

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

MĚŘENÍ RYCHLOSTI S POUŽITÍM RADARU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ ANDRLA

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

MĚŘENÍ RYCHLOSTI S POUŽITÍM RADARU

SPEED MEASUREMENT USING RADAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ ANDRLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ MARŠÍK

BRNO 2015

Abstrakt

Cílem této práce je návrh a implementace programu, který detekuje automobil, vypočítá jeho rychlost, provede korekci na základě úhlu a uloží tento údaj do statistiky.

Abstract

The principal goal of this bachelor thesis is design and implementation of the program, that detects car, calculates his velocity, make a correction with using to angle and saves this information in statistics.

Klíčová slova

Radar, Radar s kontinuální vlnou, kosinusový faktor, Rychlá Furierova transformace, detekce objektu, Hammingovo okno

Keywords

Radar, Continualwave radar, cosinus factor, Fast Furier transform, object detection, Hamming window

Citace

Jiří Andrla: Měření rychlosti s použitím radaru, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2015

Měření rychlosti s použitím radaru

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Maršíka.

.....

Jiří Andrla
21. května 2015

Poděkování

Děkuji vedoucímu této bakalářské práce panu Ing. Lukáši Maršíkovi za věnovaný čas při seznamování s principy radarů, pomoci s měřením dat, poskytnutou odbornou pomoc a nasměrování při řešení této práce.

© Jiří Andrla, 2015.

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

Obsah

1	Úvod	2
2	Radary	3
2.1	Rozdělení radarů podle umístění antén	3
2.2	Princip Radaru	3
2.3	Pulzní radary	3
2.4	Radary s kontinuální vlnou	3
2.5	Princip K-MC4	4
2.6	Elektromagnetická vlna	4
2.7	Dopplerův jev	5
3	Zpracování radarového signálu	9
3.1	Okénkové funkce	9
3.2	Stejnoseměrná složka	10
3.3	Vytvoření komplexního signálu	11
3.4	Rychlá diskretní Fourierova transformace (FFT)	11
3.5	Zpřesnění výpočtu	11
3.6	Statistika	11
4	Praktická analýza	13
4.1	Měření	13
4.2	Vzorkování a uložení dat	13
4.3	Předzpracování signálů	13
4.4	Frekvenční spektrum a jeho analýza	14
4.5	Detekce objektu	18
5	Detekce objektů	19
5.1	Lineární frekvenční modulace (LFM)	19
5.2	Detekce na základě rozdílných rychlostí a více vrcholů ve frekvenčním spektru	19
6	Implementace v C++	22
6.1	Optimalizace	22
7	Závěr	24

Kapitola 1

Úvod

V poslední době se stalo měření rychlosti automobilů velmi populární. V mnoha obcích jsou na příjezdových komunikacích radary, které slouží k zpomalení řidičů. Řídí se myšlenkou, kdy nezávislý přístroj určí rychlost automobilu a předpokládá se, že řidiči porušující maximální povolenou rychlost po upozornění na konaný přestupek zareagují a zpomalí svůj vůz. Tyto radary neměří úplně přesně, chybu měření ovlivňuje kosinusový faktor. Tuto chybu lze eliminovat měřením rychlosti s využitím radaru pod úhlem. Touto problematikou se bude zabývat tato práce. Měření rychlosti pod úhlem má i další výhody. Pozitivní věcí je, že radar je umístěn několik metrů od okraje vozovky, a proto radar není nápadný. Z tohoto důvodu může skrytě měřit rychlosti projíždějících dopravních prostředků a z těchto údajů vytvářet statistiky, které mohou být zajímavé, jak pro policii, tak pro města a vesnice.

Cílem této práce je návrh a implementace programu, který detekuje automobil, vypočítá jeho rychlost a uloží tento údaj do statistiky.

Kapitola 2

Radary

Technologie důležité pro vynalezení radaru se začali objevovat koncem 19. století. Jednalo se nejprve o zjištění chování elektromagnetické vlny, zkonstruování prvního vysílače elektromagnetických vln a poté i přijímače. Spojování těchto znalostí umožnilo vývoj zařízení dnes nazývaného radar. Termín radar vznikl z anglického Radio Detection And Ranging. [9]

2.1 Rozdělení radarů podle umístění antén

Monostatický radar má vysílací i přijímací anténu na stejném místě. Předpokládá se, že vysílaný signál se od objektu odrazí zpět k radaru. Toto řešení umožňuje kompaktní řešení radarů. Multistatický radar má antény rozmístěné na různých místech a počítá se s tím, že se signál odrazí k přijímacím anténám. Tento typ radarů je využíván především ve vojenském průmyslu.

2.2 Princip Radaru

Radar je zařízení určené k detekci a lokalizaci objektů. Využívá vysílače elektromagnetických vln. Ten vysílá elektromagnetické vlny do prostoru, ve kterém se dále šíří. Předpokládá se, že elektromagnetické vlny narazí na překážku, od které se vlna odrazí zpět k radaru. Radar odražený signál zachytí na přijímací anténě, kde je vstupní elektromagnetická vlna přeměněna na elektrický signál. [8] Na základě rozdílu energií vyslaného a přijatého signálu a časové prodlevy, je určena rychlost objektu respektive jeho vzdálenost.

2.3 Pulzní radary

Tyto radary vysílají energeticky silné pulzy po krátký čas a poté anténu přepnou z výstupního režimu do režimu vstupního a čekají na odraženou elektromagnetickou vlnu. Tyto radary využívají možnosti silného pulsu pro daleký dosah. [8] Jsou využívány ve vojenství a na letištích, pro detekci objektů v atmosféře, na vodě i na pevnině, nebo pro meteorologii.

2.4 Radary s kontinuální vlnou

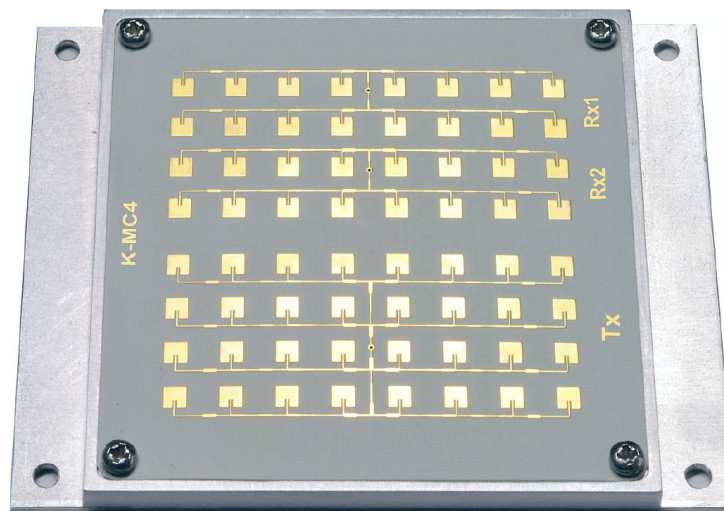
Stále vysílají elektromagnetické vlny. Z tohoto důvodu mají většinou jak vysílací tak přijímací anténu. Vlny mají typicky nižší energii než v případě pulzních radarů. Tento typ

radaru je využíván k měření rychlosti na silničních komunikacích [8], a proto se tato práce bude zabývat právě radarem s kontinuální vlnou.

Pro tuto práci byl vybrán radar K-MC4 od firmy Rfbeam Microwave GmbH, především z důvodu, že obsahuje dvě přijímací antény, na základě kterých lze zjistit úhel snímaného objektu.

