, kdy je původní signál vynásoben sledem Diracových impulsů. Výsledný signál je sled Diracových impulsů s mocnostmi.

Aby při vzorkování nedošlo k aliasingu, musí být dodržen Shannonův-Kotělnikovův teorem, který říká, že vzorkovací frekvence musí být větší, než dvojnásobek maximální frekvence signálu, viz rovnice 3.1. Při aliasingu dochází k překrytí spekter. Jejichž okrajové části se sčítají a není možné zrekonstruovat původní signál. Aliasingu se dá zabránit také antialiasingovými filtry, které odstraní vyšší frekvence ještě před zpracováním.

$$f_{vz} > 2f_{max} \quad (3.1)$$

Navzorkovaný signál se následně segmentuje na časové rámce. Rámec je výřez určité části signálu. Sledujeme délku rámce  $l_{ram}$ , překrytí  $p_{ram}$  a posun  $s_{ram}$ . Posun je závislý podle vztahu 3.2. Převzato z [1].

$$s_{ram} = l_{ram} - p_{ram} \quad (3.2)$$

K vyříznutí rámce slouží okenní funkce. Daný signál se v časové doméně násobí oknem. To ovlivňuje spektrum rámce – výsledné spektrum je konvolucí okenní funkce a rámce. Dvě nejdůležitější okenní funkce jsou:

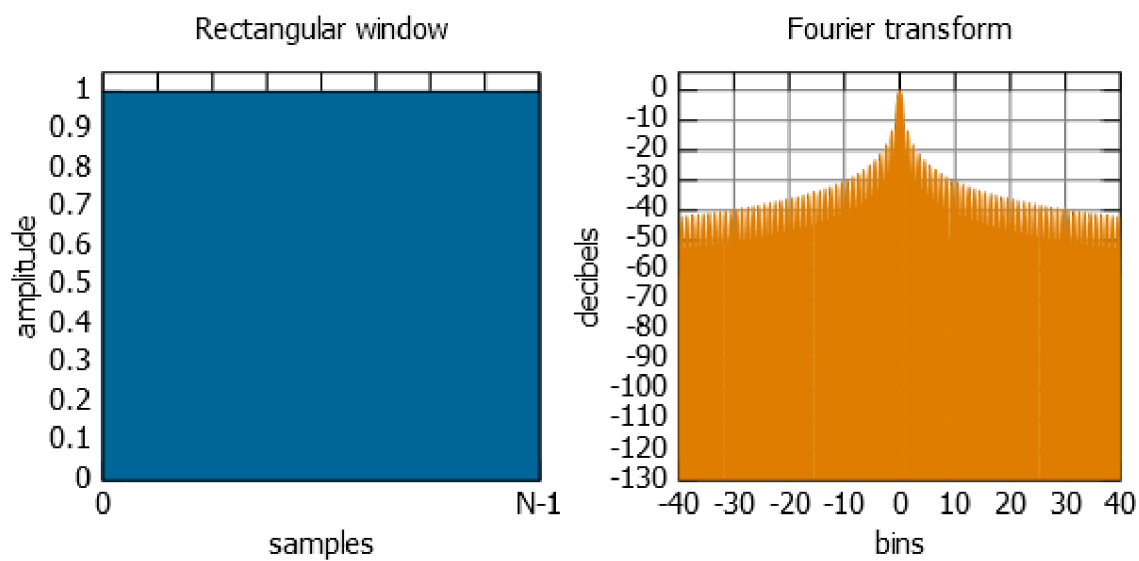
**Pravoúhlé okno** – zachovává signál v nezměněné podobě, obrázek 3.1.

**Hammingovo okno** – tlumí signál na okrajích, obrázek 3.2.

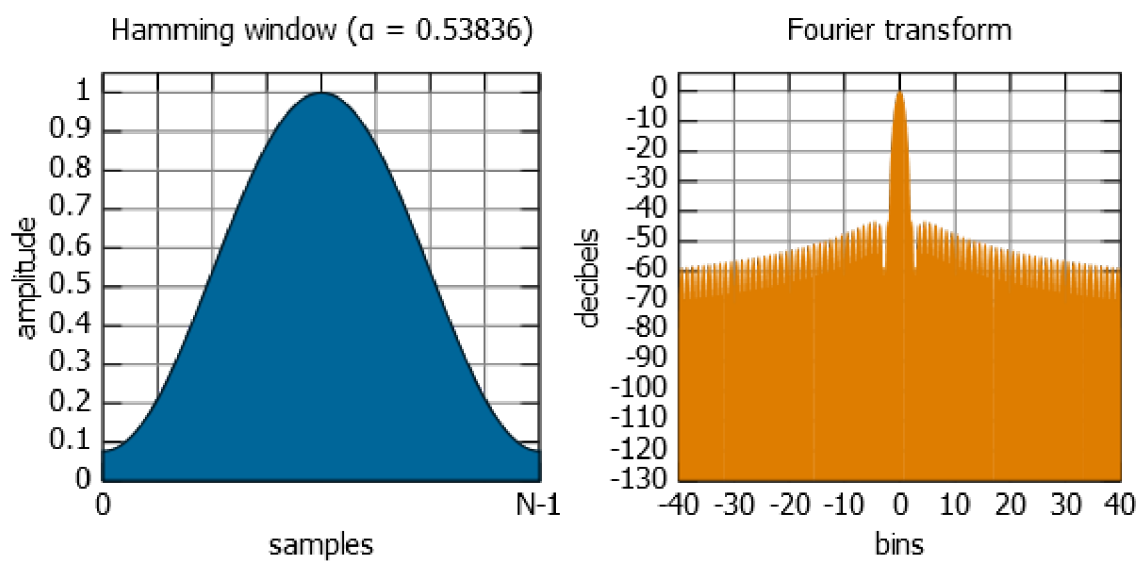
### 3.1 Diskrétní Fourierova transformace

Spektrum vzorkovaného signálu je možné spočítat pomocí diskrétní Fourierovy transformace – DFT: Citace z [1]: Jak však aplikovat DFT na diskrétní signál?:

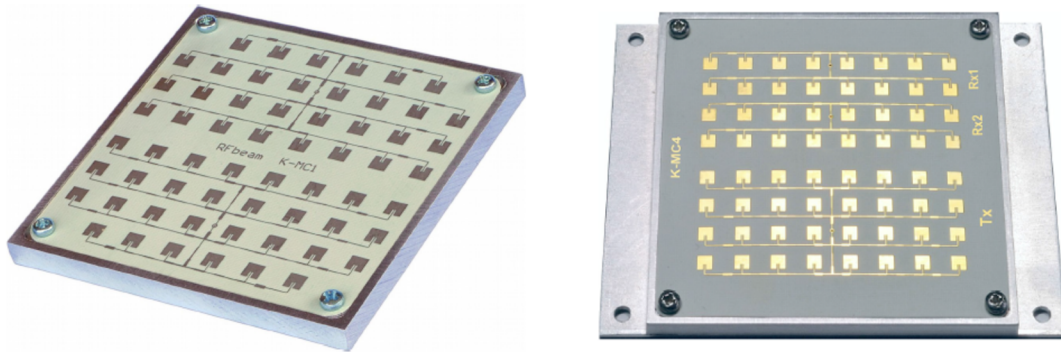
- Analyzujeme "okno" o délce  $N$  vzorků.
- co bude vlastně výsledkem? Aproximace spektrální funkce ve frekvenčních bodech  $k\Delta f$ , kde  $\Delta f = \frac{F_s}{N}$  (skutečná frekvence).



Obrázek 3.1: Pravoúhlé okno. Zdroj [7]



Obrázek 3.2: Hammingovo okno. Zdroj [7]



Obrázek 3.3: Fotografie KMC-1 a KMC-4. Zdroj [4] a [5]

- Počítáme spektrum vzorkovaného signálu, také je toto spektrum nutně periodické, a to s periodou  $N$  čísel, co odpovídá vzorkovací frekvenci  $F_s$  (u frekvence se raději vyhneme označení "vzorek"). Pokud necháme  $k \in (-\infty; +\infty)$ , zjistíme, že  $X(k\Delta f)$  se po  $N$  hodnotách opakuje.
- Signál jsme "vykousli" oknem. Spočtené spektrum nese i vlastnosti tohoto okna: okno v čase násobí signál, spektrum okna se tedy ve frekvenci konvoluje se spektrem signálu. Toto s sebou často nese rozmazání teoreticky ostrých spektrálních čar (např. při analýze harmonického signálu).
- Spektrum je diskrétní (máme k dispozici pouze  $N$  hodnot od 0 do  $F_s$ ), takže jsme vlastně spočetli spektrum periodického signálu! Můžeme si to představit tak, že okno signálu se opakuje do nekonečna.

Zdroj: [1]

## 3.2 Vlastnosti konkrétních radarových modulů

Moduly, se kterými jsem pracoval, jsou od společnosti RFbeam. Dostal jsem se i k radaru IVS-948 firmy InnoSenT, ale jeho dokumentace je příliš stručná. V dokumentacích [4] a [5] jsou popsány všechny vlastnosti i s příslušnými rovnicemi. Jedná se o 24 GHz moduly. Jsou vhodné pro sledování dopravy, měření rychlosti, nebo měření vzdálenosti.

**KMC- 1** Převzato z [4]. Jak je vidět na fotografii 3.3 a schématu 2.3, modul obsahuje dvě antény. Paprsek je vyzařován do  $25^\circ$  v horizontálním směru a  $12^\circ$  ve směru vertikálním. Citlivost modulu je  $-141$  dBc.

Tímto modulem je možné měřit rychlost, včetně směru od a k radaru. Umožňuje i modulaci signálu – měření vzdálenosti.

Směrová odchylka zkresluje rychlost, toto zkreslení není možné kompenzovat. Je nutné zajistit, aby se sportovci pohybovali ve směru osy radaru. V určitých případech může být užší paprsek výhodnější. Za zmínku stojí možnost postavení modulu na výšku. Paprsek tak má na každou stranu odchylku  $6^\circ$ , zobrazí menší prostor, ale zato přesněji.

**KMC-4** Převzato z [5]. Je zobrazen na obrázku 3.3. Podporuje všechny funkce jako KMC-1. Hlavním rozdílem oproti KMC-1 je rozdělení přijímací antény na dvě. Tím se snížila citlivost na  $-134$  dBc. Šířka paprsku je  $30^\circ$ , výška  $12^\circ$ .

Díky dvěma přijímacím anténám je možné porovnání fáze (orig. Monopulse Phase Comparison), zobrazeno na obrázku 3.6. Odchylka objektu pohybujícího se v prostoru  $\pm 15^\circ$  od osy radaru generuje fázový posun  $\pm 100^\circ$ . Nejpřesnější výsledky jsou v prostoru  $\pm 13^\circ$ .

Odchylka objektu  $\alpha$  se rovná podílu posunutí fáze  $\theta$  a konstanty  $k = 6, 7$ . Rovnice 3.3. Konstanta závisí na vzdálenosti antén a vlnové délce signálu. Pro modul je pevně daná a dá se vyčíst z dokumentace [5].

$$\alpha = \frac{\theta}{6,7} \quad (3.3)$$

### 3.3 Prototypy algoritmů

Pro vytváření prototypů jsem používal program Matlab. Díky implementovaným funkcím v Signal Processing Toolbox a snadnému vytváření grafů je práce s daty rychlá a přehledná. To bylo vhodné pro pochopení tematiky a testování různých přístupů. Informace převzaty z [1] a [2].

Bez modulace je signál závislý přímo na situaci, kterou radar snímá. V tomto případě není třeba signál jakkoli synchronizovat. Časové rámce můžeme analyzovat nezávisle na sobě. Pro přesnější výsledky je vhodné použít překrytí rámců a konvoluci s Hammingovým oknem. Dominantní frekvence časového okna odpovídá Dopplerově frekvenci hlavního pohybujícího se předmětu v obraze. Jde snadno přepočítat na výslednou rychlost. Z grafu 2.4 je patrné, že kvůli modulaci je třeba signál analyzovat po jednotlivých náběžných a sestupných hranách trojúhelníků. Začátek i konec modulace je rozlišitelný synchronizačními bity v signálu. Výsledkem jsou dvě frekvence. Jejich přepočítáním získáme jak rychlost, tak vzdálenost objektu. Pokud má radar více antén pro příjem, je možné vypočítat úhel, pod kterým se pozorovaný objekt vůči radaru nachází. Pokud není objekt v ose radaru, dopadá komplexní signál na přijímací antény s různou fází. Rozdíl fází na jednotlivých anténách je přímo úměrný hledanému úhlu.

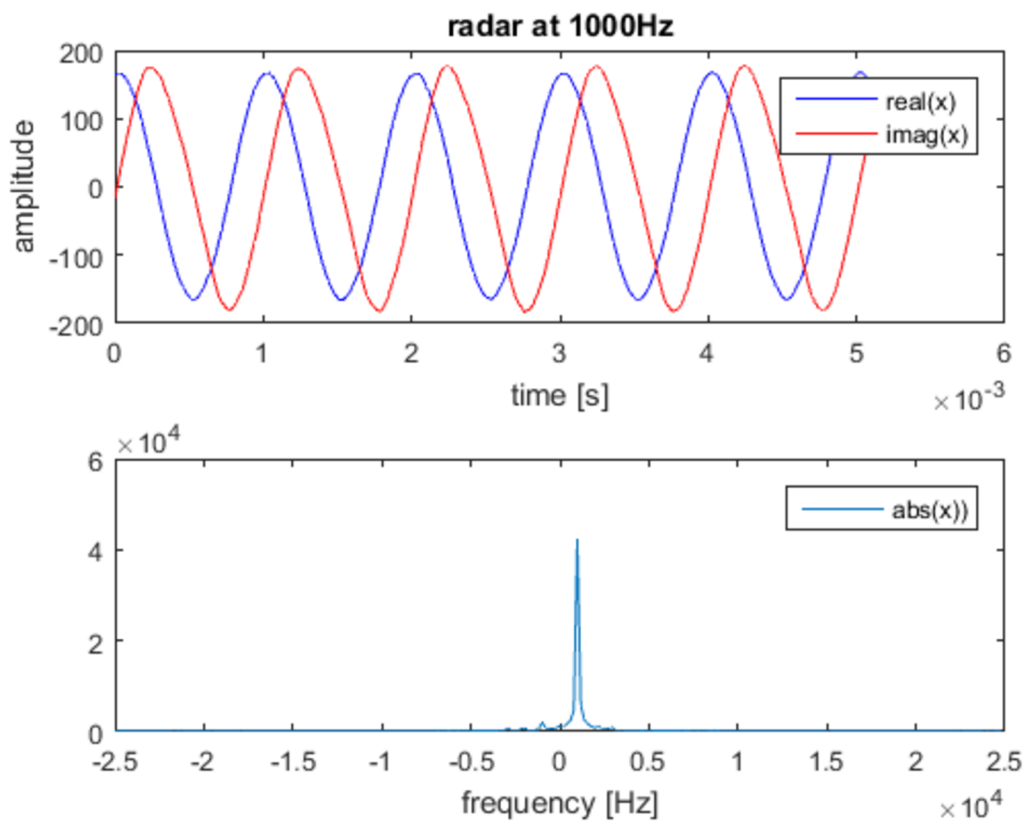
#### Určení dominantní frekvence

Prvním algoritmem je hledání dominantní frekvence. Pro testování byla využita nahrávka z radaru, který přijímal známou frekvenci z testovací jednotky K-TS1. Z nahrávky je načtena vzorkovací frekvence, kanály I a Q jsou složeny do komplexních čísel. Následně je z celého pole komplexních vzorků odstraněna stejnosměrná složka. Potom proběhne převod na spektrální funkci Fourierovou transformací. Ve spektru vyhledáno maximum a jeho pozice přepočtena na výslednou frekvenci. Výsledek je zaznamenán na grafu 3.4. Je zde vidět časový průběh i spektrum pro 256 vzorků. Nízký počet vzorků je na grafu pro názornost, při takto nízkém počtu vzorků je bez interpolace přesnost pouze na stovky Hertzů.