2.5 Princip K-MC4

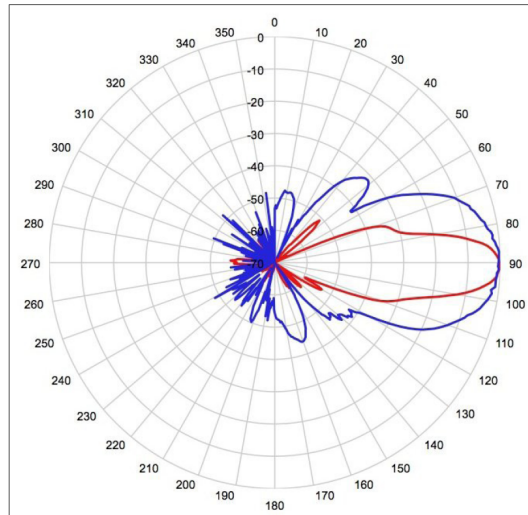
Radár vysílá mikrovlny z antény Tx o frekvenci v rozmezí $24,050 - 24,250 \text{ GHz}$ (umožňuje lineární frekvenční modulaci v závislosti na čase, využívá se pro úlohy s měřením vzdálenosti [6]). Z vysílací antény se šíří mikrovlny $\pm 15^\circ$ od osy radaru v horizontální rovině a $\pm 6^\circ$ ve vertikální rovině. [4] (Ilustruje obrázek 2.2) Tyto mikrovlny se od překážek odrazí zpět k radaru a jsou zachyceny na dvou přijímacích anténách $Rx1$ a $Rx2$. Z přijímacích antén jsou signály zesíleny v zesilovači (low-noise amplifier (LNA))[10]. Následuje směšovač, který odečte od přijatého signálu signál vysílaný. Tento výsledek je signál obsahující dopplerovské frekvence. Signál lze vyjádřit fázorem, neboli rotačním vektorem v komplexní rovině, rotujícím úhlovou rychlostí kolem počátku. Projekce tohoto fázoru do reálné osy $x(t)$ vyjadřuje reálnou funkci, která se nazývá synfázní. Imaginární složka $y(t)$, posunutá oproti synfázní složce o $\frac{\pi}{2}$ je označena jako složka kvadraturní. [1] Synfázní složka odpovídá kanálu I a kvadraturní složka odpovídá kanálu Q [11]. Tyto kanály jsou zároveň výstupy radaru K-MC4. Jelikož má radar dvě antény, tak má čtyři výstupní kanály, pro první anténu ($Rx1$) $I1$ a $Q1$, pro druhou anténu ($Rx2$) $I2$ a $Q2$.



Obrázek 2.1: Radar K-mc4 [4]

2.6 Elektromagnetická vlna

Elektromagnetická vlna je periodická změna elektromagnetického pole v prostoru a čase. Rychlost šíření její energie dosahuje ve vakuu rychlosti světla. Elektromagnetické vlny se liší vlnovými délkami a frekvencemi. [5] Tyto vlny dokázal v roce 1865 teoreticky popsat James



Obrázek 2.2: Vysílací rozsah antény Tx radaru K-mc4 [4]
modrou barvou je znázorněn vertikální rozsah a červenou barvou horizontální rozsah

Clerk Maxwell pomocí matematicko-fyzikálních rovnic, dnes známých jako Maxwellovy rovnice. [14] Elektromagnetické vlny jsou podle vlnových délek rozděleny do skupin. (ilustruje obrázek č. 2.3) Radary využívají z elektromagnetického spektra mikrovlny. Elektromagnetická vlna se dobře odráží od kovových předmětů a při tom zachovává zákon odrazu, kdy úhel dopadu k normále plochy rozhraní je roven úhlu odrazu k normále plochy rozhraní. Mikrovlny mají tu vlastnost, že dokážou některými materiály projít skrz (například dřevo, sádrokarton atd.)

2.7 Dopplerův jev

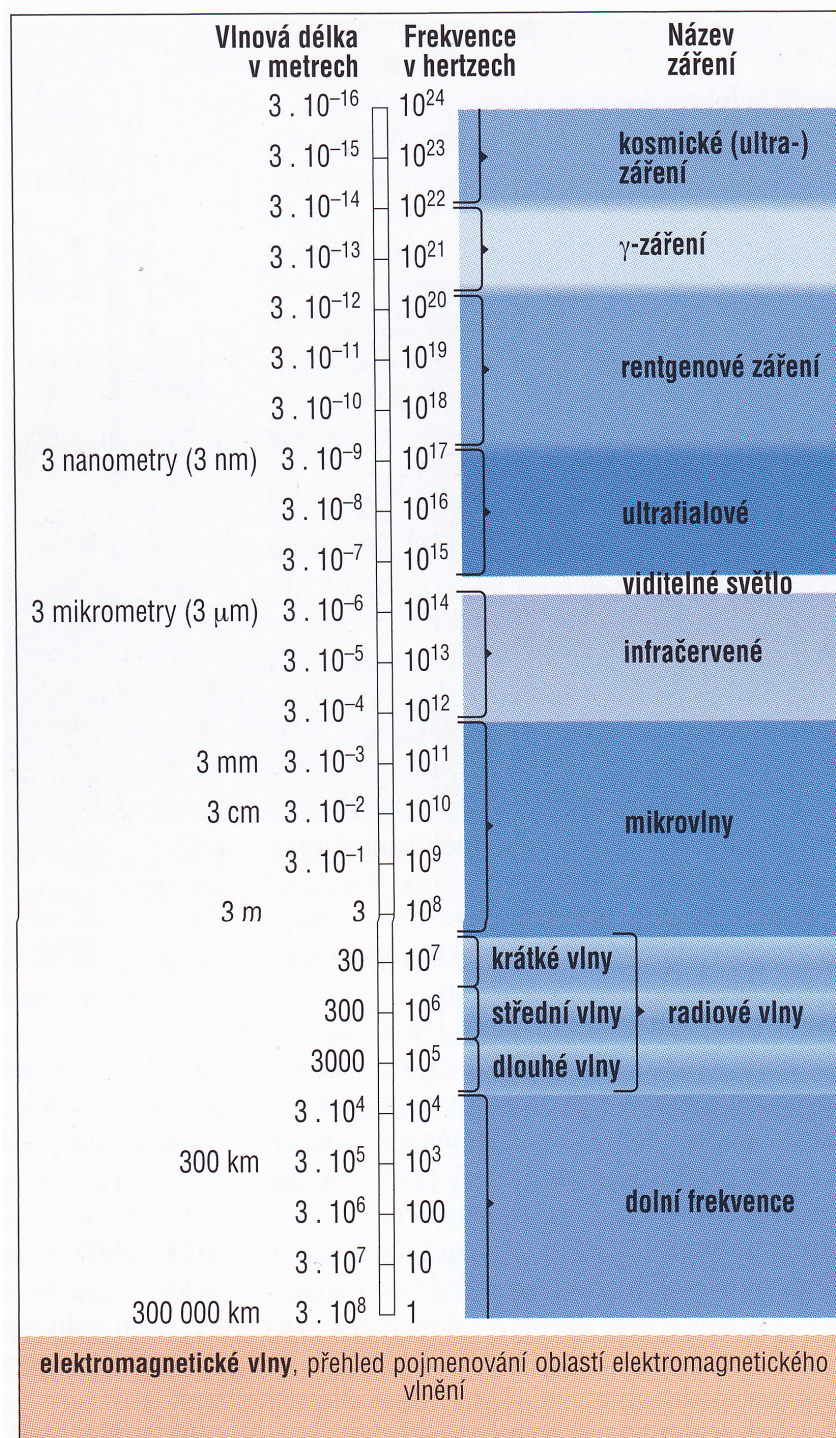
Dopplerův jev popisuje změnu frekvence přijímaného signálu vůči vyslanému signálu v závislosti na nenulové rychlosti zdroje nebo přijímače. Důsledkem přibližujícího se objektu k radaru je zachycení elektromagnetické vlny s vyšší frekvencí, než jaká je vysílací frekvence radaru. Pokud se objekt naopak od radaru vzdaluje, zachycená frekvence elektromagnetické vlny bude nižší (Tento jev zachycuje obrázek 2.4), λ značí vlnovou délku vyslané elektromagnetické vlny z radaru, λ' vlnovou délku elektromagnetické vlny odražené od objektu). Vztah pro výpočet frekvence:

$$f = f_0 * \frac{v}{v \pm v_{s,r}} \quad (2.1)$$

kde f je frekvence přijímaného signálu, f_0 je frekvence vysílaného signálu, v je rychlost šíření vln v dané látce, $v_{s,r}$ je relativní radiální rychlost od zdroje (znaménko +) respektive ke zdroji (znaménko -). [13] Pro výpočet rychlosti objektu vůči radaru lze využít následující vzorec:

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

kde v_r je relativní rychlost objektu, f_t vysílací kmitočet radaru a c je rychlost světla (299792458 m/s). [12] Tím, že lze pomocí předešlého vzorečku vypočítat relativní rychlost



Obrázek 2.3: Spektrum elektromagnetických vln [5]

(rychlost objektu vůči radaru), potřebujeme ještě vypočítat reálnou rychlost objektu. Tento výpočet můžeme provést dosazením do následující rovnice.

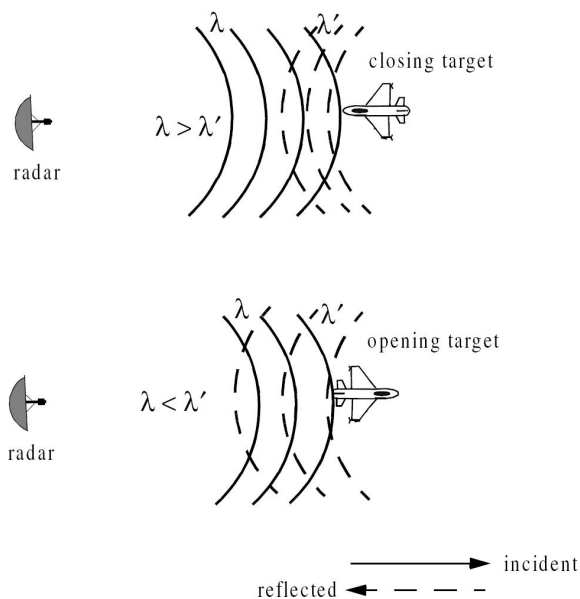
$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v \cos \theta}{\lambda} \quad (2.3)$$

Kde v_r je relativní rychlost objektu v m/s , λ je vlnová délka v metrech, v je absolutní rychlost v m/s a θ je úhel mezi směrem pohybuujícího se objektu a odraženou mikrovlnou, která dopadla na přijímací antény radaru.

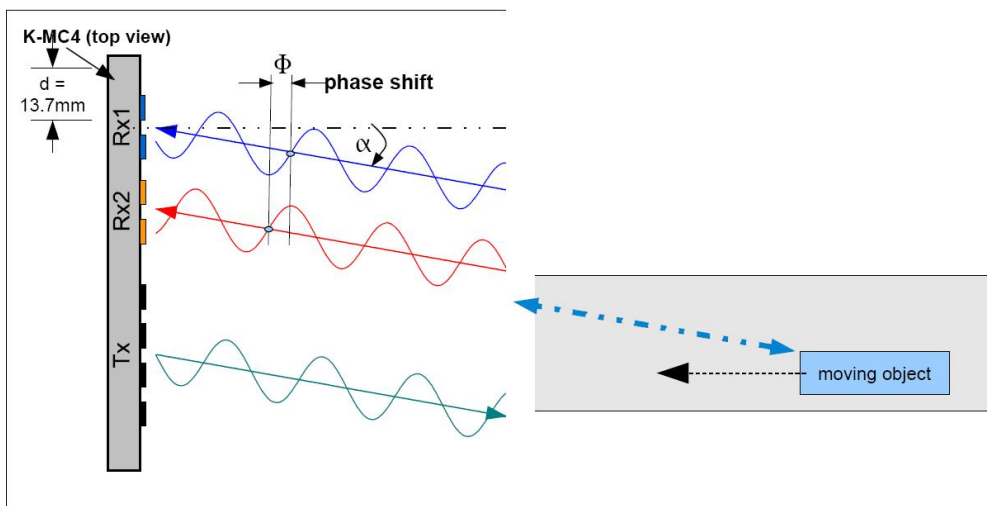
K zjištění úhlu θ potřebujeme radar se dvěma vstupními anténami. Takový radar zachycuje přijímaný signál na výstupních kanálech I a Q , kde vzájemné posunutí v čase o 90° určuje směr pohybuujícího se objektu. Pokud signál I předbíhá o 90° signál Q , pak se objekt přibližuje k radaru, v opačném případě se objekt pohybuje ve směru od radaru. K samotnému zjištění úhlu objektu od středové osy radaru slouží vzájemné odečtení úhlů, získaných z frekvenčního spektra odpovídající frekvenci porovnání stejných signálů z odlišných antén. V tomto konkrétním případě s použitím radaru K-MC4 porovnáním fází kanálů $I1$ a $I2$, nebo $Q1$ a $Q2$. Tohoto porovnání určí posunutí, které značíme Φ . Úhel pak vypočítáme podle vzorce:

$$\alpha = \frac{\Phi}{k} \quad (2.4)$$

Kde k je konstanta, konkrétně pro radar K-MC4 6, 7. Viz obrázek 2.5.



Obrázek 2.4: Dopplerovská změna frekvence [7]

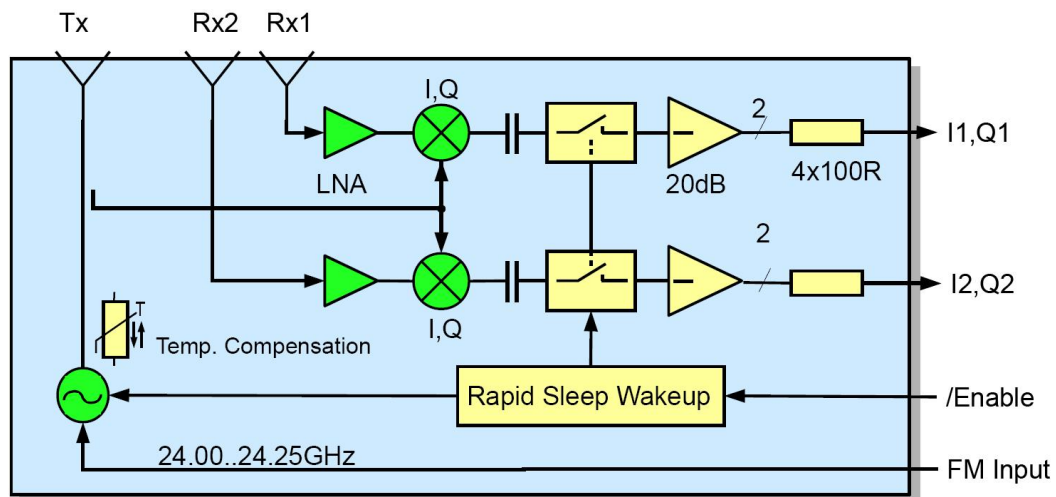


Obrázek 2.5: Rozdílná fáze na jednotlivých anténách [4]

Kapitola 3

Zpracování radarového signálu

Jako radarový výstup získáváme nízkofrekvenční signály I_1 , Q_1 , I_2 a Q_2 . Které jsou dále zpracovány a navzorkovány analogově-číslicovým převodníkem.



Obrázek 3.1: Blokové schéma radaru [4]

Na začátku jsou vzorky rozděleny na rámce, které se zpracovávají každý zvlášť. Délka takového rámce je vhodná určit dostatečně malá, aby signál bylo možno považovat za stacionární, ale na druhé straně dostatečně velká, aby bylo možno přesně odhadnout požadované parametry. [3] Vzhledem k budoucímu výpočtu rychlé diskrétní Fourierovy transformace (FFT) je vhodné délku rámce určit jako mocninu dvou. Algoritmus FFT je pro signály délky mocniny dvou velmi efektivní. Pro přesnější výpočet je dobré segmenty přes sebe překrýt pokud to nepřiměřeně nezpomalí výpočet.