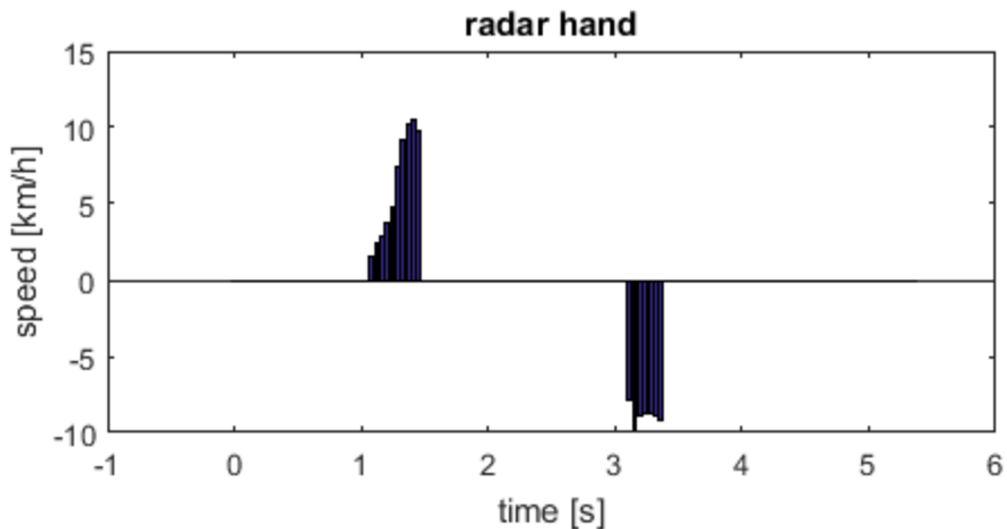
#### Rychlost v průběhu času

Druhým krokem je nahrávka mávnutí ruky před radarem. Cílem bylo z nahrávky zjistit jakou rychlostí a jakým směrem se ruka pohybovala. Druhý algoritmus vycházel z prvního. Přidal jsem výřez po rámcích Hammingovým oknem. U každého rámce je vypočítána dominantní frekvence. Směr je určen fázovým posunem. Používá se prahování a následně





Obrázek 3.4: Určení dominantní frekvence (1000Hz)



Obrázek 3.5: Určení průběhu rychlosti v čase

přepoččet na rychlost. Rychlost je vypočtena z frekvence podle rovnice 3.4, která se upraví na tvar 3.5. Vlnová délka je rovna 0,012 m. Rychlost je z  $[\text{ms}^{-1}]$  převedena na  $[\text{kmh}^{-1}]$ .

$$F_d = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \quad (3.4)$$

$$v = \frac{1}{2} \cdot F_d \cdot \lambda \quad (3.5)$$

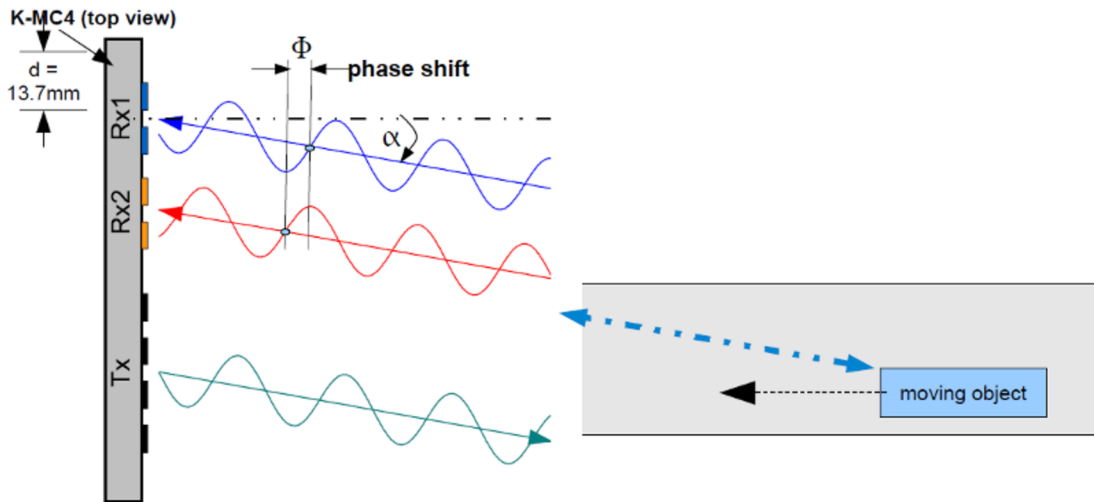
Na výsledném grafu 3.5 jsou záporné rychlosti, které samozřejmě neexistují. V tomto případě se jedná o časové úseky, kdy se ruka pohybuje směrem od radaru. Na grafu 3.5 jasně vidět první mávnutí směrem k radaru a druhé od něj.

### Určení vzdálenosti

Jak již bylo zmíněno výše, při určování vzdálenosti je potřeba pracovat s modulovaným signálem. Hodnoty dodávané radarem mají 12 bitů. Nejvýznamnější bit je vyhrazen jako synchronizační. Hloubka modulace  $f_m$  a její perioda  $T_m$  jsou veličiny, které závisí na nastavení a kalibraci radaru. Modulace začíná a končí synchronizačním bitem. Signál je zpracováván po rámcích ohraničených právě synchronizačními bity.

Pro účely měření sportovců, kteří jsou v pohybu by nebylo praktické modulovat signál pilovým zubem. Proto je při měření využita trojúhelníková modulace. Postup je následující:

- Výřez okna mezi synchronizačními bity.
- Rozdělení okna na poloviny (náběžná a sestupná hrana).
- Určení dominantní frekvence zvláště pro každou polovinu. Je vhodné si uvědomit, že úroveň signálu klesá se čtvercem vzdálenosti. Při více objektech v obraze nemusí být hlavní ten, který je nejbližší a jehož odraz má při dopadu nejvyšší výkon.
- Určené frekvence jsou  $\Delta f_1$  a  $\Delta f_2$ , ze kterých podle rovnice 2.9 získáme  $f_r$ .
- Výsledná vzdálenost je rovna  $R$  podle vztahu 3.6.



Obrázek 3.6: Měření úhlu radarem KMC4. Zdroj [5]

$$R = \frac{c \cdot f_r \cdot T_m}{2 \cdot 2 \cdot f_m} \quad (3.6)$$

### Výpočet úhlu

Výpočet je možné provádět pouze u modulů, které mají více antén pro příjem. Každá anténa přijímá komplexní signál. Ten je přenášen po dvou kanálech  $I$  a  $Q$ . Fázový posun mezi těmito kanály je  $90^\circ$ , nebo  $-90^\circ$ . Znaménko značí směr pohybu k radaru, nebo od něj.

Při sledování objektu pod úhlem je možné sledovat fázový posun mezi anténami. Díky postavení antén vedle sebe musí na jednu z nich dopadat signál se zpožděním. Hledá se fázový posun mezi  $I_1$  a  $I_2$ , nebo  $Q_1$  a  $Q_2$ . To je názorně vidět na obrázku 3.6.

Výsledný úhel je podílem fázového posunu a konstanty. V případě radaru KMC4 je tato konstanta  $k = 6,7$ . Výpočet je zobrazen v rovnici 3.3.