3.1 Okénkové funkce

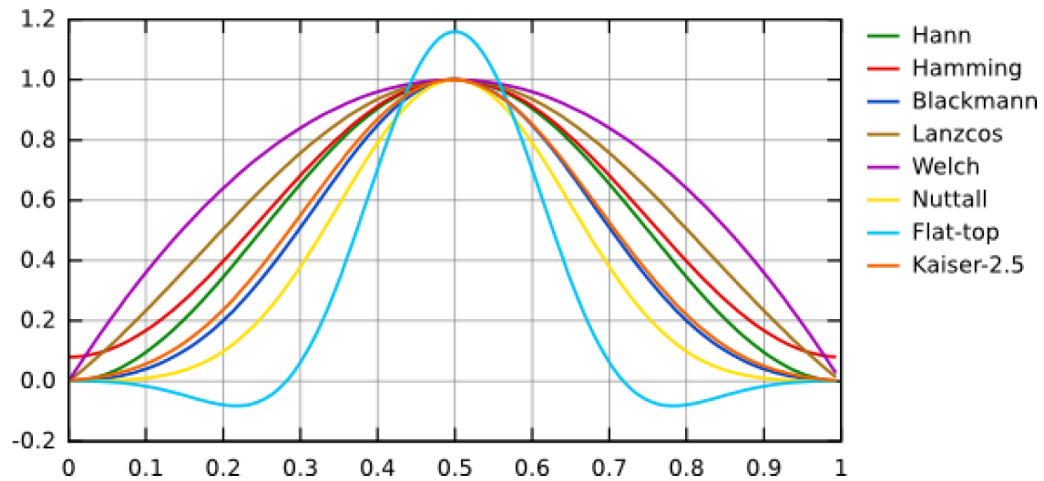
Výše popsaný postup rozdělení vzorků na jednotlivé rámce, lze pojmenovat i tak, že na vzorky aplikujeme tzn. Pravoúhlé okno, po kterém vznikne právě jeden rámeček, definice pravoúhlého okna:

$$w[n] = \begin{cases} 1 & \text{pro } 0 \leq n \leq l_{ram} - 1 \\ 2 & \text{jinde} \end{cases} \quad (3.1)$$

Existují i jiné okénkové funkce. V této práci bude využívána Hammingova okénková funkce. Ta je definována:

$$w[n] = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi n}{l_{ram}-1} & \text{pro } 0 \leq n \leq l_{ram} - 1 \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (3.2)$$

Pravoúhlé okno ve srovnání s Hammingovým oknem je selektivnější, ale spektrum zanášší většími frekvenčními komponentami. [3] Obrázek ukazuje nejznámější okénkové funkce.



Obrázek 3.2: Okénkové funkce [8]

3.2 Stejnoseměrná složka

Stejnoseměrná složka se do signálu dostala tak, že analogově-číslíkový převodník navzorkoval signál jako hodnoty v rozmezí 0 - 4096. Stejnoseměrná složka by negativně ovlivnila výsledky FFT, a protože nenese žádnou užitečnou informaci je dobré ji odstranit odečtením střední hodnoty. Tuto úpravu je dobré provést již před vynásobením rámce okénkovou funkcí.

Mohou nastat dvě situace, v prvním případě se vypočítává střední hodnota v reálném čase, kdy neznáme budoucí hodnoty, pak musíme do jisté míry střední hodnotu odhadnout (typicky rekurzivně), nebo střední hodnotu určujeme, až známe celý signál a v takovém případě střední hodnotu vypočítáme jako: [3]

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \quad (3.3)$$

kde N je počet vzorků.

3.3 Vytvoření komplexního signálu

Kanály $I1$, $Q1$ a $I2$, $Q2$ jsou reálné a imaginární části komplexních signálů. Z nich je nutné, po předešlých úpravách, vytvořit opět komplexní signál, který bude zpracován pomocí FFT.

$$signal = I1 + jQ1 \quad (3.4)$$

3.4 Rychlá diskrétní Fourierova transformace (FFT)

Vzhledem k situaci, kdy většina informací důležitých pro zjišťování rychlosti je zakódována ve frekvenčních složkách (a jeho fázích) výstupního signálu, je nutné udělat frekvenční analýzu signálu. K tomuto účelu slouží např. metoda rychlá Fourierova transformace (FFT). [8] Fourierova Transformace je matematická operace, která převede nesinusovou funkci na řadu sinusových složek [2], reprezentující frekvenční spektrum. Z absolutní hodnoty vektoru komplexních čísel (vektor fázorů) získáme zastoupení jednotlivých frekvencí pro daný rámeček. Jednotlivé prvky vektoru neodpovídají skutečným frekvencím, jsou to tzv. biny. Ty musí být na frekvenci převedeny pomocí následujících vzorců.

$$f = bin * \frac{f_{vzorkovací}}{N} \quad (3.5)$$

$$f = (N - bin) * \frac{f_{vzorkovací}}{N} \quad (3.6)$$

Kde f je odpovídající frekvence daného binu, $f_{vzorkovací}$ je vzorkovací frekvence radarového signálu a N je počet vzorků. Bin je index do vektoru frekvenčního spektra. První vzorec je pro biny menší nebo rovny $N/2$ a druhý vzorec je pro biny větší nebo rovny $N/2$.

Rozdíl v první a druhé polovině spektra je ve znaménku frekvence. Frekvence z první poloviny je kladná, objekt se pohybuje k radaru, v opačném případě od radaru.

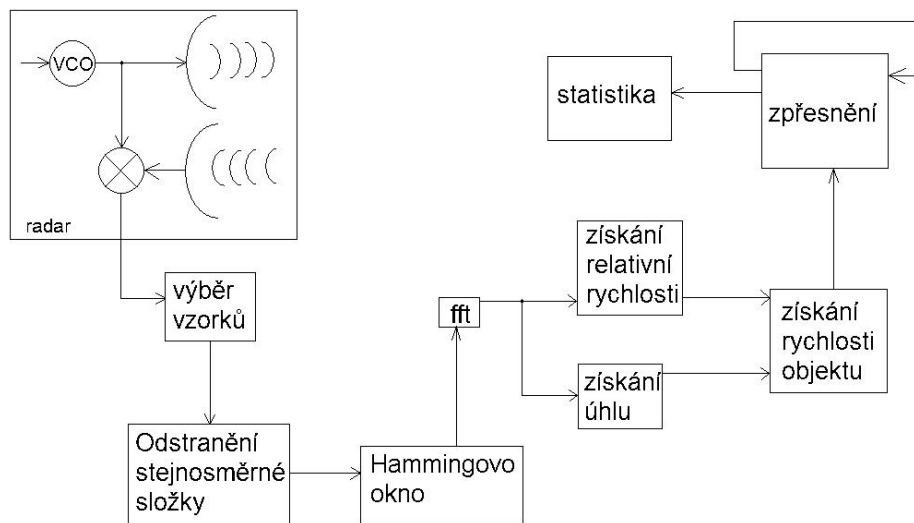
Výslednou rychlost vypočítáme pomocí Dopplerova jevu, který byl popsán výše.

3.5 Zpřesnění výpočtu

Na základě měnicího se úhlu mezi středovou osou radaru a pohybujícím se objektem, lze provádět několik měření a takto naměřenými hodnotami zpřesňovat určování rychlosti.

3.6 Statistika

Z vypočítaných rychlostí lze vytvářet automatickou statistiku, kolik daným místem projede automobilů, jakým směrem a kolik procent řidičů dodržuje maximální povolenou rychlost. Celý návrh programu ilustruje blokové schéma. (obrázek č. 3.3)



Obrázek 3.3: Blokové schéma programu

Kapitola 4

Praktická analýza

4.1 Měření

Nejprve bylo zapotřebí naměřit data z reálného prostředí. Při měření bylo nejdůležitější aby se správně určil úhel, pod kterým radar snímal projíždějící automobily. Tento údaj ovlivní veškeré další zpracování naměřených dat a při špatném určení by mohl vést k chybnému výpočtu rychlosti. Úhel byl naměřen od vodorovné přímky s okrajem vozovky a osou radaru. Tento úhel odpovídá úhlu, který svírá pohybující se objekt, když se nachází přímo na ose radaru. Ke korekci aktuálního úhlu je použito zjištění úhlu z frekvenčního spektra obou signálů, získaných z jednotlivých antén. Dle technické specifikace radar vysílá vlny v rozsahu $\pm 15^\circ$ od osy radaru. Pokud se automobil nachází v tomto rozmezí, měla by tato informace být obsažena v frekvenčním spektru.

4.2 Vzorkování a uložení dat

O analogově číslicový převod a nastavování vzorkovací frekvence a jiných technik měření se samotný radar K-MC4 nestará, proto je potřeba vytvořit elektronický obvod, který tuto funkci zajistí. Pro tuto práci bylo použito, k tomuto účelu, firmou Camea, vyvinuté zařízení, na kterém běží operační systém linux. Propojení mezi počítačem a zařízením je realizováno přes Ethernet a posíláním UDP paketů. Software vyvinutý k ovládání zařízení, který se spouští na PC umožňuje nastavení režimu radaru a také nastavení vzorkovací frekvence pro diskretní reprezentaci signálů, kanálů $I1$, $Q1$, $I2$ a $Q2$. Vzorkování probíhá v dvanácti bitovém analogově-číslcovém převodníku na základě vzorkovací frekvence. Data jsou uložena v binární podobě v tomto účelu vyvinuté struktuře souboru. Pro tuto úlohu byla použita vzorkovací frekvence 50000 Hz a neměnná frekvence radaru $24,150 \text{ GHz}$.

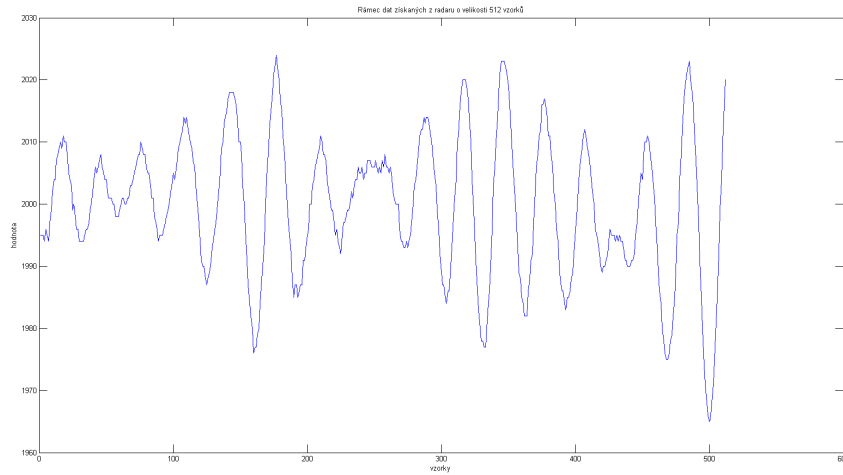
4.3 Předzpracování signálů

Postupně jsou načítána data ze souboru do rámců o vhodné zvolené délce. Čím je délka rámce větší, tím je získána přesnější frekvence. To je dáno diskretním výpočtem dle vzorce 3.5 nebo 3.6, kde při delším rámci získáme více binů a tím na stejnou vzorkovací frekvenci více možných výsledků. V opačném směru je však veden druhý požadavek na signál. Ten vyžaduje co možná nejkratší úsek signálu, aby mohl být prohlášen za stacionární, z čehož vyplývá, že nedojde ke zkreslení jednotlivých frekvencí. K lepším výsledkům těchto protichůdných požadavků slouží technika nazývaná zeropadding. Jedná se o metodu, kdy je

vybraný signál o délce několika vzorků prodloužen o nuly, dle požadované přesnosti výsledných frekvencí. Při této technice se může brát menší počet vzorků a přitom se dosáhne stejné přesnosti, jak s použitím většího počtu vzorků. Nevýhodou je, že je potřeba vyššího výpočetního výkonu pro data, o která se signál rozšířil.

Pro potřeby této práce bylo zjištěno, že nejvýhodnější kombinací délky vzorků a zeropaddingu je 512 vzorků s rozšířením pomocí zeropaddingu na 1024 vzorků. Při snaze o jemnější interval mezi získanými frekvencemi, se stává, že výstupy z FFT pro dominantní frekvence mohou být v odlišných bincích. V takovém případě je další zpracování nemožné. Délka rámce je vždy určena jako mocnina dvou, pro které je efektivní algoritmus FFT.

Rámec má tedy délku 512 vzorků. Program vytvoří čtyři rámce pro jednotlivé kanály a načte do nich data. (ukázka načteného kanálu [I1 4.1](#)) Tyto data jsou dále upravovány, tak jak bylo popsáno v kapitole zpracování radarových dat. Nejprve je odečtena stejnosměrná složka [4.2](#), pak je signál upraven vynásobením Hammingovým oknem [4.3](#) a následuje spojení kanálů do komplexního signálu [2.3](#).



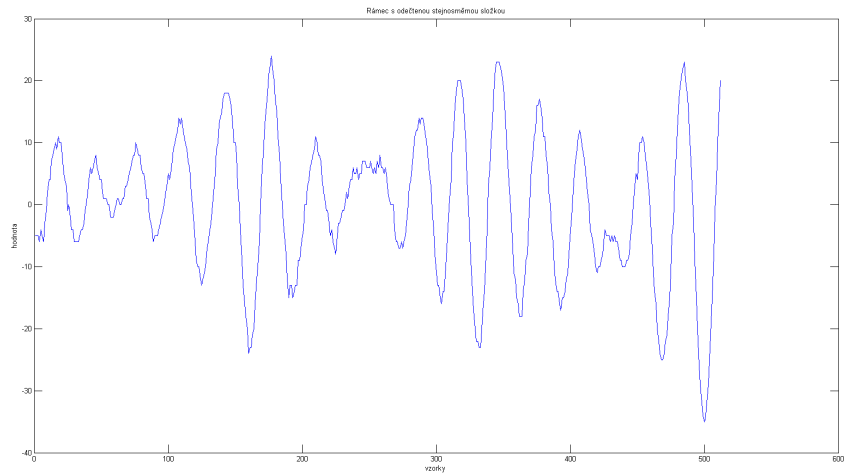
Obrázek 4.1: Reálná část radarového signálu

4.4 Frekvenční spektrum a jeho analýza

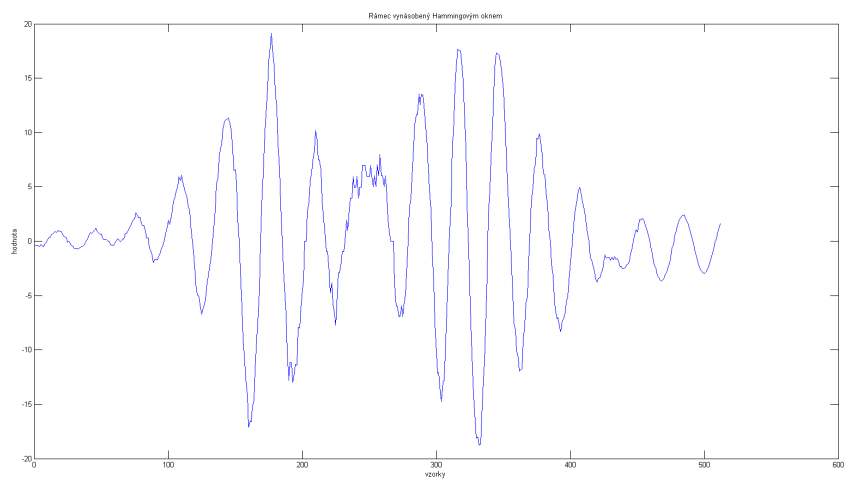
Z komplexního signálu se frekvenční spektrum získá pomocí FFT. Pro najetí majoritních frekvencí je zapotřebí z jednotlivých frekvencí, obsažených ve frekvenčním spektru, vypočítat fázory. Ty určí jak moc jsou jednotlivé frekvence v signálu zastoupeny. Fázor je vypočítán, jako absolutní hodnota komplexního signálu, ta se vypočítá pomocí Pythagorovy věty z reálné (r) a imaginární (i) složky komplexního signálu dle následujícího vzorce.