Úhel odklonění radaru od směru pohybu zkresluje rychlost. Pokud je známý úhel, je možné toto zkreslení kompenzovat. Skutečná rychlost  $v_s$  je závislá na naměřené  $v_n$  a úhlu  $\alpha$  podle vztahu 3.7.

$$v_s = \frac{v_n}{\cos(\alpha)} \quad (3.7)$$

## Kapitola 4

# Návrh detektoru

Téma této práce je radarové měření pro rychlostní disciplíny. Jako cíl jsem si určil: *Detektor, který snímá sportovce, měří a zobrazuje jejich rychlost. Dokáže rozpoznat jednotlivé sportovce, určit jejich maximální rychlost a směr.* Při návrhu detektoru jsem vycházel z vlastností radarů a nevelkých zkušeností, které jsem získal sestavováním předchozích algoritmů. Zjednodušený návrh jsem zakreslil do schématu [4.1](#).

### 4.1 Analýza

Vycházel jsem z podoby preventivního rychlostního radaru u silnice. Měl jsem k tomu následující důvody:

- Je to doporučené použití pro dané moduly.
- Je to všeobecně známý a fungující systém.
- Poskytuje funkčnost, kterou se chystám implementovat.

Toto zařízení zobrazuje rychlost silniční dopravy v celých kilometrech za hodinu, popřípadě varování při překročení určité rychlosti. Většina těchto radarů nereaguje na cyklisty ani na chodce.

Při porovnávání aut (silniční doprava) a cyklistů (sportovců) jsem definoval několik hlavních rozdílů.

- Auta mají větší odrazivou plochu, jsou snadněji detekovatelná.
- Sportovci se zpravidla pohybují pomaleji než silniční doprava.
- Silniční radary jsou pro prevenci nehod – dopravu zpomalují. Popřípadě slouží k ověření funkčnosti tachometrů.
- Sportovci se snaží být co nejrychlejší, soutěžit. To vede spíše k nebezpečnějším situacím.

Z rozdílů a dalších svých myšlenek jsem následně definoval vlastnosti, které by měl algoritmus splňovat.

- Zobrazovat pouze relevantní hodnoty.

Modul Radaru	$s$ [dB]	$r_{max}$ osoby [m]	$r_{max}$ auta [m]
KMC-1	-141	56	>150
KMC-4	-134	37	>93

Tabulka 4.1: Porovnání dosahu KMC-1 a KMC-4

- Měřit na setiny kilometrů v hodině (sportovci se pohybují nižšími rychlostmi a záleží jim na malých rozdílech).
- Detekovat všechny pohybující se osoby. Měl by tedy být citlivější.
- Dodávat přesná data dostatečně rychle.
- Často aktualizovat zobrazovanou rychlost. Bez zpoždění reagovat na změny rychlosti.

Přesnost naměřené rychlosti na setiny kilometrů za hodinu je v přepočtu na frekvenci 0,5 Hz. Aby diskrétní Fourierova transformace dodávala takto přesné výsledky, je třeba ji počítat ze 100 000 vzorků. Při obvyklé vzorkovací frekvenci 50 000 Hz by rámeček z tolika vzorků byl z 2 sekundového záznamu. To je doba pro měření nepoužitelná. Navíc sportovec neudržuje konstantní rychlost, proto by ani přesnost nebyla vypovídající.

Přesnost na desetiny  $\text{kmh}^{-1}$  by zato vyžadovala hodnoty kolem 5 Hz. Logicky desetkrát nižší. Stejně tak se snižuje potřeba hodnot pro Fourierovu transformaci. Jeden rámeček bude sestaven z 0,2 sekundy záznamu.

Druhá varianta se jeví o mnoho výhodnější. Proto bude ve výsledku stačit přesnost na jedno desetinné místo.

Zobrazenou hodnotu rychlosti je třeba aktualizovat. Nejrychlejší variantou je zobrazování rychlosti přímo po výpočtu. Bude docházet téměř k nulové prodlevě – stále je potřebný určitý čas na výpočet. V tom případě by se ale zobrazovalo vše co radar vidí, včetně šumů.

Na úkor rychlosti aktualizace jsem se rozhodl snížit počet falešných hodnot. Při zobrazování dochází k porovnání hodnoty se sousedními dvěma údaji. Nutnost čekat na následující hodnotu vede k výslednému zpoždění cca. 0,3 s.

## Dosah radaru

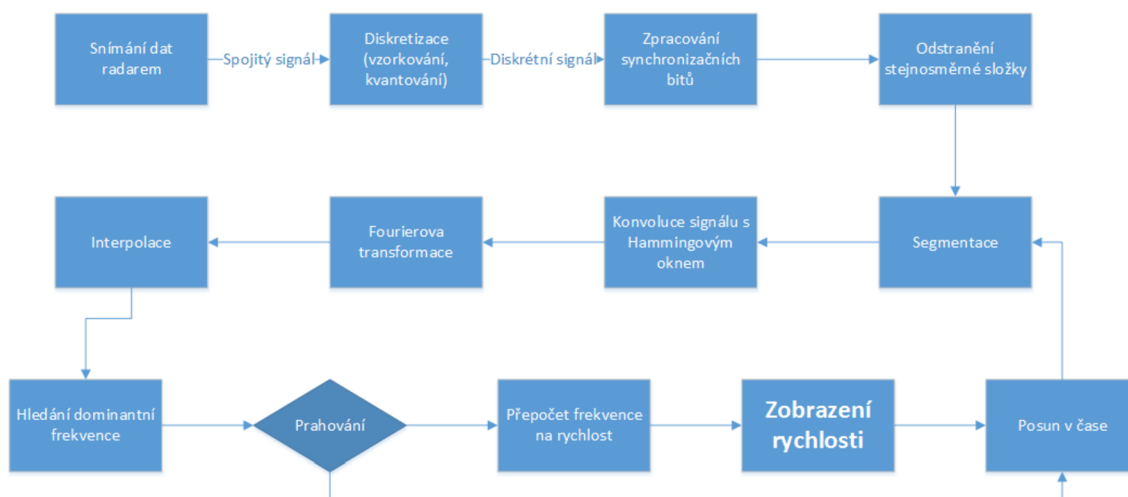
Radarová rovnice pro moduly, se kterými jsem pracoval, se podle zdroje [5] zjednodušuje na rovnici 4.1. Proměnná  $s$  značí citlivost modulu v dB. Symbol  $\sigma$  je označení pro radiolokační odraznou plochu (RCS). Udává se v  $\text{m}^2$ .

RCS závisí na mnoha faktorech. Pro pohybující se osobu se udává  $1 \text{ m}^2$ , pro automobil více než  $50 \text{ m}^2$ . Tyto hodnoty jsou orientační a mohou se lišit více než desetinásobně.

$$r_{max} = 0.0167 \cdot 10^{\frac{-s}{40}} \cdot \sqrt[4]{\sigma} \quad (4.1)$$

V tabulce 4.1 je porovnání maximálního dosahu dvou modulů, osob a automobilů.

- Pro osoby je dosah oproti autům třetinový.
- KMC-4 má o třetinu nižší dosah, než KMC-1.



Obrázek 4.1: Procesy v obecném algoritmu

**Rozmístění hardware** v terénu. Ideální umístění radaru je přímo ve směru pohybu tak, aby nedošlo ke střetu se sportovcem. Na silnici panuje pevný systém jízdy v pružích a omezené rychlosti. Zařízení se často připevňují nad jízdní pruhy, nebo do těsné blízkosti vozovky.

Sportovci se pohybují nepředvídatelně a zařízení by mělo být přenosné a univerzální. Umístění nad sportovce proto nepřipadá v úvahu. V případě lyžařů je třeba vytyčit trasu. Při měření na cyklostezce se nejvýhodněji jeví umístit radar například do zatáčky, tak aby sportovec do poslední chvíle směřoval k němu.