$$abs = \sqrt{r^2 + i^2} \quad (4.1)$$

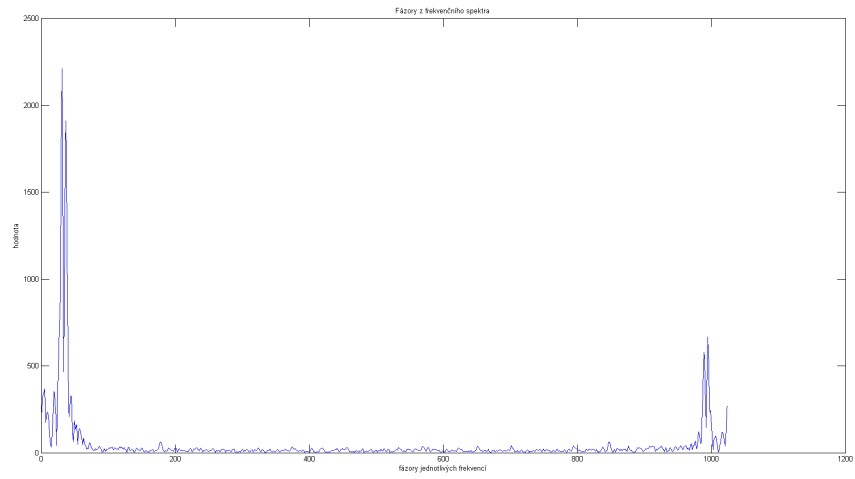
Když jsou známy velikosti fázorů jednotlivých frekvencí je zapotřebí z nich vybrat takové, které budou zajímavé pro další analýzu. Jelikož frekvence, které jsou ve velké míře zastoupeny v signálu, mají velkou hodnotu fázoru a frekvence málo zastoupené mají fázory s malou hodnotou, je zapotřebí určit vhodný práh, jehož hodnota určí, které frekvence budou dále analyzovány. Tímto se odstraní z výpočtu rychlosti šum, který radar zaznamená.



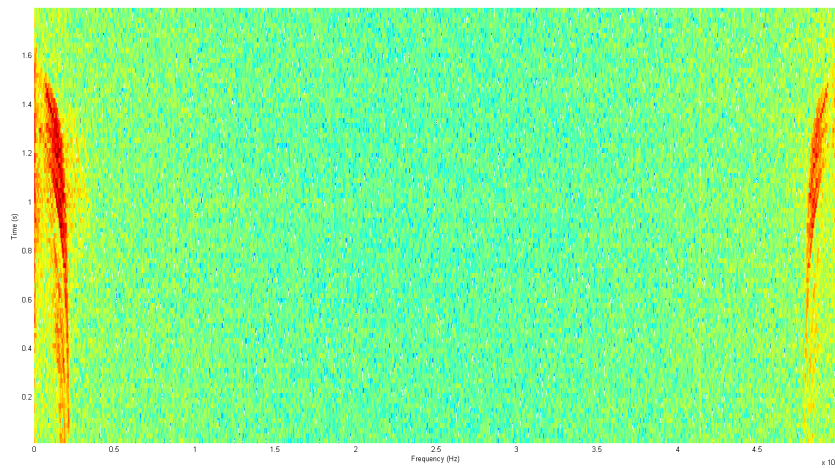
Obrázek 4.2: Rámec po odečtení stejnosměrné složky



Obrázek 4.3: Rámec vynásobený Hammingovou funkcí



Obrázek 4.4: Fázory pro jednotlivé frekvence



Obrázek 4.5: Spektrogram průjezdu jednoho automobilu

Ještě před tím, se musí najít vrcholy ve vektoru fázorů. Pro další analýzu budou vybrány frekvence které odpovídají vrcholům v fázorovém spektru a zároveň mají hodnotu vyšší než zvolený práh. Vektor fázorů s nalezenými vrcholy ukazuje obrázek číslo 2.3.

Nalezený vrchol ve vektoru fázorů je dále zpracován, jen v případě, že se jeho index ve vektoru shoduje s indexem ve vektoru fázorů z druhé antény. Pro jednotlivé frekvence jsou zjištěny úhly dle kapitoly 2.7. Z frekvenčního spektra je vybráno komplexní číslo odpovídající fázoru nalezeného jako vrchol v fázorovém spektru. Z tohoto čísla je vypočítán úhel pomocí funkce tangens.

$$uhel = \tan \frac{i}{r} \quad (4.2)$$

kde i je imaginární a r reálná složka komplexního čísla. Úhel od osy radaru je vypočítán jako rozdíl takto získaných úhlů z jednotlivých antén.

$$\Phi = \beta - \gamma \quad (4.3)$$

kde Φ je posunutí fází mezi oběma anténami radaru, β je úhel získaný z frekvence z první antény a γ je úhel získaný z frekvence z druhé antény.

Posunutí Φ může být mimo interval $< -\pi, \pi >$, proto je nutné ho do tohoto intervalu převést a to přičtením 2π pro záporné úhly, které jsou menší než $-\pi$, nebo odečtením 2π pro kladné úhly, které jsou větší než π .

```
if(posunuti > M_PI)
    posunuti-=2*M_PI;
if(posunuti < -M_PI)
    posunuti+=2*M_PI;
```

Na závěr je posunutí vyděleno konstantou radaru, která je v případě radaru K-mc4 6,7. Vzorec 2.4.

K úhlu α je potřeba připočíst úhel radaru k vozovce (δ). Tento úhel byl nastaven při instalaci radaru před měřením (viz. kapitola 4.1).

$$\theta = \alpha + \delta \quad (4.4)$$

Když je z předcházejících výpočtů znám úhel, může být použit pro korekci rychlosti. Rychlost se vypočítá na základě dvou vzorců, jednoho na výpočet frekvence z frekvenčního spektra 3.5, nebo 3.6 a druhého na výpočet rychlosti. Oba sloučené vzorce vypadají následovně:

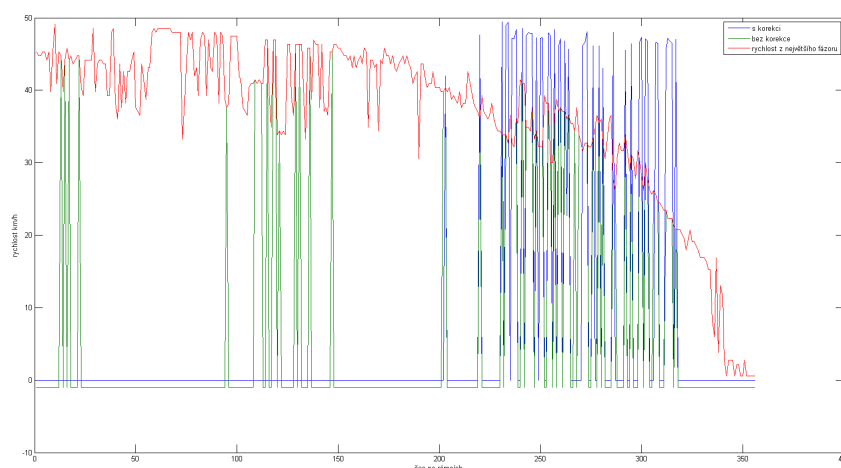
$$v_r = bin * \frac{f_v * c}{2 * f_r * N} \quad (4.5)$$

kde v_r je relativní rychlost (rychlost vůči radaru), f_v je vzorkovací frekvence, c je rychlost světla, f_r je frekvence mikrovln vysílaných radarem a N je počet prvků frekvenčního spektra.