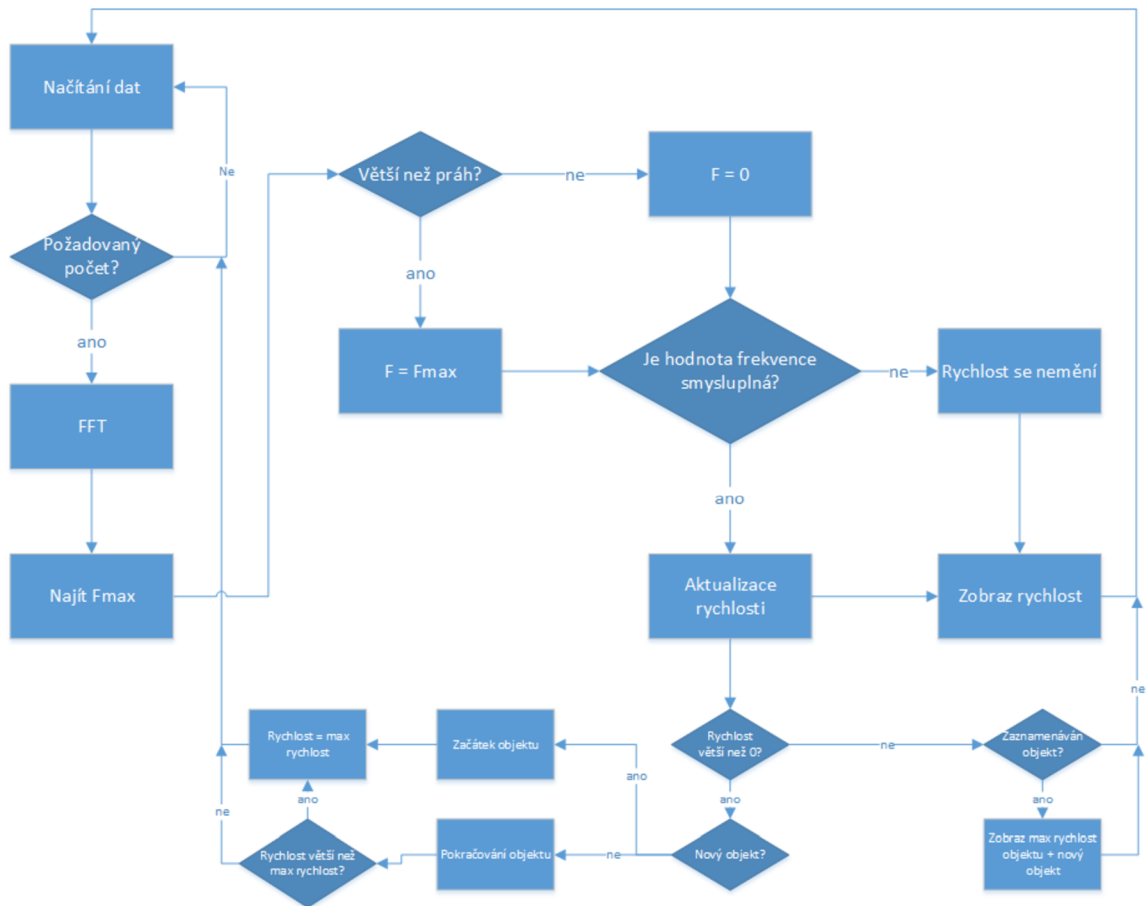
Reálnější a v budoucnu pravděpodobně nejpoužívanější se zdá umístění na rovinku, vedle cyklostezky. Měření probíhající 25 metrů od radaru bude při šířce cyklostezky 2 metry v nejhorším případě  $5^\circ$  od osy radaru. Toto zkresení, o 0,03 kilometrů v hodině je možné tolerovat.

## 4.2 Vlastnosti implementovaného programu

Pro implementaci jsem zvolil programovací jazyk C. Je rychlý a bez zvláštních požadavků na hardware. Může tak potencionálně fungovat přímo na výpočetní jednotce radaru bez dalšího počítače.

Detektor přijímá proud digitálních hodnot. Vhodně je uloží do rámců po 8192. To je hodnota  $2^n$  nejbližší 10 000. Odstraněním synchronizačních bitů a střední hodnoty data připraví na další zpracování. Pro zjišťování frekvence je třeba převést rámeček na spektrum.

K tomu slouží rychlá Fourierova transformace. Bez implementace diskretní Fourierovy transformace by zpracování signálů nebylo vůbec možné. Algoritmus diskretní Fourierovy transformace (DFT) má vysokou složitost  $O(N^2)$ . K výpočtu se proto využívá rychlá Fourierova transformace (FFT). Algoritmus jsem převzal z [3]. Tato kniha byla vydána před více než dvaceti lety, roku 1992, a je to již její druhé vydání. Základem je algoritmus, který představili Danielson a Lanczos roku 1942. Ukázali, že DFT o délce  $N$  může být spočítána jako součet dvou DFT o délce  $N/2$ . Postupným dělením se dostáváme až k DFT jednoho prvku. Následně se rekurzivně dopočítá celá transformace. Této části předchází bitový posun a prohazování komplexních čísel. Celková složitost algoritmu FFT je  $O(N \log_2 N)$ . Jedinou



Obrázek 4.2: Konkrétní algoritmus detektoru

nevýhodou je omezení pro  $N$ . Doporučuje se, aby se rovnalo mocnině dvou. V případě jiného počtu prvků je nutné zarovnat na následující mocninu dvou a neobsazená místa nahradit nulami.

Pohybujeme se v komplexních číslech  $z = a + bi$ . Při zjišťování frekvence se porovnávají moduly  $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$  jednotlivých komplexních čísel. Na obrázku 3.2 je vidět, že vrchol stejnosměrné složky může mít oproti ostatním hodnotám ve spektru několikanásobnou velikost. A to i po odstranění stejnosměrné složky. V nejhorších případech je tento vrchol roztažený přes několik vzorků. Protože je signál diskrétní, snadno se tyto hodnoty zamění za velmi nízké frekvence, ovšem s velkou hodnotou modulu. To by na zobrazovači rychlostí způsobovalo nepříjemné poblikávání čísel blízko nuly.

I když není detekce hlavním zaměřením této práce, připadá mi velmi zajímavá. Nesnažím se o rozpoznávání chodců od bruslařů, nebo cyklistů. To by bylo teoreticky možné na základě rozdílných rychlostí, kterými se obvykle pohybují. Zajímá mě možnost agregace dat. Určení počtu osob, které se v daném místě pohybovaly, jejich rychlosti, popřípadě roztrídění do rychlostních tříd a směr pohybu. Mohlo by vyjít najevo například, že ráno se cesta využívá jedním směrem, odpoledne druhým. Slouží tak k cestě do zaměstnání.

Nejintuitivnější je zobrazování hodnot tak, jak jsou lidé zvyklí. Tak, aby měli zpětnou vazbu na svůj pohyb a mohli si být jistí, že jsou to právě oni, kdo je měřen. Byla by škoda zůstat pouze u tohoto. Na jiném displeji by mohla být zobrazená historie naměřených hodnot, popřípadě žebříček. Email s fotografií a rychlostí by mohl být zajímavý suvenýr z nějaké akce.



## Kapitola 5

# Implementace v C

Nároky na aplikaci jsou přenositelnost, znovupoužitelnost a samozřejmě funkčnost. Rozhodl jsem se implementovat knihovnu funkcí pro práci s daty. Nad ní vytvořit aplikaci, která načte výstup radaru a data zobrazuje.

Knihovna slouží k analýze dat, obsahuje struktury pro uložení hodnot a funkce pro operaci s daty. Funkce jsou vždy aplikovatelné na jeden kanál – příjem z jedné antény. Při vyhodnocování více kanálů, například při použití více modulů, nebo antén, je škálovatelná a teoreticky je omezená pouze velikostí paměti.