Reálná rychlost (v) se získá ze vzorce:

$$v = \frac{v_r}{\cos \theta} \quad (4.6)$$

Obrázek 4.6 ukazuje hodnoty pro odlišně spočítané rychlosti. Nahrávka dat, z které jsou rychlosti vypočítány, proběhla mezi budovami Fakulty informačních technologií na



Obrázek 4.6: Ukázka výpočtu rychlosti s korekcí a bez korekce

ulici Božetěchové. Červeně jsou ukázány hodnoty rychlosti bez korekce úhlu, vypočítané jen z největších fázorů v každém rámcu. Zeleně je zobrazena rychlost, také bez korekce úhlu, ale jen v případě, pokud dosahuje fázor hodnoty větší než práh. Můžeme si všimnout, že oproti rychlosti vypočítané jen z maxim fázorů, je vypočítávána výrazně méně. To můžeme přisoudit, že v prvním případě se jedná o mikrovlny, které byly odraženy od budovy nebo zaparkované automobily, a proto nemají takovou sílu. Modře je znázorněna rychlost vypočítaná s korekcí úhlu a jen pokud frekvence z obou přijímacích antén splňují podmínky:

- maximální fázor je větší než práh
- maximální fázor je ve stejném binu v obou spektrech z každé antény
- úhel dopadu mikrovlny na radar je v rozmezí $\pm 15^\circ$

4.5 Detekce objektu

Do této chvíle bylo v práci řešeno získání jedné zpřesněné rychlosti, pomocí úhlu. V praxi se od projíždějícího automobilu získávají frekvenční spektra s více vrcholy, které jsou způsobeny odrazy mikrovln od různých částí automobilu pod různým úhlem. Z těchto vrcholů si pak může algoritmus vybrat ty, které splňují všechny podmínky pro nezkrácenou frekvenci. V první řadě je to potvrzení, že vrchol se nachází v spektru z každé antény, a že mikrovlna dopadla na radar pod očekávaným úhlem, to znamená, že se nejedná o odraz od nejrůznějších překážek, které mohou stát v šíření mikrovln v cestě. Více vrcholů ve spektru se projevuje typicky až se maska automobilu dostane za osu radaru, pak se mikrovlny odrážejí kromě masky postupně i od kliky spolujezdce a kliky zadních dveří, popřípadě jiných hran, které umožňují odraz mikrovlny zpět k radaru. Více odrazů pod různými úhly je přínosem a umožňuje to zpřesnit měření rychlosti automobilu, díky získání více vrcholů a tudíž více frekvencí můžeme pro každou vypočítat rychlost a provést korekci na základě úhlu. Díky tomu získáme více přesných dat o rychlosti a když je poté všechny zprůměrujeme dostaneme přijatelně přesnou rychlost.

Kapitola 5

Detekce objektů

5.1 Lineární frekvenční modulace (LFM)

Standardní technika pro detekci objektů je založena na technice zjišťování vzdálenosti. Tato technika používá měření pomocí lineární frekvenční modulace, při které se v průběhu měření mění frekvence a očekává se, že tato změna se projeví na frekvenci zachycené mikrovlny. Z této informace se pak získá vzdálenost objektu, od kterého se mikrovlna odrazila.

5.2 Detekce na základě rozdílných rychlostí a více vrcholů ve frekvenčním spektru

Myšlenka této detekce spočívá v mínění, že více automobilů pohybujících se v prostoru, kam radar vysílá mikrovlny, zanechá ve frekvenčním spektru více vysokých frekvenčních vrcholů. Pro ně se musí zvolit vhodně vysoký práh, který zaručí, že se bude jednat opravdu o samostatný objekt a ne jen o další část stejného automobilu. Ostatní frekvenční vrcholy jsou přepočítány na rychlost s korekcí úhlu a pokud splňují všechny podmínky, které byly zmiňovány výše, jsou přiřazeny k již detekovaným objektům.

Na začátku jsou načteny čtyři rámce radarových dat o velikosti 512 vzorků. Tyto rámce obsahují reálná čísla jeden pro kanál $I1$, druhý pro kanál $Q1$, třetí pro $I2$ a čtvrtý pro $Q2$. Pak dle kapitoly 3 je odstraněna stejnosměrná složka, rámec je vynásoben Hammingovým oknem a jsou vytvořeny dva komplexní signály, které reprezentují signály z antén $Rx1$ a $Rx2$. Tyto signály jsou dle zeropaddingu rozšířeny nulami na délku 1024 vzorků. Následuje výpočet frekvenčního spektra pomocí FFT. Z frekvenčního spektra jsou pomocí Pythagorové věty z každého komplexního čísla vypočítány fázory, které se dále prohledávají funkcí pro nalezení frekvenčních vrcholů. Z těchto vrcholů jsou získány dva vektory vrcholů. První z nich obsahuje informaci kolik objektů se nachází ve frekvenčním spektru, které musí mít vrchol vyšší než práh pro detekci objektu. Tento práh detekce byl zvolen tak, aby v případě výskytu této, nebo vyšší hodnoty v fázorovém spektru, bylo jednoznačné, že se jedná o nejvíce zastoupenou frekvenci, přijímanou od objektu. Pokud je detekováno více objektu než v je aktuální počet, je provedeno vytipování, jaká rychlost může odpovídat novému objektu. Vytipování se provádí pomocí najití rychlosti, která není podobná s rychlostmi již detekovaných objektů. Na začátku jsou vybrány poslední nalezené rychlosti jednotlivých detekovaných objektů a ty jsou porovnávány s nově vypočítanými rychlostmi z aktuálně zpracovávaného rámce. Pokud je nalezena shoda, je nová rychlost odstraněná z možných adeptů na rychlost nového objektu. Pokud jsou porovnány všechny rychlosti a není pone-

chána jen jedna rychlost, je celý proces porovnávání rychlostí opakován s tolerancí. Tato tolerance každou iteraci roste. Předpokládá se, že zůstane jen jediná rychlost a ta patří nově se objevenému objektu. O detekovaném objektu tento algoritmus potřebuje mít informaci, jak dlouho se bude vyskytovat v radarovém rozsahu. Tato informace je důležitá, protože určuje, kdy už objekt není v oblasti kam radar vysílá mikrovlny a potenciálně detekované velké fázozy interpretuje jako nový objekt. V tomto algoritmu, je tato přibližná informace získána z rychlosti automobilu na začátku detekce a zadané vzdálenosti radaru od středu vozovky. Informace o vzdálenosti od středu vozovky spolu s údajem o úhlu jsou jediné dvě konstanty, které musí být algoritmu zadány před samotným analyzováním dat.

Pro získání informace, jak přibližně dlouho bude objekt v dosahu radaru musíme použít následující vorce. Situaci se snaží nastínit obrázek 5.1. stranu c vypočítáme pomocí vzorce:

$$c = \frac{\text{vzdálenost}}{\cos(90 - (\alpha - 15))} \quad (5.1)$$

kde α je myšlen úhel, který svírá osa radaru s okrajem vozovky. V tomto případě je α rovna 45° .

Pro výpočet délky potřebujeme sinovou větu:

$$\text{delka} = \frac{c * \sin(30)}{\sin(\alpha - 15)} \quad (5.2)$$

kde od α je odečteno 15° , protože rozsah od osy radaru je 15° . K délce je nutné přičíst délku vozidla, která je přibližně určena na 5 metrů.