Knihovna obsahuje následující funkce:

- Diskrétní Fourierovu transformaci.
- Získání dominantní frekvence, její prahování, směru a fázového posunu.
- Výpočet směru pohybu, úhlu fázového posunu a rychlosti.
- Potvrzení, že je vypočtená hodnota relevantní.
- Rozpoznávání objektů.

### 5.1 Popis datových struktur

Struktury jsou zobrazeny na obrázku 5.1. Jejich pochopení je zásadní pro správnou implementaci programu s knihovnou. Proto zde rozepíší význam jednotlivých proměnných.

**Struktura freq** slouží k ukládání a předávání hodnot funkcí, které souvisí se zpracováním signálu a frekvencí.

- `threshold` – Práh sloužící k ignorování frekvencí s nižším modulem, než je nastavená hodnota.
- `Fs` – Hodnota vzorkovací frekvence [Hz]. Není vhodné ji v průběhu měnit. Inicializovaná na 50 000 Hz.
- `actual_speed` – Aktuální hodnota rychlosti. Je určena pouze pro čtení. Její hodnota se aktualizuje s každým novým výpočtem frekvence.
- `data` – Pole o délce 2 SAMP. Slouží pro předání hodnot signálu. Sudé indexy pro reálné, liché pro imaginární složky komplexního čísla. Před výpočtem je nutné toto pole naplnit vyřezaným rámcem signálu.

```

struct freq {
    double threshold;
    int Fs;
    float actual_speed;
    float data[2*SAMP];
    double freqs[3];
    int direction;
    double angle;
};

struct object{
    int isnew;
    int j;
    int k;
    int min_space;
    int min_duration;
    double max_speed;
    int counter;
    int min_speed;
};

```

Obrázek 5.1: Struktury pro uložení dat

- freqs – Hodnoty posledních tří získaných frekvencí. Pouze pro čtení.
- direction – Směr pohybu předmětu od, nebo k radaru. Nabývá hodnot +1, nebo -1.
- angle – Fázový posun vzorku. Nabývá hodnot 0 – 360°.

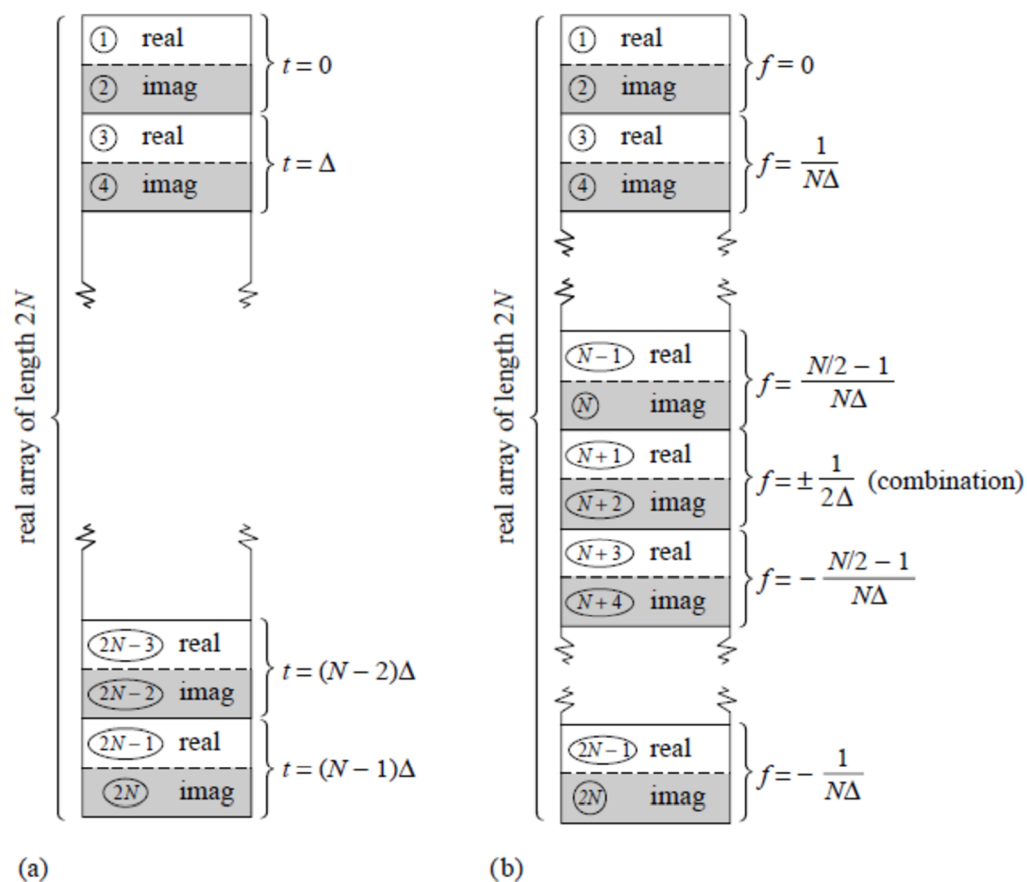
**Struktura object** slouží pro detektor.

- isnew – Střídá hodnoty 0 a 1. Sestupná hrana značí začátek objektu, náběžná konec.
- min\_space – Minimální mezera mezi objekty v počtu zaznamenaných oken. Nastavitelné uživatelem. Větší hodnota více rozděluje objekty, nižší je naopak slučuje.
- min\_duration – Minimální počet oken, ve kterých je zaznamenán objekt. Nastavitelné uživatelem. S rostoucí hodnotou budou detekovány větší a pomalejší objekty.
- max\_speed – Během měření objektu se zde postupně ukládá maximální rychlost. Při detekovaném konci objektu je maximální. Následně je vynulována.
- counter – Čítač objektů. Je inicializován na hodnotu 0 a s každým rozpoznáním objektem roste o 1.
- min\_speed – Minimální rychlost akceptovaná detektorem. Nastavitelná uživatelem. Například 6 kmh<sup>-1</sup> pokud chceme ignorovat chodce.

## 5.2 Zajímavé části algoritmu

### FFT

V algoritmu z [3] jsem provedl drobnou změnu tak, aby číslování začínalo od nuly jak je v jazyku C zvykem.



Obrázek 5.2: Uložení hodnot a) před FFT b) po FFT. Zdroj [3]

Funkce přijímá pole dat, kde je vždy na sudém indexu reálná část čísla, na následujícím lichém indexu se nachází imaginární část. Pole má velikost  $2N$ . Výsledek se nachází ve stejném poli. Frekvence odpovídá indexu, hodnoty jsou opět v pořadí reálná, imaginární složka. Frekvence začíná na nule a stoupá s indexem až do nejvyšší kladné hodnoty  $\frac{F_s}{2}$ .

Ta je shodná s nejnižší možnou frekvencí  $-\frac{F_s}{2}$ . Dále opět roste až po hodnotu těsně pod nulou. Názorná ukázka je na obrázku 5.2. Všechny indexy jsou o jedna nižší.

### Získání dominantní frekvence

Hledá se maximální modul. Výsledná frekvence je určena polohou maximálního modulu v poli hodnot. Konkrétně jde o index reálné složky, přepočítaný podle obrázku 5.2.

Zde jsem si dovilil odfiltrovat frekvence  $|f| < 20$  Hz. Odpovídají rychlostem pod  $0,5 \text{ kmh}^{-1}$ , které pro měření sportovců nejsou zajímavé. Tato oblast spektra může být značně ovlivněna stejnosměrnou složkou.

Úroveň prahu je nastavitelná uživatelem. Ideální velikost závisí na podmínkách měření a požadavcích uživatele. Při inicializaci je nastaven na přiměřenou hodnotu.

## Výpočet směru pohybu, úhlu fázového posunu a rychlosti

Signály I a Q jsou vždy fázově posunuty o  $+90^\circ$ , nebo  $-90^\circ$ . Tento posun se po FFT projeví ve znaménku frekvence. V programu se zápornými frekvencemi nepracuji. Místo toho je znaménko uloženo jako směr pohybu – od, nebo k radaru.

Fázový posun je vyjádřen úhlem ve stupních,  $0 - 360^\circ$ . Veškeré záporné úhly jsou přepočteny do jedné stupnice. Nulový úhel má pouze kladná reálná složka. Úhly stoupají s čísly kvadrantů tak, jak se běžně označují.

Výpočet rychlosti je zjednodušen na vynásobení získané frekvence konstantou  $k = 0,0216$ . Konstanta byla vypočítána podle vzorce 3.4. Díky absenci záporných frekvencí se nebudou vyskytovat ani záporné rychlosti.

## Potvrzení, že je vypočtená hodnota relevantní

Při měření rychlostí sportovců je třeba mít vysokou citlivost přijímače. Dochází k rušení a může se objevit nesmyslná hodnota. Snahou této části je odstranit chybovost. V případě, že dojde k přijetí špatné hodnoty, je nahrazena hodnotou předchozí – smysluplnější.

Detekce pracuje se třemi hodnotami. S hodnotou předchozí, aktuální a následující. Nutností získat následující hodnotu vzniká zpoždění. Ověřuje se vždy platnost aktuální, tedy prostřední, hodnoty a to dvěma pravidly:

- Posloupnost roste, nebo klesá. Analogicky – sportovec zrychluje, nebo zpomaluje.
- Sportovec udržuje rychlost. Prostřední frekvence tedy musí být podobná sousedním dvěma. Jako vyhovující jsem označil odchylku menší, než 50 Hz.

## Popis detektoru

Detektor je jednou funkcí v knihovně. Má rozpoznat, že je v obraze objekt, a spočítat jeho maximální rychlost. Vyšší ambice nemá. Měl by sloužit k agregaci dat pro dlouhodobější výpočty. Je třeba, aby byl zavolán po každém provedení výpočtu frekvence. Jen tak bude dodávat správné výsledky. Z důvodu různých podmínek a využití je plně škálovatelný. Je možné nastavení minimálního rozestupu, minimální velikosti (ale pomalý objekt se může jevit větší) a práh rychlosti. Na všechny tyto operace jsou vyčleněny knihovní funkce, nicméně jde vždy o změnu hodnoty proměnné. Detekce tímto způsobem trpí nedostatky o kterých se více rozeprší ve fázi testování.

Hlavním problémem je rozlišení jednotlivých osob, které jsou v těsné blízkosti. Například peloton cyklistů bude detekován jako jeden objekt. Snažil jsem se rozlišovat objekty podle času, který potřebují na průjezd. Například cyklista jedoucí  $25 \text{ kmh}^{-1}$  je na obraze 3 sekundy. Pokud jede 6 sekund, je jasné, že to jeden cyklista být nemůže. Po několika testech se ale ukázalo, že toto rozpoznávání nepřináší praktický užitek. Záleží na pozici radaru a odrazivosti sportovce, která se může velmi lišit. Jedno auto například vypadá jako 8 cyklistů. Od implementace tohoto vylepšení jsem nakonec upustil.

## GUI

Jelikož hlavní náplní práce byla implementace funkční knihovny, nevytvářel jsem jednotné uživatelské rozhraní. První aplikace pro radar KMC-1 běží ve dvou vláknech. První slouží pro výpočty, druhé pro zobrazení aktuální hodnoty v okně GTK+. Druhou aplikaci jsem se rozhodl vytvořit konzolovou. Výstup je tisknutý do terminálu. Jeho formát odpovídá srt

titulkům. Ty se dají přehrávat společně s videozáznamem. Pro práci s těmito aplikacemi se předpokládají programovací znalosti.

## Kapitola 6

# Sběr dat a testování

Sběr dat probíhal s radary KMC-1 a KMC-4. Místo jsem vybral podle dostupnosti, nepřizpůsoboval jsem je podle vlastností radaru. Chtěl jsem se přiblížit reálným podmínkám a nastavení neznalým uživatelem. Zároveň s ukládáním dat z radaru probíhal videozáznam krátkého úseku před radarem. Na obrázku 6.1 je modře zobrazeno přibližné pokrytí oblasti anténou radaru. Velikost by měla odpovídat dosahu při detekci osob. Žlutá výseč patří videokamere. Mezi měřeními jsem pozice radaru a kamery upravoval, abych získal různorodější vzorky. Získal jsem záznam širokého spektra sportovců, kteří se na cyklostezce pohybují. Kromě dvou hlavních skupin, kterými byli in-line bruslaři a cyklisté, se zde objevili i běžci, chodci, rodiče s kočárky a auta. Celkem jsem nahrál 80 pohybujících se objektů.

Na fotografii 6.2 je v popředí na stativu vidět připevněný modul KMC-1 na výšku, od něj vedou napájecí a datové kabely k výpočetní jednotce ukryté v bílé krabici. V ní je uložena baterie a počítač s operačním systémem Linux. K výpočetní jednotce je UTP kabelem připojen notebook, do kterého se ukládají naměřená data. Také na něm běží moje aplikace.

### 6.1 Testy

Testování probíhalo na naměřených datech. Testoval jsem dva detektory založené na naprogramované knihovně. První zpracovává jeden komplexní signál. Druhý zpracovává data přímo z radaru KMC-4. Měří i úhel a kompenzuje rychlost pomocí kosinového úhlu. Testy:

1. Ověření rychlosti – přesná rychlost z videozáznamu (vypočítána podle měřítka a doby průjezdu) se porovnává s naměřenou rychlostí.
2. Spolehlivost je testována na detekovaných objektech. Ty jsou porovnávány s realitou na videozáznamu, nejdříve s obecným nastavením detektoru, následně s přizpůsobeným nastavením detektoru.

#### Přesnost

V tabulce 6.1 je porovnání výsledků různých přístupů k měření rychlosti.

- kamera – Rychlost vypočítána z videozáznamu. Na cyklostezku byly umístěny značky ve vzdálenosti přesně 2 metry od sebe. Podle času průjezdu mezi těmito značkami jsem vypočítal rychlost.
- radar1 – Měření radarem, analýza jednoho signálu pomocí knihovny v C.



Obrázek 6.1: Rozestavění hardware na cyklostezce



Obrázek 6.2: Pohled na měřicí systém na cyklostezce

Objekt	typ	kamera	radar1	radar2	matlab
1	c	24	23,5	23,7	24
2	b	15,7	13,5	15	15
3	b	19,5	17,7	18,6	19
4	b	14,3	13,4	14,2	14
5	b	14,6	14,4	14,4	15
6	c	34	32,9	33,9	32

Tabulka 6.1: Porovnání rychlostí podle různých měření km/h

- radar2 – Měření radarem, analýza dvou signálů pomocí knihovny C, korekce podle úhlu.
- matlab – Měření radarem, analýza jednoho signálu pomocí programu matlab. Odečet hodnot z grafu – menší přesnost.

Při porovnání zjistíme, že rychlosti změřené různými přístupy se znatelně odlišují. Odchylka dosahuje až 15%. Je taky vidět, že hodnota u radar1 je vždy nejnižší. Naopak největší je z pravidla u sloupce kamera.

U měření podle kamery je zkreslení optiky. Značky vzdálenosti jsou vidět pod úhlem. Čím blíže kameře se objekt pohybuje, tím kratší se jeví jeho trasa. Čím blíže je tedy objekt, tím kratší dobu průjezdu pozorovatel určí, rychlosti proto stoupají.

Při měření radaru může docházet ke zkreslení kvůli odchylce pohybu od osy radaru. Naměřená hodnota je potom vždy nižší než reálná. Odchylka  $15^\circ$  způsobí při rychlosti  $15 \text{ kmh}^{-1}$  nepřesnost  $0,5 \text{ kmh}^{-1}$ .

Při měření rychlosti není triviální určit opravdovou rychlost objektu. Dle úvah o zkreslení by se pravá rychlost měla nacházet mezi rychlostmi kamera a radar1. Tomu bez výjimky odpovídá sloupec radar2, který by opravdu měl dosahovat nejvyšší přesnosti.

## Spolehlivost

U spolehlivosti jsem zkoumal, jaké předměty jsou detekované a jaký je jejich počet. Z nahrávek jsem vyřadil nestandardní objekty, jako např. auta. Podrobně jsem zkoumal jednu nahrávku (cca. 5 minut záznamu). Výsledky jsou v tabulce 6.2. Všechny detekce byly prováděny jedním detektorem. Nejdříve se základním nastavením, potom se sníženou a zvýšenou citlivostí.

Souhrnná tabulka 6.3 zobrazuje 4 měření po sobě. Z 80 sportovců bylo detekováno 78. Ve skutečnosti bylo detekováno 77 správně a jeden cíl byl falešný. Při základním nastavení a při zvýšené citlivosti se chybovost pohybovala kolem 3,5 %.

## Poznatky

- Při změně citlivosti se počet detekovaných objektů mění napříč typy. Předpokládal jsem, že se bude nejvíce dotýkat chodců a cyklistů.
- Nejlepší výsledky dodávalo základní nastavení. Pokus o kalibraci nevylepší výsledek.

Problém, který se projevil nejvíce je nemožnost rozeznat sportovce, kteří jsou blízko u sebe. Rozstup musí být alespoň 0,7 sekundy, jinak sportovci nejsou rozlišitelní. To je při rychlosti  $20 \text{ kmh}^{-1}$  cca. 4 metry. Rozlišení se dá zlepšit zvýšením prahu citlivosti. Menší



Objekt	kamera	detektor základ	detektor úprava	detektor úprava2
cyklisté	5	4	4	5
bruslaři	9	10	8	11
běžci	7	7	6	7
chodci	3	2	2	2
celkem	24	23	20	25

Tabulka 6.2: Detekce sportovců

měření	na nahrávce	detektor základ	detektor úprava	detektor úprava2
1	33	31	30	33
2	10	10	10	10
3	24	23	20	25
4	13	14	13	14
celkem	80	78	73	82

Tabulka 6.3: Detekce, souhrn měření

rozlišení paradoxně pomáhá zvýšit rozlišovací schopnost – obrazy sportovců méně splývají dohromady. Pokud jede sportovec před autem, není možné ho rozeznat. Dochází k detekci automobilu. A to na značnou vzdálenost.

### Dosah radaru

Pro zajímavost jsem vypočítal reálný dosah radaru. Počítal jsem čas od projetí kolem radaru po konec detekce, analogicky pro sportovce směřující k radaru od začátku detekce po projetí kolem radaru. Podle jejich průměrné rychlosti jsem určil maximální detekovanou vzdálenost od radaru. Hodnoty nejsou příliš přesné a to se projevilo na jejich rozptylu. Pro shrnutí by se dalo říct, že modulem KMC-4 systém detekuje sportovce na 20 metrů a auta na 80 metrů.

Při srovnání s tabulkovými hodnotami je u sportovců dosah zhruba poloviční. Vzhledem k obtížnosti určení RCS a nepřesnosti při určování vzdálenosti z toho nevyvozují žádné závěry. Snad jen doporučení, že nejlépe pro sportovce systém funguje od pěti do dvaceti metrů od modulu.

## 6.2 Výsledky

Knihovna podporující měření sportovců je funkční. To dokazují dva programy na ní postavené. Z výsledků testování vyplývá, že měření sportovců těmito moduly má smysl. Nejen, že moduly disponují dostatečným výkonem pro měření, výsledky jsou dokonce velmi přesné. Při měření je radar postavený bokem od dráhy sportovce. Proto jsou hodnoty naměřené modulem KMC-1 vždy nižší, než reálná rychlost. Při použití KMC-4 s implementací úhlové korekce se přesnost zdatelně zvýší.

Při detekci sportovců jsem dosáhl úspěšnosti téměř 97%. Nedetekovatelné jsou případy, kdy jsou sportovci příliš blízko u sebe. Pro lepší výsledky by v budoucnu detektor mohl označit sektory, které mají neobvyklý příznak (vysoký výkon, delší doba záznamu) a ty poslat k dalšímu zpracování.

# Kapitola 7

## Závěr

V této práci jsem se zabýval měřením rychlosti sportovců. K dispozici jsem měl radary s kontinuální vlnou, které se používají ke sledování silniční dopravy. Nastudoval jsem funkci radarů a pojmů s nimi spojených. Detailně jsem se zaměřil na radary s kontinuální vlnou, v kapitole 2. Následně jsem se zabýval zpracováním signálu a to jak teoretickou částí, tak i praktickými problémy, což jsem popsal v kapitole 3. Z praktických problémů vycházela analýza a následně návrh programu viz kapitola 4. V kapitole 5 rozebírám podobu knihovny, její funkci a datové struktury. Závěrečná kapitola 6 dokazuje funkčnost vytvořeného systému. Zabývá se jeho přesností a spolehlivostí. Testování dokázalo, že implementovaná knihovna je pro účely měření sportovců funkční a je možné ji využívat. Je možné na ní stavět programy pro různé moduly radarů. Sestavené programy zachycují sportovce bez problémů a rychlost určují relativně přesně.

Pokračování práce může zajistit přesnější detekci sportovců. Do programu bych přidal profily přednastavené pro různé sportovní disciplíny. Jedno nastavení by na cyklostezce rozlišovalo cyklisty, běžce a bruslaře, jiné by na sjezdovce měřilo více lyžařů zároveň. Dalším krokem by mohla být podpora okruhových sportů, kde by bylo možné tímto způsobem zjistit počet okruhů.

Jako nejzajímavější možnost využití shledávám propojení s fotoaparátem. Fotografie sportovce s jeho rychlostí může sloužit jako neobvyklá turistická atrakce.

# Literatura

- [1] ČERNOCKÝ, J.: *Zpracování řečových signálů, studijní opora*. FIT VUT v Brně, 2006.
- [2] MAHAFZA, Bassem R.: *Radar signal analysis and processing using MATLAB*. Boca Raton: CRC Press, 2009, ISBN 1420066439.
- [3] PRESS, William H.: *Numerical recipes in C: the art of scientific computing. 2nd ed.* Cambridge: Cambridge University Press, 1992, ISBN 0-521-43108-5.
- [4] RFbeam Microwave GmbH: *K-MC1 RADAR TRANSCEIVER*. 2011 [cit. 2016-04-30].  
URL [http://www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/datasheets/Datasheet\\_K-MC1.pdf](http://www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/datasheets/Datasheet_K-MC1.pdf)
- [5] RFbeam Microwave GmbH: *K-MC4 RADAR TRANSCEIVER*. 2012 [cit. 2016-04-30].  
URL [http://www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/datasheets/Datasheet\\_K-MC4.pdf](http://www.rfbeam.ch/fileadmin/downloads/datasheets/Datasheet_K-MC4.pdf)
- [6] SKOLNIK, Merrill I.: *Radar handbook. 3rd ed.* New York: McGraw-Hill, 2008, ISBN 0071485473.
- [7] WWW stránky: *WIKIPEDIA Window function [online]*. 20013 [cit. 2016-05-02].  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Window\\_function](https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function)
- [8] WWW stránky: *WIKIMEDIA COMMONS [online]*. 2006 [cit. 2016-05-02].  
URL [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Doppler\\_effect\\_diagrammatic.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Doppler_effect_diagrammatic.png)
- [9] WWW stránky: *Radar Tutorial [online]*. 2011 [cit. 2016-05-02].  
URL <http://www.radartutorial.eu>