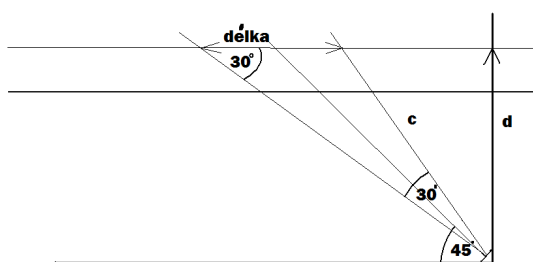
čas, který vozidlo potřebuje na projetí délky lze vypočítat ze vzorce:

$$t = \frac{\text{delka}}{v} \quad (5.3)$$

a konečně čas, který uběhne během jednoho rámcu je:

$$t_1 = \frac{512}{50000} 0.5 \quad (5.4)$$

Násobené 0.5, z důvodu překrytí rámců.



Obrázek 5.1: Ukázka situace

Po potenciální detekci nového objektu jsou zpracovány všechny frekvenční vrcholy ve fázorovém spektru větší než detekční práh. Pokud jsou v signálech z obou dvou antén nalezeny vrcholy pod stejným binem a a úhel splňuje podmínku $\pm 15^\circ$ od osy radaru, pak je pro rychlost vyhledán objekt s nejpodobnější poslední rychlostí. Jelikož, platí, že v tyto frekvence jsou každá jiného objektu, jakmile je jedna rychlost v tomto rámci přidělena, další z rychlost odpovídající danému fázoru většího jak práh detekce, být přidělena nemůže.

Obdobně jsou předělovány rychlosti detekovaným objektům, které mají fázorové vrcholy nižší než detekční práh, ale vyšší než druhý práh. Jen už neplatí podmínka, že jednomu objektu nemůže být přiřazeno více rychlostí.

Kapitola 6

Implementace v C++

V C++ byl implementován algoritmus detekce objektů spolu s výpočtem korekce rychlosti na základě úhlů. K výpočtu Fourierovy transformace byla použita knihovna FFTW.

6.1 Optimalizace

Vzhledem k tomu, že využití této aplikace je předpokládáno jako vestavěný systém, je dobré se zaměřit na možné optimalizace, aby bylo možné zpracování dat v reálném čase, vždy po zaplnění bufferu, o velikosti jednoho rámce.

Vytvoření konstant

Všechny konstanty je dobré spočítat na začátku programu. Proto všechny vzorce, které byly postupně použity jsou do sebe navzájem dosazeny a rovnice je upravena tak, aby bylo možné neměnné části spočítat na začátku programu. Příklad výpočtu rychlosti:

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t}c, f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v \cos \theta}{\lambda}, f_d = bin * \frac{f_{vzorkovací}}{N}$$

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t}c, v_r = v \cos \theta, f_d = bin * \frac{f_{vzorkovací}}{N}$$

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t}c, v = \frac{v_r}{\cos \theta}, f_d = bin * \frac{f_{vzorkovací}}{N}$$

$$v = \frac{\frac{bin * f_{vzorkovací}}{2f_t N}c}{\cos \theta}$$

$$v = \frac{v_r}{\cos \theta}, v_r = \frac{bin * f_{vzorkovací}}{2f_t N}c$$

$$v = \frac{v_r}{\cos \theta}, v_r = bin * k_1, k_1 = \frac{f_{vzorkovací}}{2f_t N}c$$

kde N je délka rámce s zeropaddingem.

Konstanta pro výpočet počtu rámců, kdy bude objekt detekován. je založen na

Sloučení předzpracování do jedné funkce

Původně byla pro každý jednotlivý krok předzpracování samostatně vytvořena funkce. Rychlejší bude vše sloučit do jedné funkce.

Kapitola 7

Závěr

Cílem práce bylo zkoumání a zhodnocení techniky měření rychlosti pod úhlem okolo 45° . Nalezení vhodného algoritmu pro výpočet rychlosti a vytvoření programu, který z radarových dat dokáže zjistit kolik automobilů a jakou rychlostí kolem radaru projelo.

Analyzováním signálů bylo zjištěno, že i na základě velkého úhlu, pod kterým jsou objekty měřeny, je možné vypočítat rychlost. V prostředí Matlab, bylo dosaženo dobrých výsledků při výpočtu rychlosti, pokud se v dosahu radaru, pohyboval pouze jeden automobil v jednom směru. Bylo ověřeno, že rychlost se rovnala rychlosti vypočtené z měření pod menším úhlem. Při tvorbě programu v C++, bylo použito algoritmu pro detekci objektu, který byl vymyšlen v této práci. Vycházel z jednoduché myšlenky, ale implementačně se ukázal dosti složitý a nepodařilo se prokázat univerzálnost tohoto algoritmu pro data získaná z různých míst. V případě pokračování této práce, by proto bylo dobré, měřit data s využitím lineární frekvenční modulace a použít standardní algoritmus pro detekci objektů. Tento přístup by měl zaručit detekci více objektů v jednom čase a umožnit lepší předpověď dalšího pohybu. V případě použití na jednoproudových komunikacích, lze použít i tento radar s čistě dopplerovským výpočtem rychlosti.

Zjištěné výhody měřením pod úhlem jsou, že můžeme určit úhel pro korekci rychlosti. V případě měření pod malým úhlem nejsme schopni určit, zda se mikrovlna odrazila od masky, čelního skla nebo boku auta. Výhodou také může být, že radar snímá méně vozovky, a proto nedochází ke zkreslení pomocí odrazů z dálky. Na druhou stranu, pokud je radar umístěn na pozici, která umožňuje mikrovlnám odrazy po projití nad komunikací zpět nad komunikaci, tato výhoda přestává platit a spíše se stává nevýhodou. Nevýhodou je, že musí být určen přesně úhel, pod kterým probíhá měření.

Literatura

- [1] ŽALUD, V.: *Moderní radioelektronika*. BEN - technická literatura, první vydání, 2000, 20 s., iISBN: 80-86056-47-3.
- [2] ŽALUD, V.: *Moderní radioelektronika*. BEN - technická literatura, první vydání, 2000, iISBN: 80-86056-47-3.
- [3] ČERNOCKÝ, J.: *Analýza řečových signálů: studijní opora*. FIT VUT Brno, 2006.
- [4] GmbH, R. M.: *K-MC4 Monopulse Radar Transceiver*. 2013.
- [5] KOČÍ, A. a.: *Nové universum: Všeobecná encyklopedie*. Blanská Bystrica: Tisk Tlačiarne BB, první vydání, 2003, 238 s., iISBN: 80-242-1069-X.
- [6] MAHAFZA, B. R.: *Radar Systems Analzsis and Design Using MATLAB*. Chapman Hall/CRC, 2000, 143 s., iISBN: 1-58488-182-8.
- [7] MAHAFZA, B. R.: *Radar Systems Analzsis and Design Using MATLAB*. Chapman Hall/CRC, 2000, iISBN: 1-58488-182-8.
- [8] MARŠÍK, L.: *Accelerated and Embedded Radar Signal Processing Algorithms*. diploma thesis, FIT VUT Brno, 2012.
- [9] RYCHARDS, M. A.: *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill, první vydání, 2005, 1 s., iISBN: 978-0-07-144474-3.
- [10] RYCHARDS, M. A.: *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill, první vydání, 2005, 20 s., iISBN: 978-0-07-144474-3.
- [11] SKOLNIK, M. I.: *Inrtoduction to radar system*. New York: McGraw-Hill, třetí vydání, 2001, 138 s., iISBN: 0-07-288138-0.
- [12] SKOLNIK, M. I.: *Inrtoduction to radar system*. New York: McGraw-Hill, třetí vydání, 2001, 105 s., iISBN: 0-07-288138-0.
- [13] Wikipedie: Dopplerův jev [online]. <http://cs.wikipedia.org/wiki/Doppler>
- [14] Wikipedie: Elektromagnetické vlny [online]. <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick>