

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2018

Tomáš Doležal



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

RADAROVÁ ČIDLA PRO MĚŘENÍ RYCHLOSTI

RADAR SENSORS FOR SPEED MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Doležal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Kokolia

BRNO 2018

ABSTRAKT

Hlavním předmětem, kterým se tato bakalářská práce zabývá, je výběr vhodného mikrovlnného čidla pro měření rychlosti automobilů v běžném provozu, při pokrytí více jízdnicích pruhů vozovky, vhodnou metodou. Dále je z komerčně dostupných radarových čidel měřících primárně rychlost vybráno formou rešerše na základě potřebných parametrů a vlastností to optimální. V dalším kroku je pro vybrané rychlostní čidlo provedena simulace v prostředí MATLAB v závislosti na jeho parametrech a režimech, ve kterých může pracovat. Simulace též zahrnuje vlivy prostředí na přijímaný signál. V další části je představeno naprogramované grafické uživatelské rozhraní pro simulování různých situací na vozovce pro dvě vozidla. Poslední část shrnuje výsledky reálných měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Radar, Dopplerův jev, CW, FMCW, Kosinový efekt, Měření rychlosti, Detekce více cílů, Modulační signál, Koutový odražeč, FFT

ABSTRACT

The main topic of this bachelor thesis is selecting a suitable microwave sensor for measuring the speed of vehicles in regular traffic, while covering multiple road lanes by a suitable method. Furthermore, the optimal one is selected in the form of search, based on the necessary parameters from commercially available radar sensors measuring primary speed. In the next step, simulation is performed for the selected speed sensor in the MATLAB environment, depending on its parameters and the modes in which it can work. The simulation also includes environmental influences on the received signal. There is introduced programmed graphical user interface for simulating a lot of situations on the road for two cars in the next section. Last section summarizes results of real measurement.

KEYWORDS

Radar, Doppler Effect, CW, FMCW, Cosine effect, Speed measurement, Multiple target detection, Modulation signal, Corner reflector, FFT

DOLEŽAL, T. *Radarová čidla pro měření rychlosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 77 s., 1 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Kokolia.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma *Radarová čidla pro měření rychlosti* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Martinu Kokoliovovi za výbornou komunikaci a udávání směru, kterým by se měla tato bakalářská práce ubírat. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Dřínovskému PhD. za ochotu při výběru přístrojového vybavení. Také děkuji za rady pracovníkům RAMET, kteří se na měření též podíleli.

OBSAH

Seznam obrázků	ix,x,xi,xii
Seznam tabulek	xiii
Úvod	1
1 RADARY	2
1.1 Historie.....	2
1.2 Frekvenční pásma	3
1.3 Dopplerův jev	4
1.4 Princip radiolokátoru	5
1.5 Struktura radarového systému	6
1.6 Typy radarů a jejich aplikace.....	7
1.6.1 Impulsní radary	7
1.6.2 CW radary.....	8
1.6.3 FMCW radary	9
1.7 Kosinový efekt.....	14
2 REŠERŠE RYCHLOSTNÍCH ČIDEL	15
2.1 Základní požadavky	15
2.1.1 Anténní systém	16
2.2 Potencionální rychlostní čidla.....	18
2.2.1 IVS-148.....	18
2.2.2 K-LC5	19
2.2.3 K-MC4	20
2.2.4 RXS-TR-10.....	23
2.2.5 Shrnutí výběru	24
2.3 Umístění radaru K-MC4	24
2.4 Výpočet maximální detekovatelné vzdálenosti	26
3 SIMULACE A NÁVRH SIGNÁLU	28
3.1 Režim bez modulace (CW).....	28
3.2 Režimy s modulací (FMCW).....	32
3.2.1 Binary Frequency Shift Keying	32

3.2.2	Pilovitý modulační signál	34
3.2.3	Trojúhelníkový modulační signál	35
3.3	Vlivy okolního prostředí	38
3.4	Návrh vybraného modulačního signálu	40
3.4.1	Pracovní oblast radaru	42
3.4.2	Přepoččet modulačního signálu	43
3.4.3	Rozlišitelnost vozů.....	43
3.5	Zpracování signálů.....	44
3.6	Grafické uživatelské rozhraní (GUI) – MATLAB	47
3.6.1	Výsledky simulací.....	51
4	REÁLNÉ MĚŘENÍ	55
4.1	Oživení radaru.....	55
4.2	Koutový odražeč simulující vozidlo	57
4.2.1	Princip simulátoru.....	58
4.2.2	Návrh odražeče	59
4.2.3	Výsledky a průběh měření	60
4.3	Měření v RAMET	65
4.3.1	Měření v EMC komoře.....	68
5	Závěr	74
	Literatura	75
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	76
	Přílohy	77

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Německý radar Würzburg Riese z období druhé světové války (Převzato z [3])....	2
Obrázek 1.2: Frekvenční spektrum elektromagnetického vlnění (Převzato z [4]).....	3
Obrázek 1.3: Dopplerův jev (Převzato z [5])	4
Obrázek 1.4: Dopplerův frekvenční posun (Převzato z [5])	5
Obrázek 1.5: Základní princip radaru (Převzato z [6])	5
Obrázek 1.6: Základní blokový řetězec radarového systému	6
Obrázek 1.7: Rozdělení radarových systémů (upraveno Převzato z [7]).....	7
Obrázek 1.8: Princip impulsního radaru a) Struktura impulsního radaru b), (Převzato z [8]).....	8
Obrázek 1.9: Blokové schéma CW radaru (Převzato z [1]).....	8
Obrázek 1.10: Základní modulační signály (upraveno a převzato z [4])	9
Obrázek 1.11: Proces frekvenční modulace pro měření statického objektu (Převzato z [9])	9
Obrázek 1.12: Proces frekvenční modulace u 1 pohybujícího se objektu (Převzato z [9]).....	10
Obrázek 1.13: Range-velocity diagram pro detekci 1 objektu.....	11
Obrázek 1.14: Modulační signál při reakci na 2 cíle (Převzato z [10]).....	11
Obrázek 1.15: Proces vzniku falešných cílů při detekci 2 objektů	12
Obrázek 1.16: Vhodný modulační signál pro úspěšnou detekci 2 cílů a) Range-velocity diagram detekující jednoznačně 2 cíle b) (Převzato z [10]).....	12
Obrázek 1.17: Princip modulace BFSK (Převzato z [11]).....	13
Obrázek 1.18: Základní typy aktivních radarů, primární a), sekundární b) (Převzato z [7])	14
Obrázek 1.19: Kosinový efekt zkreslující skutečnou rychlost a) Graf přesnosti měření na odchylce osy měření vůči ose radaru b) (Převzato z [5])	14
Obrázek 2.1: Mikrovlnný rychlostní radar K-MC1 bez signálového zpracování a), (Převzato a upraveno z [4]) a RSP1 s komplexním signálovým zpracováním a softwarovou interpretací výsledků b), (Převzato z [12]).....	15
Obrázek 2.2: Půdorys měřícího systému a vliv směrovosti antény v horizontálním směru.....	16
Obrázek 2.3: Bokorys měřícího systému a vliv směrovosti antény ve vertikálním směru	17
Obrázek 2.4: Radar IVS-148 pro měření rychlosti, směru a vzdálenosti vozidel	18
Obrázek 2.5: Radar K-LC5 pro měření rychlosti, směru a vzdálenosti vozidel	19
Obrázek 2.6: Radar K-MC4 se dvěma přijímacími anténami Rx1 a Rx2 schopný měřit skutečnou rychlost, vzdálenost a směr pohybu vozidel	20
Obrázek 2.7: Vnitřní bloková struktura K-MC4	21

Obrázek 2.8: Závislost úhlu mezi osou radaru a měřeným vozidlem na fázovém posuvu signálů I_x/I_y nebo Q_x/Q_y	21
Obrázek 2.9: Vliv zpoždění přijímaného signálu anténou Rx1	22
Obrázek 2.10: Směrový diagram anténní řady radaru K-MC4, azimut 30° modře a elevace 12° červeně pro pokles vysílacího výkonu na polovinu	23
Obrázek 2.11: Radar RXS-TR-10 se zabudovaným signálovým zpracováním	23
Obrázek 2.12: Půdorys situace výpočtu minimální vzdálenosti osy detekce 4 pruhů vozovky ..	25
Obrázek 2.13 - Simulace postupného pokrývání jednotlivých pruhů anténním paprskem až do detekční zóny 60 m, od které jsou pokryty všechny čtyři pruhy.....	26
Obrázek 2.14 - Citace upravené radarové rovnice uváděné výrobcem v dokumentaci K-MC4.....	27
Obrázek 2.15 - Odhadované efektivní odrazné plochy vozidel různých typů (převzato z [5]).....	27
Obrázek 2.16 - Ilustrace pro vysvětlení závislosti velikosti přijatého signálu na RCS automobilu (převzato z [5]).....	27
Obrázek 3.1: Přijatý signál (nahore) jeho zesílený obraz (dole)	29
Obrázek 3.2: Výstupní signály K-MC4 o Dopplerově frekvenci, 1. kanál (nahore) 2. kanál (dole)	29
Obrázek 3.3: Spektrum výstupního komplexního signálu	30
Obrázek 3.4: Komplexní signál v časové oblasti	30
Obrázek 3.5: Výsledek simulovaného měření v režimu CW	31
Obrázek 3.6: Vysílací proces BFS	32
Obrázek 3.7: Přijímané odražené BFSK signály.....	32
Obrázek 3.7: Přijímané odražené BFSK signály.....	33
Obrázek 3.10: Detekce až čtyř statických cílů pomocí pilovitého modulačního signálu.....	34
Obrázek 3.11: Detekce 1 automobilu pomocí trojúhelníkového modulačního signálu	35
Obrázek 3.12: Grafická interpretace změřených informací o 1 vozidlu	35
Obrázek 3.13: Výsledek simulace měření 1 vozu	36
Obrázek 3.14: Detekce 2 automobilů pomocí trojúhelníkového modulačního signálu	36
Obrázek 3.15: Výsledek simulace detekce 2 automobilů trojúhelníkovým modulačním signálem	37
Obrázek 3.16: Princip mnohacestného šíření a konkrétní volitelné situace.....	38
Obrázek 3.17: Destruktivní interference, kde postupně Shora – Paprsky značené zeleně a žlutě, Červeně, Jejich interference, Užitečný signál odražený od automobilu, Interference všech signálů (dole)	39
Obrázek 3.18: Konstruktivní interference, kde postupně Shora – Paprsky značené zeleně a žlutě, Červeně, Jejich interference, Užitečný signál odražený od automobilu, Interference všech signálů (dole)	39
Obrázek 3.19 - Vliv dešťových srážek na útlum signálu při kmitočtu 24GHz	40

Obrázek 3.20 - Parametry modulačního signálu pro následnou optimalizaci a návrh	41
Obrázek 3.21 - Pracovní oblast radaru v závislosti na zvolených modulačních hloubkách.....	42
Obrázek 3.22 - Vzájemný vztah mezi frekvenčním a napěťovým vyjádřením modulačního signálu	43
Obrázek 3.23 - Rozlišitelnost vedle sebe jedoucích vozů pro dané rozdíly hloubek modulací ..	44
Obrázek 3.24 - Blokové schéma zpracování výstupních signálů Ix/Qx (převzato z [10])	44
Obrázek 3.25 - Výstupní signál Ix nebo Qx při detekci 1 vozu a stejných hloubkách modulace	45
Obrázek 3.26 - Výstupní signál Ix nebo Qx při detekci 1 vozu a odlišných hloubkách modulace	45
Obrázek 3.27 - Proces signálového zpracování využitý při tvorbě softwaru (převzato z [10]) ..	46
Obrázek 3.28 - Parametry vybraných oken pro výběr části signálu (převzato z [10]).....	47
Obrázek 3.29 - Výchozí stav programu pro zadávání parametrů simulované situace	48
Obrázek 3.30 - Detail bloku č.1	48
Obrázek 3.31 - Detail bloku č.2	49
Obrázek 3.32 - Detail bloku č.3	49
Obrázek 3.33 - Detail bloku č.4	50
Obrázek 3.34 - Detail bloku č.9	50
Obrázek 3.35 - Detail bloku č.10	51
Obrázek 3.36 - Detail bloku č.11	51
Obrázek 3.37 - Ukázka simulace 2 detekovaných vozů.....	52
Obrázek 3.38 - Ukázka simulace 1 detekovaného vozu při stejných parametrech	52
Obrázek 3.39 - Pokus o detekci dvou vozidel při špatném nastavení modulačního signálu.....	53
Obrázek 3.40 - Ukázka detekce po uposlechnutí upozornění, a navíc dvou vozidel jedoucích vedle sebe stejnou rychlostí i směrem	53
Obrázek 3.41 - Ukázka nesprávného nastavení dolní hranice výstupní frekvence a efekt příliš dlouhé periody na segment pro signálové zpracování (Simulace extrému, kdy vozidlo jede maximální rychlostí směrem k radaru v minimální detekovatelné vzdálenosti).....	54
Obrázek 3.42 - Oprava na Obrázek 3.41 ilustrovaného efektu dle vzorce $1/(TCPI_{min} - t_{dmin})$ uvedeného v podkapitole 3.5 (Stejný simulovaný případ jako na Obrázek 3.41	54
Obrázek 4.1 - Zapůjčené rychlostní čidlo K-MC4 a) Digitální osciloskop MSO-X 3012A od firmy Agilent (vlevo) a Laboratorní zdroj AUL 201 (vpravo) b)	55
Obrázek 4.2 - Ověření výstupní stejnosměrné složky na oscilogramu a) a totožný signál nahraný přes GUI do MATLABu z .xls souboru pro výstupy I1/Q1.....	56
Obrázek 4.3 - Ověření funkčnosti mávnutím ruky před radarem na oscilogramu a) a totožný signál nahraný přes GUI do MATLABu z .xls souboru pro výstupy I1/Q1.....	56
Obrázek 4.4 - Ověření výstupní stejnosměrné složky na oscilogramu a) a totožný signál nahraný přes GUI do MATLABu z .xls souboru pro výstupy I2/Q2.....	57

Obrázek 4.5 - Ověření funkčnosti mávnutím ruky před radarem na oscilogramu a) a totožný signál nahraný přes GUI do MATLABu z .xls souboru pro výstupy I2/Q2.....	57
Obrázek 4.6 - Výsledná podoba navrženého koutového odražeče.....	58
Obrázek 4.7 - Princip generování Dopplerovy frekvence koutovým odražečem pro jednotlivá natočení.....	59
Obrázek 4.8 - Grafická interpretace vztahu 4.1 mezi simulovanou rychlostí, rychlostí otáčení lopatek odražeče a jejich poloměrem "r"	60
Obrázek 4.9 - Měřicí pracoviště.....	61
Obrázek 4.10 - Detail přípravku sestavený pro měření včetně odražeče a popisu přípravku pro měřicí vzdálenosti 50 cm a) 25 cm b).....	61
Obrázek 4.11 - Simulace přibližujícího se vozu a) oddalujícího b) a sestava pro ověření vyrušení obou složek Dopplerovy frekvence dle Obrázek 4.7 b)	61
Obrázek 4.12 - Výsledky simulace přibližujícího se vozu pro vzdálenost radar/odražeč 25 cm, Časové průběhy výstupních složek I1/Q1 a) Spektrum výstupního signálu I1 b)	62
Obrázek 4.13 - Výsledky simulace oddalujícího se vozu pro vzdálenost radar/odražeč 50 cm, Časové průběhy výstupních složek I1/Q1 a) Spektrum výstupního signálu I1 b)	63
Obrázek 4.14 - Výsledky simulace pro ověření vzájemného vyrušení Dopplerových posuvů pro vzdálenost radar/odražeč 50 cm, Časové průběhy výstupních složek I1/Q1 a) Spektrum výstupního signálu I1 b)	64
Obrázek 4.15 - Sestrojený modulační signál pro detekci jednoho i dvou vozů a) screenshot pracovní plochy PC se softwarově sestaveným modulačním signálem (černé okno)	65
Obrázek 4.16 - Screenshot modulačního signálu z osciloskopu včetně jeho parametrů.....	66
Obrázek 4.17 - Pracoviště použité pro sestavení modulačního signálu.....	66
Obrázek 4.18 - Měřicí pracoviště pro reálné měření.....	66
Obrázek 4.19 - EMC komora	68
Obrázek 4.20 - Koutový odražeč a) Měřicí pracoviště (zleva: funkční generátor MS, Osciloskop LeCroy WaveRunner 640Zi, Stabilizovaný zdroj Diametral P130R51D b).....	69
Obrázek 4.21 - Modulační signál (nahore), Časový signál na výstupech I2/Q2 (dole)	69
Obrázek 4.22 - Nástupná hrana MS (nahore), Vybraný segment v časové oblasti (uprostřed), Spektrum tohoto segmentu (dole).....	70
Obrázek 4.23 - Postupně shora: Modulační signál, Časové průběhy složek I2/Q2, Spektrum 1.segmentu, Spektrum 2.segmentu	71
Obrázek 4.24 - Postupně shora: Modulační signál, Časové průběhy složek I2/Q2, Spektrum 1.segmentu, Spektrum 2.segmentu	73

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1: Frekvenční pásma 3

Tabulka 2.1: Směrovost vysílací antény K-MC4 pro pokles výkonu o 3 dB 24

ÚVOD

V dnešním světě plném nejrůznějších dopravních prostředků je třeba provádět spousty měření, a to především z důvodu snahy zajistit plynulou a bezpečnou dopravu. Ať už se jedná o dopravu leteckou, lodní nebo automobilovou. Mezi nejdůležitější faktory patří rychlost, poloha, výška, samotná detekce objektu, případně směr, jakým se pohybuje. Z těchto dat a sestrojených statistik lze potom dále vycházet např. při optimalizaci dopravních sítí a bezpečnostních pravidel provozu. Lze získávat informace i o velikosti objektu a konkrétně ho identifikovat. K těmto druhům měření se mimo jiné používá právě radarová technologie.

Tato práce je zaměřena na měření rychlosti v oblasti automobilové dopravy. Takové radary lze běžně spatřit na pozemních komunikacích, kde jsou staticky umístěné u krajnice vozovky, případně jako mobilní v policejním voze. Jejich hlavním účelem je snaha zajistit dodržování rychlostních limitů v daném místě a tím i bezpečnost řidičů. Vzhledem k umístění těchto radarů je patrné, že měření probíhá pod určitým úhlem, a nikoliv v ose radaru. To má za následek určitou chybu měření. Jako příklad lze uvést pozorování dopravy těsně u silnice a z určité vzdálenosti od silnice. Těsně u silnice budeme mít mnohem větší přehled o skutečné rychlosti automobilu. V druhém případě budeme mít pocit, že rychlost jedoucích aut je mnohem menší i když skutečnost je jiná.

Radary používané v této oblasti většinou pracují s kontinuálním vlněním i vlněním frekvenčně rozmítaným. Jedná se o tzv. CW (*continuous wave*) radary nebo FMCW (*frequency modulated continuous wave*) radary. Tato práce si bere za cíl zvolit co nejuvhodnější radarové čidlo, případně modul, který by byl schopný jednoznačně detekovat objekty na vozovce pod určitým úhlem s danou přesností a v určité vzdálenosti při pokrytí dvou až čtyř jízdních pruhů pozemní komunikace. Dále pak vytvoření simulačního modelu na základě parametrů vybraného radarového čidla.

V kapitole 1 je stručně pospána historie radarové technologie. Dále je rozebrána samotná funkce, princip jednotlivých druhů radarů a vhodné použití. Popsán je zde také fyzikální jev, na kterém ve své podstatě stojí veškerá radarová technika, a tím je Dopplerův jev. Kapitola 2 začíná rešerší ve smyslu postupu výběru konkrétního radaru pro dané účely a shrnuje klíčové parametry a odůvodnění výběru konkrétního mikrovlnného čidla. Dále jsou uvedeny v kapitole 3 výsledky simulace v prostředí MATLAB R2015a pro jednotlivé režimy co se tvaru modulačního signálu týče, se kterými je daný radar schopný pracovat. Na základě těchto simulací je vybrán konkrétní modulační signál, se kterým by měl radar pracovat v terénu a splnit tak požadavky na něj kladené. Též jsou do simulace zahrnuty vlivy okolního prostředí na přijímaný signál jako odrazy vlivem mnohacestného šíření a výsledná interference v přijímači nebo třeba vliv dešťových srážek na měření, které je důležité na 24 GHz též brát v potaz. Také se zabývá konkrétním návrhem modulačního signálu vzhledem k vybranému čidlu, tak aby toto čidlo bylo schopno detekovat i extrémní případy detekce jako je vůz v maximální detekovatelné vzdálenosti jedoucí maximální rychlostí od radaru nebo vůz jedoucí v minimální vzdálenosti maximální rychlostí k radaru. Je zde také představeno grafické uživatelské rozhraní vytvořené přímo za účelem teoreticky předpokládané detekce pro vybraný typ radaru. V kapitole 4 nechybí ani výsledky praktických pokusů, a to v domácích podmínkách, EMC komoře i terénu.

1 RADARY

Slovo RADAR pochází z anglického „*RA*dio *D*etecting *A*nd *R*anging”. To se dá přeložit jako rádiové rozpoznávání a měření. Základním principem je tedy šíření radarem vyslané elektromagnetické vlny prostorem, která se od měřeného objektu odrazí a je zpětně přijata anténou radaru. Tato vlna je modifikována typem a chováním objektu a je tedy nositelem informací o něm.

1.1 Historie

Celá historie a s ní spojený vývoj radarové techniky nelze připsat jedné osobě či konkrétnímu národu. Jedná se o komplexní oblast techniky, na jejímž vývoji až do dnešní podoby má zásluhu mnoho vědců různých národností.

Příběh radaru začíná už roku 1872, kdy anglický fyzik James Clerk Maxwell interpretoval svou „teorii elektromagnetického pole“ známou jako Maxwellovy rovnice. V roce 1887 byla tato teorie prakticky ověřena německým fyzikem Rudolfem Hertzem. První dálkový přenos informace pomocí tohoto vlnění má od roku 1897 na svědomí italský vynálezce Guglielmo Macroni, který je znám jako průkopník radiokomunikace. Myšlenka detekce pomocí odrazu elektromagnetické vlny od kovových předmětů je připsána roku 1900 velkému průkopníkovi v elektrotechnice Nikola Tesla.

První praktický radarový test je spojen s vynálezem tzv. telemobiloskopu (1904), který sloužil pro detekci lodí za špatné viditelnosti a jeho vynálezcem je německý fyzik Christian Hulsmeyer. Roku 1920 byl vynalezen první prototyp elektronky fungující jako generátor mikrovln. Skotský fyzik sir Robert Watson-Watt zkonstruoval roku 1935 první v praxi použitelný radiolokátor pro detekci letadel pomocí mikrovln, čímž se stal skutečným vynálezcem radaru.

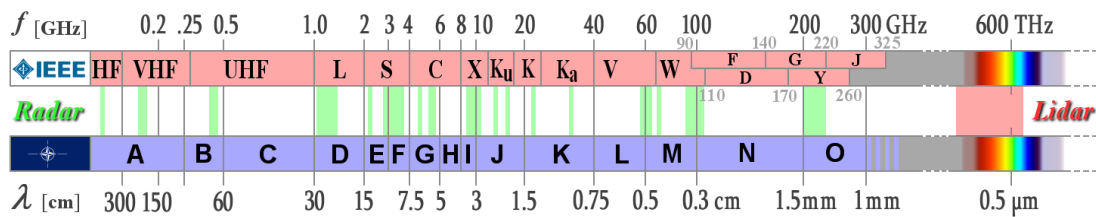
Největším stimulantem pro vývoj radarové technologie byla však 2. světová válka. Ovšem před tím, než byly radary použitelné v praxi, tak se používaly tzv. akustické radary. V tomto období bylo takřka životně důležité mít přehled o vzdušném prostoru, a bylo do této technologie investováno obrovské množství sil a financí. Radary byly používány pro systémy včasného varování před nálety nepřátelských letek, jako protiraketová obrana nebo rozpoznávání spojenců. Příklad takového radaru je uveden na **Obrázek 1.1**. Dále pak také pro navigaci bojových lodí na moři a letadel ve vzduchu. [1] [2] [4]



Obrázek 1.1: Německý radar Würzburg Riese z období druhé světové války (Převzato z [3])

1.2 Frekvenční pásma

Frekvenční spektrum elektromagnetického vlnění je velmi rozsáhlé. Toto spektrum je na základě normy rozděleno na jednotlivá pásma. Tato pásma se značí písmeny. Pásma jsou obsazena pro technologie podle požadavků a potřeby. Rozdělení frekvenčního spektra ilustruje **Obrázek 1.2**. Z obrázku je patrné, že frekvence, s jakými pracují radary, jsou rozloženy napříč všemi pásmy. Je tomu proto, že na každý radar jsou kladeny různé požadavky ve smyslu dosahu, rozlišení nebo třeba prostředí, ve kterém bude radar pracovat.



Obrázek 1.2: Frekvenční spektrum elektromagnetického vlnění (Převzato z [4])

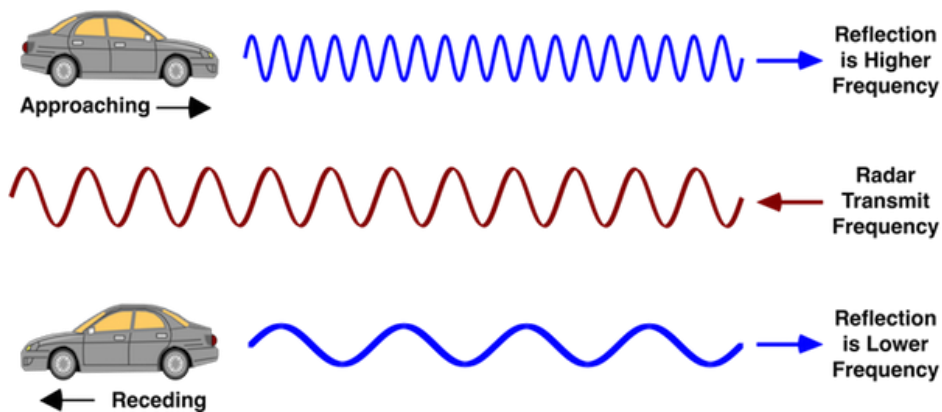
Obecně lze tvrdit, že s čím vyšší frekvencí daný radiolokátor pracuje, tím je přesnější, ovšem jeho dosah klesá, protože na těchto vyšších frekvencích se uplatňují ztráty vlivem prostředí [4]. Počasí je dalším ovlivňujícím faktorem. Pro tuto práci vybraný radar pracuje v pásmu K, lze tedy z výše uvedeného tvrdit, že radar je určen spíše pro menší vzdálenosti vlivem atmosférického útlumu což je pro měření rychlosti automobilu dostačující. Konkrétní číselné rozdělení pásem je uvedeno v **Tabulka 1.1** Radarové aplikace v tomto pásmu poskytují pro malé vzdálenosti velmi dobré rozlišení a vysokou rychlost obnovy dat v systémech pracujících v reálném čase [4].

Označení pásma	Nominální rozsah frekvencí pásma	Některá pásma přidělená radarové službě (pro oblast 1)
HF	3MHz – 30MHz	-
VHF	30MHz – 300MHz	-
UHF	300MHz – 1GHz	-
L	1GHz – 2GHz	1,625GHz - 1,635GHz
S	2GHz – 4GHz	2,3GHz - 2,5GHz, 2,7GHz - 3,6GHz
C	4GHz – 8GHz	5,25GHz - 5,85GHz
X	8GHz – 12GHz	8,5GHz - 10,68GHz
Ku	12GHz – 18GHz	13,4GHz - 14GHz, 15,7GHz - 17,7GHz
K	18GHz – 27GHz	24,05GHz - 24,25GHz
Ka	27GHz – 40GHz	33,4GHz - 36GHz
V	40GHz – 75GHz	59GHz - 64GHz
W	75GHz – 110GHz	76GHz - 81GHz, 92GHz - 95GHz
mm	110GHz – 300GHz	126GHz-142GHz, 231GHz-235GHz, 238GHz-248GHz

Tabulka 1.1: Frekvenční pásma

1.3 Dopplerův jev

Tento jev dokázal matematicky popsat již v roce 1842 Christian Doppler [1]. Jedná se o popis změny frekvence vlny pohybující se prostorem viz. **Obrázek 1.3**. Celý princip je založen na znalosti rychlosti, jakým se pohybuje daná vlna v prostoru, rychlostech objektů (tj. odkud je vlna vyslána a odkud je odražena) a frekvenci vysílaného vlnění. Na základě hodnot těchto parametrů můžeme jev rozdělit do několika reálných situací. V této práci jsou využity právě dvě z nich. Zdrojem vlnění bude statický radar vysílající vlnu a roli pozorovatele bude mít jedoucí automobil.



Obrázek 1.3: Dopplerův jev (Převzato z [5])

- Automobil pohybující se směrem „k radaru“ nebo směrem „od radaru“

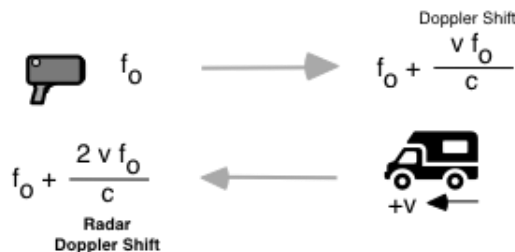
Pokud uvažujeme auto jedoucí směrem k radaru, znamená to, že vzdálenost mezi radarem a automobilem klesá. Čím rychleji tato vzdálenost klesá, tím rychleji se auto pohybuje a tím menší musí být vlnová délka odražené vlny, aby za stejný čas urazila stejnou vzdálenost. Jinými slovy nedochází ke změně rychlosti šíření této vlny. V tomto případě se vlna pohybuje rychlostí světla (299 792 458 m/s). Pro případ, kdy se automobil pohybuje od radaru, je situace přesně opačná. Příjemcí antény radaru tak přijímají menší počet period vlnění za sekundu. Tím pádem vlnová délka takto přijaté vlny je větší a frekvence menší.

Vztah pro výpočet takto přijaté frekvence je dán vztahem **1.1**. Rovnice **1.2** znázorňuje ze vztahu **1.1** odvozený vztah pro výpočet rychlosti automobilu uvažující přibližování auta pod určitým úhlem k ose radaru. [5]

$$f_P = f_0 \frac{(c \pm v_A)}{c} = f_0 \pm f_D \quad 1.1$$

$$v_A = \frac{c \cdot f_D}{2 \cdot f_0 \cdot \cos \theta} = \frac{\lambda \cdot f_D}{2 \cdot \cos \theta} \quad 1.2$$

Při měření rychlosti dochází v prostoru mezi radarem a automobilem ke dvojitému posuvu Dopplerovy frekvence, jak ukazuje **Obrázek 1.4**. Automobil přijímá vlnu s Dopplerovým posuvem, který je úměrný jeho rychlosti. Radar tak bude přijímat signál s dvojitým posuvem Dopplerova kmitočtu [5]. Tento jev je zahrnut při výpočtu rychlosti auta ve vztahu 1.2.

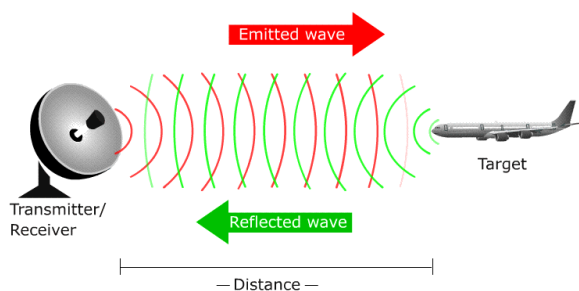


Obrázek 1.4: Dopplerův frekvenční posun (Převzato z [5])

Kde: f_p je kmitočet vlny přijaté (odražené) [Hz], f_0 kmitočet vlny vysílané radarem [Hz], c rychlost světla [m/s], v_A rychlost automobilu [m/s], f_D Dopplerova frekvence [Hz], λ vlnová délka vysílané vlny [m], θ úhel mezi osou radaru a osou po které přijímáme odraženou vlnu [°].

1.4 Princip radiolokátoru

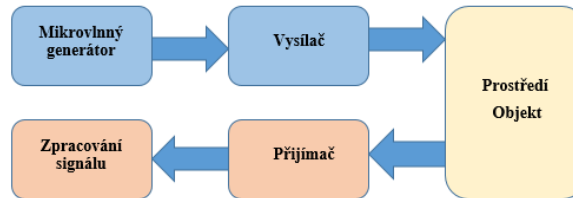
Radary se dělí i na základě principu na jakém jsou založeny. Základní princip je však velmi podobný. Funkce je založena na elektromagnetickém vlnění v normou daném frekvenčním pásmu. V principu jde o vyzáření rádiové vlny do prostoru. Pokud dojde k návratu této vlny, znamená to, že ve směru vyslání se vyskytuje nějaký objekt, jak ukazuje **Obrázek 1.5**. Tato přijatá vlna se vyhodnotí. Je totiž nositelem požadované informace ve smyslu rychlosti, vzdálenosti, polohy nebo celkové identifikace. Měřený objekt tedy mění vlastnosti vysílané vlny svými vlastnostmi a chováním případně po zachycení vysílané vlny může zpět k radaru vysílat vlnu novou (neodraženou). Některá vojenská moderní letadla využívají právě toho, že pro jejich odhalení se vlna musí odrazit pod úhlem dopadu, proto jsou pokryty absorpčními materiály, které vlnění absorbují nebo mají navrženou geometrii takovým způsobem, kdy vlnu rozptýlí do okolí, ale tak aby nedošlo k návratu směrem, ze kterého byla vyslána tzv. *Stealth* technologie.[1]



Obrázek 1.5: Základní princip radaru (Převzato z [6])

1.5 Struktura radarového systému

Níže na **Obrázek 1.6** je uvedeno základní blokové schéma radarového systému. Přičemž schéma může být modifikováno na základě konkrétního typu radaru viz. podkapitola 1.6.

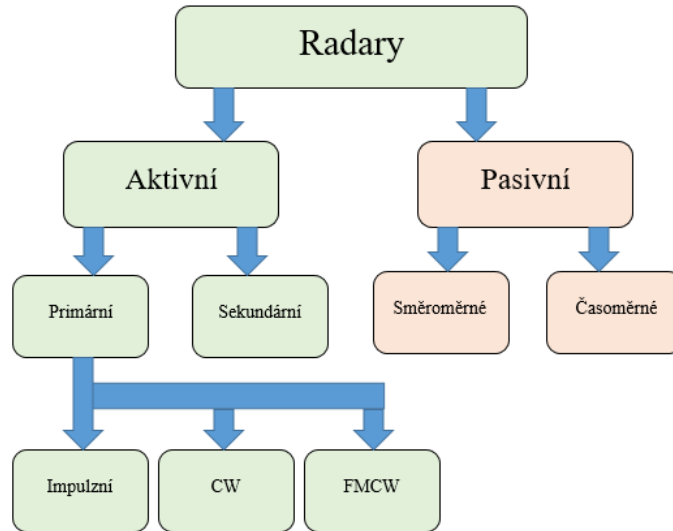


Obrázek 1.6: Základní blokový řetězec radarového systému

- **Mikrovltný generátor** - úkolem tohoto bloku je generování elektromagnetického vlnění o frekvenci z vhodného pásma pro daný účel. Toto vlnění je následně vhodně navrženým přizpůsobeným vlnovodem přivedeno na vstup vysílací antény. V prvních radarech se používaly klystrony. Nejběžnějším zdrojem mikrovln je však magnetron a v moderních radarech se používají polovodičové generátory s VF tranzistory. Antény pracující s tímto typem generátorů se nazývají fázované a mají většinou deskovitý tvar [1].
- **Vysílací anténa** – jejím úkolem je převod mikrovlnné energie (například z vlnovodu) do prostoru s dostatečnou účinností v podobě elektromagnetické vlny. Parametry vysílací antény určují, pro jaké účely bude radar použit respektive, pro co by byl a nebyl vhodný. Mezi základní parametry patří zisk, vysílaný výkon, směrovost a šířka pásma. U radarových systémů je obecná snaha mít hlavní snímající lalok co nejužší vzhledem k použití, tím získáváme přesnost. V naší aplikaci je směrovost důležitý faktor vzhledem k požadavku snímat vozovku se čtyřmi jízdními pruhy.
- **Prostředí/Objekt** – jde o faktory na základě kterých se odvíjí samotný návrh celého radaru. Prostředí není stálé ale proměnlivé ve smyslu počasí. Proto i ztráty se budou lišit při jasné obloze a deštivém počasí. Dále dochází k různým odrazům od povrchu země. Pokud takto odražená vlna doputuje k přijímači v protifázi s přímou vlnou, může dojít k výraznému poklesu intenzity pole v daném místě a výpadku měření.
- **Přijímací anténa** – má za úkol zachytit odraženou vlnu, transformovat ji na napětí a toto napětí zesílit na požadovanou úroveň pro další zpracování. Přijímač se musí vyznačovat vysokou citlivostí a nízkým šumem, protože odražený signál přichází s velmi malou úrovní. Tato úroveň je závislá na vzdálenosti měřeného objektu.
- **Zpracování signálu** – tento blok už nepracuje s elektromagnetickým vlněním, ale má za úkol výstup přijímací antény vhodně ošetřit a extrahovat z něj přenášené informace o objektu. Ošetřením je myšlena filtrace, případné zesílení a ve finále zisk frekvenčního obrazu signálu tedy jeho spektra. Při měření rychlosti bude spektrum obsahovat informace o Dopplerově kmitočtu → tedy o rychlosti.

1.6 Typy radarů a jejich aplikace

Radary lze dělit na základě mnoha hledisek. Základní rozdělení radarů je uvedeno na **Obrázek 1.7**.



Obrázek 1.7: Rozdělení radarových systémů (upraveno Převzato z [7])

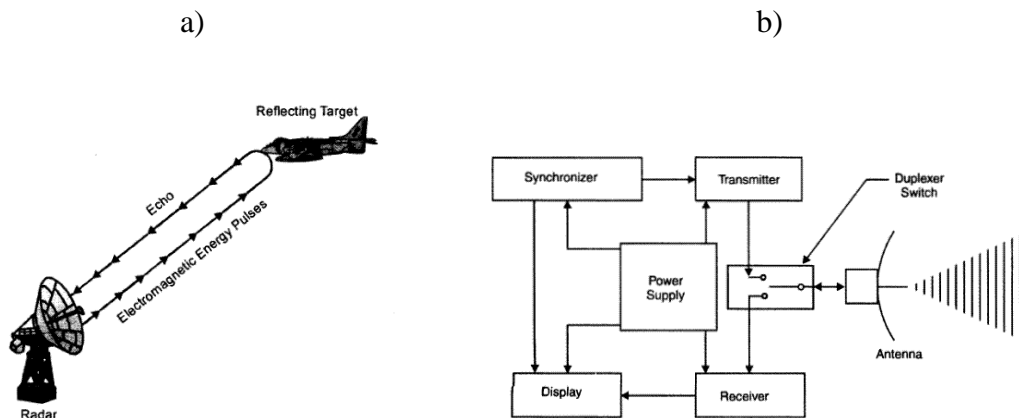
- **Aktivní radar** – aktivní radar je takový radar, který je schopen vyzařovat do prostoru vlastní rádiové vlny. Přijatý signál je u těchto radarů tedy přímo závislý na signálu vysílaném. Dle **Obrázek 1.7** se pak tyto radary dělí dále na primární a sekundární.

○ **Primární radary**

Jedná se o aktivní radar, který tedy vysílá vlnu a „čeká“ na vlnu odraženou. Důležitým faktem je, že ke své funkci využívají odrazu od zaměřovaného objektu. Uplatňují se zde tedy nejen odrazy chtěné ale i nechtěné ve smyslu odrazu od okolní včetně zemského povrchu. Tyto odrazy mohou být silnější než užitečná odražená vlna. Při zpracování signálu se tyto nežádoucí odrazy musí složitě odstraňovat. Tyto radary jsou schopny zjišťovat parametry takřka všech pohybujících se předmětů. [7]

1.6.1 Impulsní radary

Impulsní radary pracují na principu vysílání časově krátkých, ale zpravidla výkonově silných pulzů (tzv. radarová pulzní modulace), proto jsou vhodné pro větší vzdálenosti (viz. **Obrázek 1.8 a**). Pokud se jedná o radar, který vysílá i přijímá na jednom místě (tzv. mono-statický radar) potom je vybaven jednou anténou. Tato anténa vyšle pulz a následně dojde k jejímu přepnutí do přijímacího módu (viz. **Obrázek 1.8 b**), kde čeká na příjem odraženého signálu. Důvodem jsou silné vysílané pulzy, které by v případě dvou použitých antén mohli být přijímány přijímací anténou, a mohli by způsobit poškození následujících obvodů. Pomocí těchto radarů lze měřit vzdálenost objektu, polohu a případně i rychlost. Jsou používány především ve vojenství, leteckém provozu a pro předpovědi počasí.

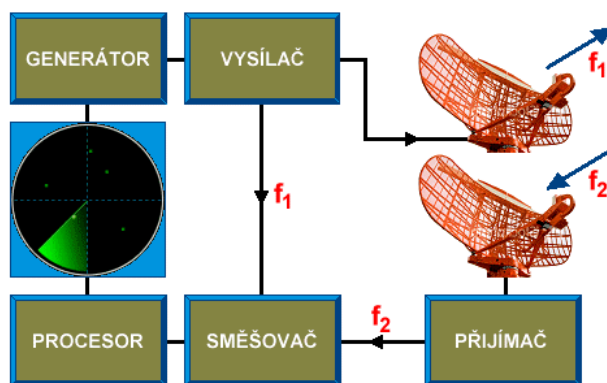


Obrázek 1.8: Princip impulsního radaru a) Struktura impulsního radaru b), (Převzato z [8])

Vzdálenost objektu se určuje ze znalosti rychlosti šíření elektromagnetického vlnění v prostoru, které je rovno rychlosti světla a doby, která uběhne od vyslání pulzu do návratu jeho odražené repliky. Pokud se radar otáčí lze tak s každým otočením radaru aktualizovat polohu cíle. Z této polohy lze potom určit jakou dráhu, kterou objekt urazil mezi jedním otočením radaru. Jinými slovy jsme tímto způsobem schopni získat rychlost. [4] [7]

1.6.2 CW radary

Pracovní režim těchto „*continuous waves*“ radarů je spojitý, a to ve smyslu stálého vysílání elektromagnetického vlnění o konstantní frekvenci do prostoru a stálého přijímání vlnění odraženého o jiné frekvenci v případě, že směrem, kterým vysíláme signál, se nachází pohybující se objekt, jak ukazuje **Obrázek 1.9**. Tato změna frekvence je způsobena Dopplerovým posuvem, který nese informaci o rychlosti objektu. Nevýhodou je, že signál neobsahuje žádnou časovou značku, a proto není možné těmito radary měřit vzdálenost daného objektu ani rozlišovat jednotlivé cíle. [1] [7]



Obrázek 1.9: Blokové schéma CW radaru (Převzato z [1])

Tyto radary jsou hojně používány jako měřiče rychlosti v dopravě. Jako výchozí měří relativní rychlost vozidla, ovšem jsou schopny tuto rychlost převést na skutečnou a tím korigovat chybu vzniklou měřením pod úhlem jiným než k ose radaru tzv. kosinový efekt (viz.1.7). Pracují zpravidla s vyššími kmitočty, a proto jsou vhodné pro menší vzdálenosti.

1.6.3 FMCW radary

Tyto radary pracují s frekvenční modulací „*frequency modulated continuous wave*“. Základní princip je ovšem stejný, a spočívá v nepřetržitém vysílání elektromagnetického vlnění a přijímání vlnění odraženého. Zásadní rozdíl oproti předchozímu CW radaru je v tom, že vysílaná frekvence není konstantní, ale je rozmítaná v závislosti na modulačním signálu. Tyto modulační signály jsou nejčastěji obdélníkové, pilovité, trojúhelníkové případně další (viz. **Obrázek 1.10**). Modulovaný signál je vysílaný signál s rozmítanou frekvencí v čase závisle na modulačním signálu, který představuje závislost řídicího napětí, kterým je řízen napětím řízený oscilátor VCO na čase, kterému odpovídá právě ona zmíněná vysílaná frekvence. Po přepočtu lze vyjádřit signál v napětí nebo frekvenci



Obrázek 1.10: Základní modulační signály (upraveno a převzato z [4])

Modulace nám umožňuje získávat časovou značku a tím jsme schopni získat vzdálenost objektu. Tyto radary jsou schopny měřit zároveň relativní rychlost objektu a jeho vzdálenost. Pokud je požadavkem rozlišení a měření více cílů (*tzv. tracking*) jsou tyto radary správnou volbou. Vyznačují se vysokou přesností a schopností provádět měření už od vzdálenosti rovné vlnové délce vysílaného signálu. Zpracováváný signál je většinou NF což zjednodušuje signálové zpracování a extrakci dat [4].

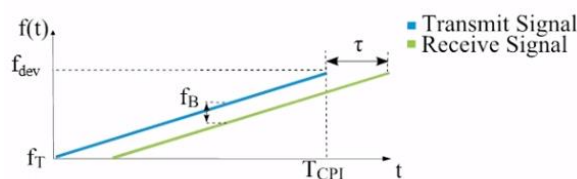
Vysvětlení principu FMCW radaru na třech základních případech:

Pro vysvětlení principu zvolíme trojúhelníkovou modulaci. S touto modulací je právě možné rozlišovat kromě jiného jednotlivé cíle na vozovce.

A. Nepohybující se objekt

Pokud je radarem měřen objekt, který není v pohybu, nedochází k Dopplerovu posuvu a kmitočet vlny odražené je kopií kmitočtu vlny vyslané. Ovšem tato vysílaná frekvence je časově rozmítaná, proto vlna přijatá také. Přijatá vlna je tedy v tomto případě zeslabeným a zpožděným obrazem vlny vyslané.

Pro představu je tento proces zobrazen na **Obrázek 1.11**. Modrá přímka znázorňuje růst vysílané frekvence a zelená přijímané. Zřetelně je viditelné zpoždění τ . Vlivem tohoto zpoždění dochází k tomu, že kmitočet přijímané vlny je v daném okamžiku vždy menší než kmitočet vlny ve stejném okamžiku vysílané právě o hodnotu f_B . Časová hodnota T_{CPI} (*z angl. „Coherent processing interval“*), představuje čas, za který vysílaná frekvence dosáhne maximální hodnoty. Tato maximální hodnota je značena jako f_{dev} a má význam šířky pásma se kterou souvisí rozlišitelnost více objektů vedle sebe.



Obrázek 1.11: Proces frekvenční modulace pro měření statického objektu (Převzato z [9])

Následující rovnice jsou odvozeny z **Obrázek 1.11**. Rovnice **1.3** popisuje rovnost časových a frekvenčních poměru pro dané zpoždění τ přijatého signálu. Z této rovnosti jsme schopni rovnicí **1.4** zjistit vzdálenost R nepohybujícího se objektu při znalosti rychlosti vlny ve vzduchu, která je rovna rychlosti světla ve vzduchu $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s.

$$\frac{f_B}{f_{\text{dev}}} = \frac{\tau}{T_{\text{CPI}}} \quad 1.3 \quad R = \frac{c}{2} \cdot \tau = \frac{c}{2} \cdot \frac{f_B}{f_{\text{dev}}} \cdot T_{\text{CPI}} \quad 1.4$$

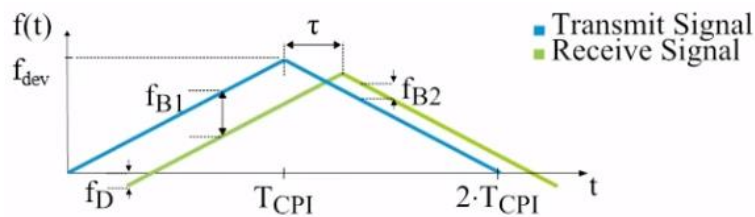
B. Pohybující se jeden objekt

Pokud dochází k měření pohybujícího se objektu, přijatý signál je frekvenčně posunut o Dopplerův kmitočet. V závislosti na směru pohybu je posun záporný nebo kladný. Postup výpočtu vzdálenosti a rychlosti popisují rovnice **1.6** a **1.5**. Současně tyto rovnice ukazují, že pokud by Dopplerův kmitočet byl nulový $f_{B1} = f_{B2} = f_B$. V náběžné části modulačního signálu dojde ke zvětšení rozdílu frekvence právě o f_D načež v sestupné části signálu k jeho zmenšení o tuto hodnotu. [4]

$$f_{B1} = f_B + f_D = \frac{2}{c} \cdot \frac{f_{\text{dev}}}{T_{\text{CPI}}} R - \frac{2}{\lambda} v_r \quad 1.5$$

$$f_{B2} = -f_B + f_D = -\frac{2}{c} \cdot \frac{f_{\text{dev}}}{T_{\text{CPI}}} R - \frac{2}{\lambda} v_r \quad 1.6$$

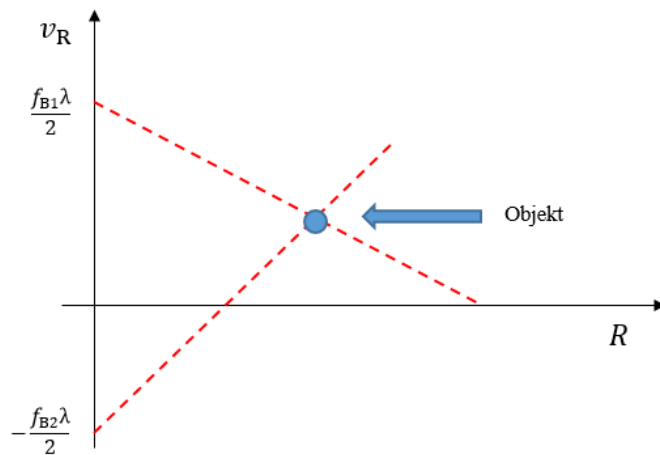
Opětovným snižováním kmitočtu po dosažení jeho maxima dle **Obrázek 1.12** získáváme další rovnici. Máme tak pro výpočet vzdálenosti R a relativní rychlosti v_r k dispozici soustavu dvou rovnic o dvou neznámých. Dopplerův kmitočet jsme schopni zjistit ze vztahu **1.7** [4]. Rovnice **1.5** a **1.6** jsou základním východiskem při návrhu výsledných parametrů modulačního signálu, kterým bude čidlo řízeno.



Obrázek 1.12: Proces frekvenční modulace u 1 pohybujícího se objektu (Převzato z [9])

$$f_D = \frac{|f_{B1} - f_{B2}|}{2} \quad 1.7$$

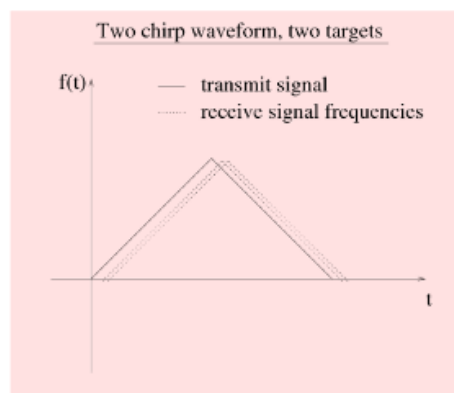
Konkrétní poloha jednotlivých cílů se dá potom určit za pomoci detekčního diagramu (tzv. „Range-velocity“ diagram). Tento diagram popisuje závislost mezi relativní rychlostí a vzdáleností objektu, jak ukazuje **Obrázek 1.13**. Základem pro jeho sestavení je soustava rovnic **1.5** a **1.6**. Vzhledem k tomu, že přímku definují dva body lze určit oba tyto body z každé rovnice postupným nulováním vzdálenosti a rychlosti objektu. Jinými slovy jde o grafické řešení soustavy lineárních rovnic. Bod kde se obě přímky kříží, nám dává informaci o rychlosti objektu v_r v dané vzdálenosti R . [10]



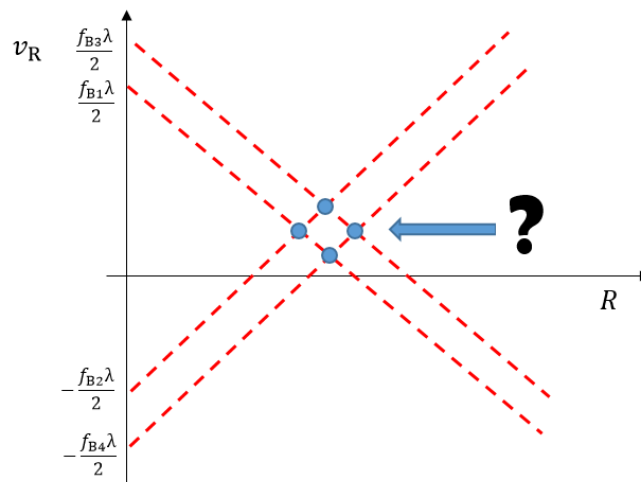
Obrázek 1.13: Range-velocity diagram pro detekci 1 objektu

C. Detekce více pohybujících se objektů

Pro detekci více jak jednoho objektu, jako v předchozím případě už nám nebudou stačit pro určení jejich vzdálenosti a rychlosti pouze dvě rovnice. Na **Obrázek 1.14** je vidět signál vysílaný a přijímaný. Je zde patrné, že odražený signál není jen jeden, ale jsou celkem dva (od každého objektu). Tyto dva signály jsou časově zpožděné, a pokud je daný radar schopen toto zpoždění rozlišit, detekuje oba objekty. Při sestavování diagramu z tohoto modulačního signálu vznikají v diagramu falešné objekty (tzv. duchové) viz **Obrázek 1.15**. Abychom mohli jednoznačně určit ty pravé cíle je potřeba úprava strmosti modulačního signálu ve dvojicích period signálu. [10]

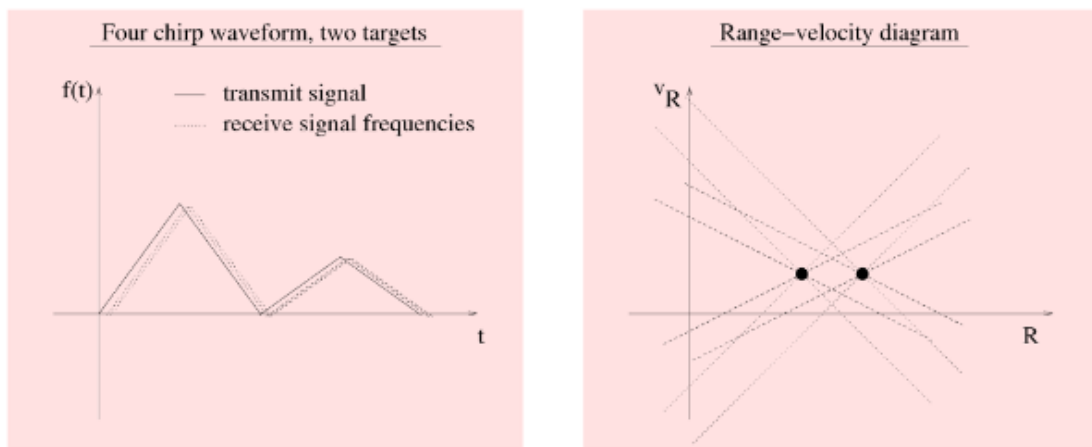


Obrázek 1.14: Modulační signál při reakci na 2 cíle (Převzato z [10])



Obrázek 1.15: Proces vzniku falešných cílů při detekci 2 objektů

Problém detekce falešných cílů se řeší proměnlivým sklonem modulačního signálu [9], tedy v jednotlivých periodách (doba nárůstu a poklesu frekvence při stejné strmosti), dochází k růstu, respektive poklesu vysílané frekvence s jinou strmostí, jak ukazuje **Obrázek 1.16 a)**. Vznikají nám tak dvě subperiody, tvořící spolu jednu celou periodu



Obrázek 1.16: Vhodný modulační signál pro úspěšnou detekci 2 cílů a) Range-velocity diagram detekující jednoznačně 2 cíle b) (Převzato z [10])

Tímto modulačním signálem jsme schopni detekovat i více jako dva objekty. Pokud se budeme snažit detekovat tedy více cílů jako dva, budeme potřebovat v další periodě vysílání opět jinou strmost modulačního signálu abychom tak získaly další soustavu dvou rovnic a dvou neznámých pro další cíl a byli schopni tento cíl detekovat a získat o něm potřebné informace. Samozřejmě, že se snahou detekovat více cílů bude docházet ve výsledném Range-Velocity diagramu ke vzniku více falešných cílů a detekce bude o něco obtížnější.

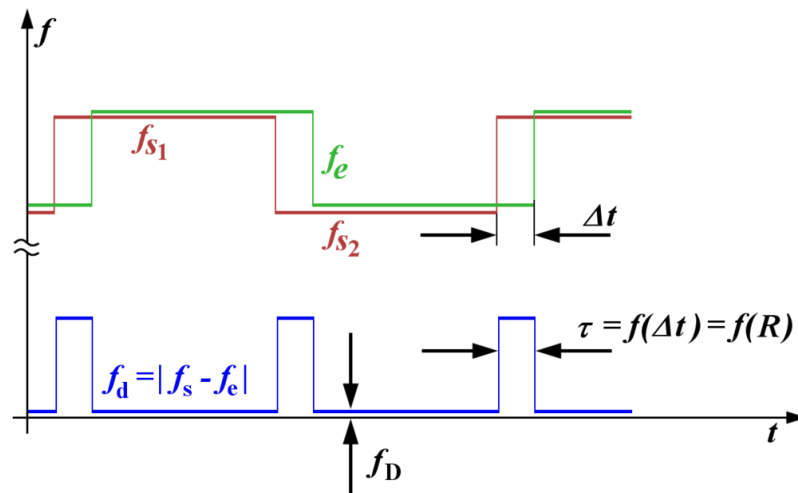
Binary Frequency Shift Keying

Při této modulaci dochází ke skokovému přepínání mezi jednotlivými vysílanými kmitočty pomocí dvoustavového logického signálu o určitých napěťových úrovních. Přijatý signál tedy obsahuje obě základní informace. Informace o rychlosti a vzdálenosti je obsažena ve fázovém posuvu přijaté Dopplerovy frekvence, přičemž, pokud tento fázový posun nabyde hodnoty větší, jako 2π bude informace o vzdálenosti zkreslená.

S tím souvisí právě volba frekvenčního kroku, který udává rozdíl mezi skokově vysílanými frekvencemi a je klíčový pro maximální detekovatelnou vzdálenost, která je rovna $\lambda/2$, protože vzdálenost je dána vztahem 1.8. Na **Obrázek 1.17** je zachycen základní princip této modulace.

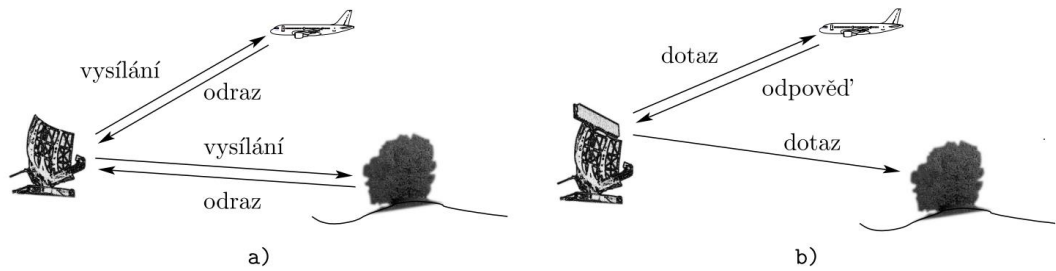
$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot (\Delta\varphi) \quad 1.8$$

Kde: R [m] je vzdálenost objektu, λ [m] je vlnová délka frekvenčního kroku a $\Delta\varphi$ [°] je fázový posuv na pozici Dopplerovy frekvence.



Obrázek 1.17: Princip modulace BFSK (Převzato z [11])

- **Sekundární radary** – opět jsou to aktivní radary, jejichž funkce není založená na odrazu vyslané vlny od objektu nýbrž na příjmu vlny vyslané tímto objektem pomocí tzv. odpovídače (z *angl. transponder*), která má normovanou frekvenci. Tato frekvence je zpravidla jiná než frekvence signálu vyslaného radarem. Tento odpovídač tedy zachycuje signál vyslaný radarem tzv. dotazovačem (z *angl. interrogator*). Sekundární radary mohou komunikovat pouze s objekty, které jsou vybaveny příslušnými odpovídači, ovšem získávají mnohem více informací než radary primární. Blíže je rozdíl mezi těmito radary zobrazen na **Obrázek 1.18**. [7]

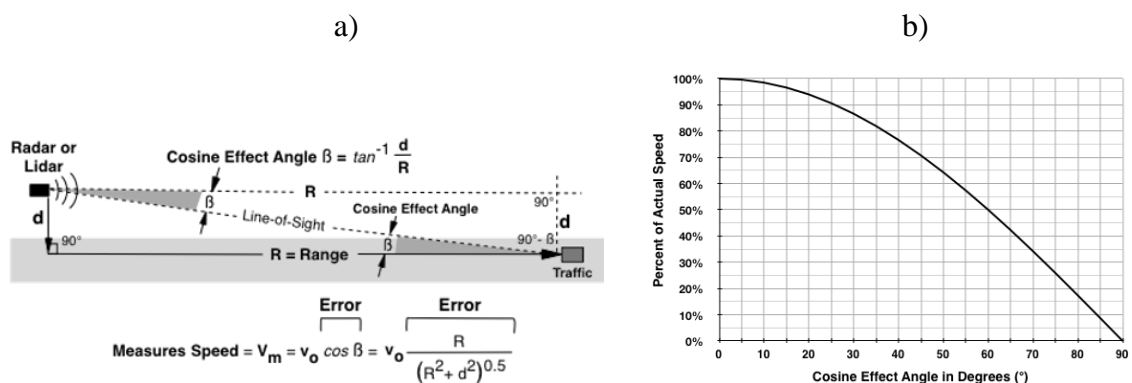


Obrázek 1.18: Základní typy aktivních radarů, primární a), sekundární b) (Převzato z [7])

- **Pasivní radar** – pasivní radar je takový radar, který není aktivní ve smyslu vysílání vlastního elektromagnetického vlnění. Jeho princip je založen pouze na přijímání signálů generovaných jinými objekty [7]. Tento typ radaru má zastoupení zejména ve vojenství, protože jeho hlavní výhodou je, že se nedá detekovat a může pracovat takřka zcela v utajení, a to právě kvůli režimu kdy nevysílá, ale pouze přijímá. Tato práce využívá aktivního primárního systému, proto pasivní systémy nebudou blíže popsány a rozvedeny.

1.7 Kosinový efekt

Tento efekt má na svědomí jednu ze základních chyb vznikající při měření rychlosti daného objektu, kterým může být automobil, cyklista nebo třeba běžec na závodní dráze. Celá chyba je způsobena vzájemnou polohou radaru a měřeného objektu během měření. Jinak řečeno při měření rychlosti pomocí radaru ve většině případů nedochází k zaměřování objektu v ose radaru, ale pod určitým úhlem. Tento úhel způsobuje právě chybu měření rychlosti. Takto změřená rychlost se nazývá relativní a zahrnuje právě onu chybu. Ovšem abychom tuto chybu potlačili, je potřeba tuto relativní rychlost v_R přepočítat v závislosti onom úhlu β mezi osou radaru a osou, pod kterou je objekt změřen a na rychlost skutečnou v_0 . Pro názornost je tato problematika znázorněna na **Obrázek 1.19 a)**. **Obrázek 1.19 b)** představuje závislost podobnosti měřené rychlosti vůči skutečné rychlosti na úhlu β .

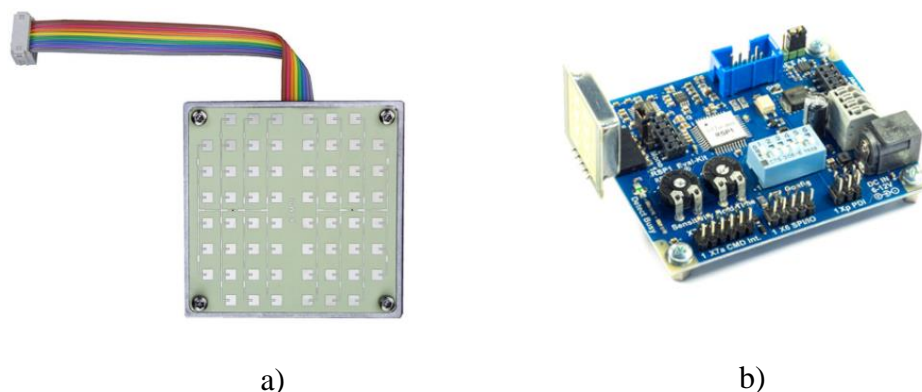


Obrázek 1.19: Kosinový efekt zkreslující skutečnou rychlost a) Graf přesnosti měření na odchylce osy měření vůči ose radaru b) (Převzato z [5])

2 REŠERŠE RYCHLOSTNÍCH ČIDEL

Tato část textu rozebírá postup výběru vhodného rychlostního mikrovlnného čidla na základě požadavků, které jsou na jeho vlastnosti kladeny. Komerční trh s těmito čidly je velmi rozsáhlý a možností výběru je nemalé množství. Obecně existují v této oblasti kompaktní čidla, která jsou již od výrobce vybavena modulem, v němž je přijatá informace (signál) zpracovávána na základě z výroby daného algoritmu. K těmto druhům čidel, které jsou vybaveny mikroprocesorem, někteří výrobci dodávají i software, ve kterém je možno nastavovat, jak se má čidlo chovat a v jakém režimu má pracovat.

Na druhou stranu jsou na trhu i základní čidla, která tímto modulem vybaveny nejsou a práce s nimi je tak trochu více řečněme zajímavá a nabízí vlastní způsob naložení s výstupním/i signálem/y, případně vlastní návrh signálového zpracování. Výstup takových čidel tvoří zpravidla NF Dopplerův signál případně I/Q signály. Pro představu jsou oba tyto typy zobrazeny na **Obrázek 2.1**. Také je možné u těchto čidel bez signálového zpracování řídit jejich pracovní režim a tím pádem celé chování radaru skrz řídicí signály. Rychlostní čidla jsou navrhována v různých frekvenčních pásmech podle budoucí aplikace.



Obrázek 2.1: Mikrovlnný rychlostní radar K-MC1 bez signálového zpracování a), (Převzato a upraveno z [4]) a RSP1 s komplexním signálovým zpracováním a softwarovou interpretací výsledků b), (Převzato z [12])

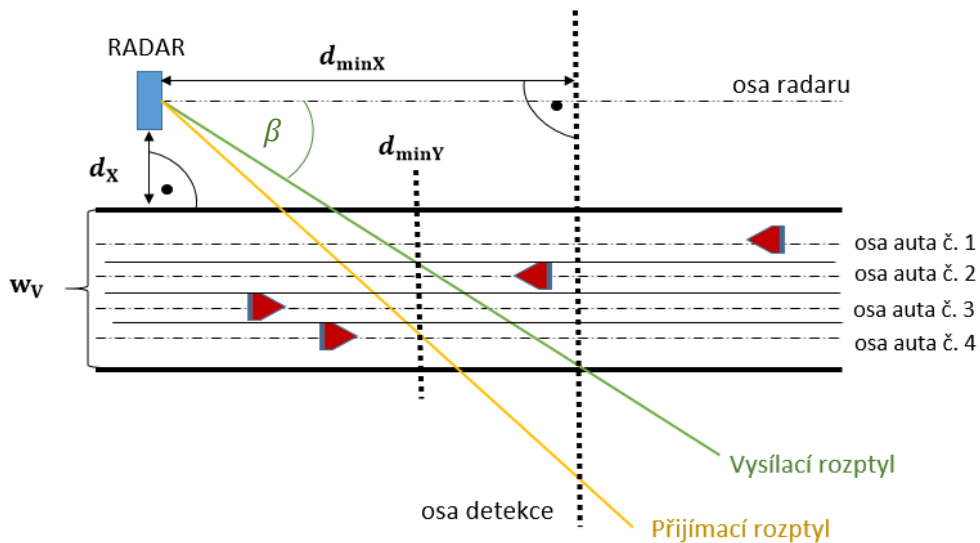
2.1 Základní požadavky

Základními požadavky kladenými na vybrané rychlostní čidlo je především přesnost měření rychlosti v souladu s požadavky na takové měřidla s tolerancí ± 3 km/h a ± 3 % pro rychlosti nad 100 km/h [13]. Dále je pak požadována schopnost rozlišit a měřit 2 až 4 automobily jedoucí vedle sebe v detekční zóně k radaru nebo od radaru. Z těchto základních požadavků už vyplývají rozhodující parametry, kterými by vybrané rychlostní čidlo mělo disponovat. Pokud je dán požadavek rozlišovat více cílů na vozovce je zřejmé, že při výběru nás bude zajímat, zda je čidlo vybaveno frekvenční modulací nebo není. Kromě pracovních režimů čidla bude důležitým parametrem použitý anténní systém, a to ve smyslu vysílaného výkonu, zisku, směrovosti, citlivosti přijímače nebo počtu antén.

2.1.1 Anténní systém

Tyto požadavky vycházejí z aplikace, respektive prostředí, ve kterém bude výsledné zařízení pracovat. Naše zařízení, jak už bylo výše řečeno, by mělo být schopné sledovat až čtyři vozidla na komunikaci tzn. pokrytí čtyř pruhů vozovky. S tímto faktem souvisí směrový vyzařovací diagram antény jak v horizontálním, tak vertikálním směru. Směrové vlastnosti antény by měli být navrženy i v závislosti na vzdálenosti, ve které bude docházet k měření (tzv. detekční zóna). Tuto zónu je vhodné volit v mírně větší vzdálenosti od radaru, než tam kde dochází k pokrytí čtvrtého pruhu vozovky hlavním lalokem paprsku. Důvodem je pokrytí i za minimální detekční vzdálenosti do takové vzdálenosti kdy bude radar schopný stále přijímat signály a jeho citlivost bude dostatečná.

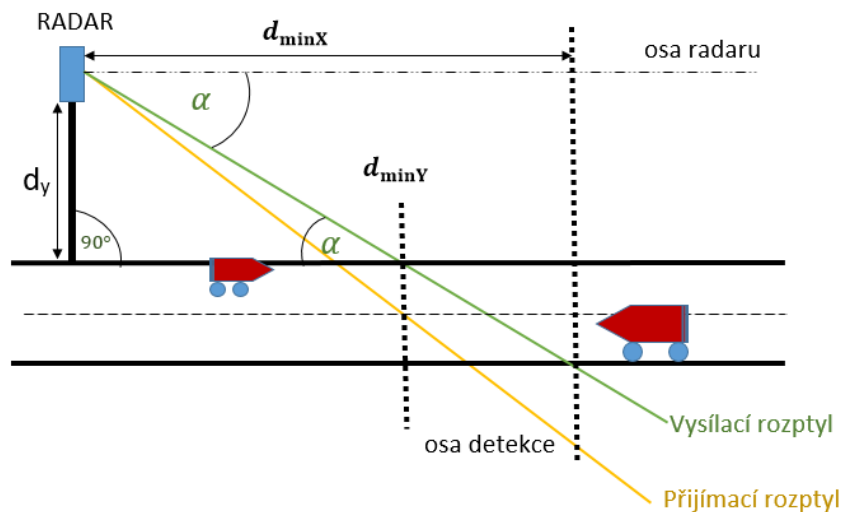
Pro názornost je celý vliv směrovosti antény v horizontální rovině na měření rychlosti v dopravě pro čtyři jízdní pruhy zobrazen na **Obrázek 2.2**. Osa radaru značí referenční osu, kdy pod určitým úhlem od této osy se nachází jednotlivé jízdní pruhy. Čím větší bude tento úhel tím, více se bude lišit výsledná změřená rychlost od korigované (správné). Mezi vzdáleností osy detekce, kdy jsou pokryty všechny pruhy a vzdáleností radaru od krajnice d_x vozovky platí vztah dle rovnice 2.1. Vliv směrovosti ve vertikálním směru je ukázán na **Obrázek 2.3**.



Obrázek 2.2: Půdorys měřícího systému a vliv směrovosti antény v horizontálním směru

$$d_x + w_v = d_{\min X} \cdot \tan \beta \quad 2.1$$

kde d_x [m] je vzdálenost radaru od krajnice vozovky, $d_{\min X}$ [m] je vzdálenost od radaru k ose ve které paprsek pokrývá všechny potřebné pruhy (minimální měřitelná vzdálenost pro všechny pruhy), β [°] je poloviční úhel vyzařování antény v horizontálním směru, který udává výrobce a w_v [m] značí šířku vozovky, $d_{\min Y}$ [m] má význam minimální vzdálenosti kdy je pokryt pouze 1. jízdní pruh.



Obrázek 2.3: Bokorys měřicího systému a vliv směrovosti antény ve vertikálním směru

Opět je potřeba pro výpočet výšky radaru od země znát minimální radarem měřitelnou vzdálenost objektu což je vzdálenost, kdy je pokryt v horizontálním směru žádaný počet jízdních pruhů. Pro výpočet výšky umístění můžeme využít vztahu 2.2. Pokud by anténa byla umístěna výše, než je dovoleno, „přehlédla“ by část měřicí zóny.

$$d_Y = d_{\min Y} \cdot \tan \alpha = \frac{d_X + \frac{W_V}{4}}{\tan \beta} \cdot \tan \alpha \quad 2.2$$

Kde d_Y [m] má význam výšky v jaké je radar umístěn vzhledem k zemskému povrchu

Vyzařovaný výkon vysílací anténou by měl být dostatečný a je klíčový pro volbu měřicí vzdálenosti. V čím větší vzdálenosti si přejeme měřit, tím větší vyzařovaný výkon požadujeme, ovšem nižší vyzařovaný výkon může být ve výsledku kompenzován vyšším ziskem přijímací antény případně větší citlivosti přijímače ale v druhém případě, už by mohlo docházet k utopení užitečného signálu v šumu a nefunkčnosti systému. Celkově by měl být systém mírně předdimenzován, protože je potřeba počítat s okolními vlivy, kterými je především počasí a interference vln vlivem mnohacestného šíření.

Výběr čidla na základě anténního systému proběhl dle následujícího:

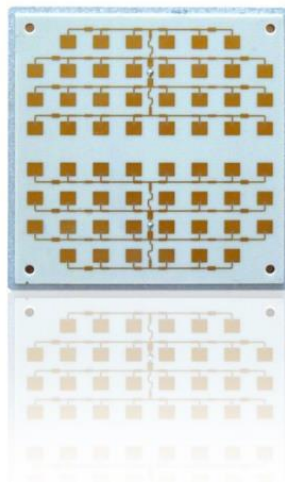
Pro naši aplikaci požadujeme takovou měřicí vzdálenost, při které budou spolehlivě pokryty všechny potřebné jízdní pruhy. Zároveň ale budeme využívat skrz potřebu sledovat až čtyři tyto pruhy čidlo s frekvenční modulací, tím pádem můžeme využít možnosti měřit zároveň i vzdálenosti jednotlivých vozidel. Jinými slovy řečeno pro nás bude rozhodující minimální vzdálenost, v které je čidlo schopné pokrýt 4 pruhy vozovky. Tato vzdálenost bude rozhodovat o výšce radaru nad zemí na základě vztahu 2.2. Také by bylo vhodné volit čidlo s dvěma přijímacími anténami pro možnost korekce relativní rychlosti na skutečnou. Anténa by neměla mít zbytečně široký ozařovací paprsek kvůli odrazům od okolí, ale měla by pokrývat ideálně jen vozovku.

2.2 Potencionální rychlostní čidla

Všechny níže uvedená čidla, mezi kterými probíhal výběr, jsou záměrně bez signálového zpracování z důvodu větších možností, co se experimentování týče, celkové práce s čidlem, případného pozdějšího návrhu vlastního signálového zpracování a komplexního pochopení problematiky. U všech tří čidel je jedno společné a tím je možnost využití frekvenční modulace FMCW, která je pro naše účely potřebná. Je zde také uveden jako příklad jeden zástupce z čidel podporujících signálové zpracování, které by bylo možné eventuálně použít. Všechna uvedená čidla též pracují ve volném K pásmu (24,05 GHz až 24,25 GHz). Při výběru čidla byla brána v úvahu normovaná šířka čtyřproudové vozovky. Tato čtyřproudová vozovka se uvažuje jako čtyři pruhy navazující vedle sebe (bez svodidel). Tyto vozovky jsou typické spíše v zahraničí než u nás. Šířka takové vozovky činí dle normy při šířce jednoho pruhu 3,75 m celkem 15 m [14].

2.2.1 IVS-148

Jedná se o radar od firmy InnoSent (*Innovative Sensor Technology*), který je vybaven jednou vysílací, a pouze jednou přijímací anténou, FMCW modulací a ve své podstatě se jedná o rozšiřující modul k CW typu IPS-144. Ovšem lze ho použít i jako čistý FMCW radar zcela samostatně. Rychlostní čidlo v základní podobě ilustruje **Obrázek 2.4**.



Obrázek 2.4: Radar IVS-148 pro měření rychlosti, směru a vzdálenosti vozidel

Zpravidla je tento typ vhodný pro měření prováděné ve větších vzdálenostech kvůli zisku přijímací antény 30 dB a efektivnímu vysílacímu výkonu 20 dBm, ovšem směrovost antény ve vertikálním směru 25° dovoluje i blízké měření. V rozporu s tím je směrovost antény v horizontálním směru, která je klíčová pro sledování až čtyřproudové vozovky a činí 12°, z čehož pro sledování vozovky je využita polovina tj. 6°. Pokud uvážíme tuto skutečnost, zjistíme, že všechny 4 pruhy jsme schopni při umístění radaru 1 m od vozovky pokrýt ve vzdálenosti až přibližně 152 m. Vnějšími laloky jsou odražené signály potlačovány o 15 dB což znamená, že různé odrazy budou v těchto směrech tlumeny cca 32x. Běžný přijatelný proudový odběr se pohybuje až okolo 80 mA, což bez

možnosti úsporného režimu může v konečné aplikaci znamenat starost navíc při napájení z baterie.

Výhody: Dálková detekce více vozidel, Anténní zisk 30 dB, Vysílací výkon 20 dBm

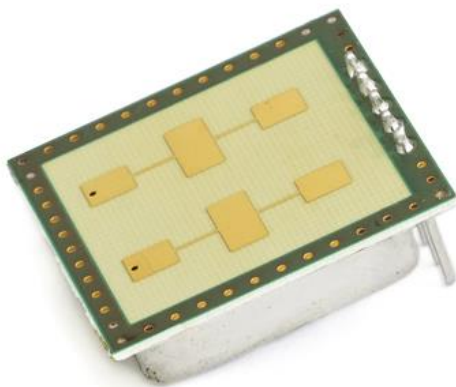
Nevýhody: jediná přijímací anténa (chybí úhlová korekce), pouze FMCW režim, nemá úsporný režim, vedlejší laloky s útlumem 15 dB

Veškeré obrázky a informace o modulu IVS-148 jsou dostupné z:

<http://www.innosent.de/radarsensoren/ivs-series/ivs-148/>

2.2.2 K-LC5

Jako další eventuálně použitelné čidlo má označení K-LC5 od firmy RFbeam MicroWave GmbH. Základní charakteristikou je jedna vysílací, jedna přijímací anténa, takže je jasné, že tento radar není schopen korigovat chybu měření. Disponuje pouze frekvenční modulací nikoliv CW režimem. Dále je navíc oproti předchozímu modelu interně vybaven nízko-šumovým zesilovačem (LNA) se ziskem 10 dB. Reálná podoba tohoto čidla je zachycena na **Obrázek 2.5**.



Obrázek 2.5: Radar K-LC5 pro měření rychlosti, směru a vzdálenosti vozidel

Směrovost antény 80° v horizontální a 34° ve vertikální rovině vypovídá o možnosti využití pro plnohodnotné měření čtyř pruhů již od vzdálenosti 20 m při vzdálenosti od vozovky 1 m což je velký rozdíl oproti výše uvedenému modelu, a je tomu uzpůsoben i zisk antény 8,6 dB, citlivost celého přijímače -103 dBm a efektivní vyzařovaný výkon, jehož typická hodnota dle výrobce činí 15 dBm. Jako výstupy jsou vyvedeny dva kanály I/Q, které jsou vzájemně fázově posunuty o $+90^\circ$ nebo o -90° v závislosti na směru jakým se měřený objekt pohybuje.

Co se týče napětím řízeného oscilátoru řídicího frekvenci vysílání tak radar umožňuje změnu frekvence změnou napětí od -0,5 V do +2 V. Tímto rozsahem je možné měnit vysílací frekvenci od referenčních 24,15GHz o ± 75 MHz v různém poměru směrem k 24,25 GHz nebo naopak k 24,05 GHz. Radar je náchylný na přenos elektrostatického náboje vlivem lidského doteku některého z pinů což by při experimentální manipulaci

mohl být zásadní problém. Čidlo disponuje spotřebou v nejhorším případě 60 mA. Tato hodnota je příznivější, než předchozí ovšem režimem úspory čidlo stále není vybaveno. Při napájení z baterie by byla možnost tohoto režimu výhodná.

Výhody: vybaven LNA, velká směrovost v horizontálním směru, nižší spotřeba, I/Q výstupy, snadnější experimentování při menší potřebné vzdálenosti, velikost, cena

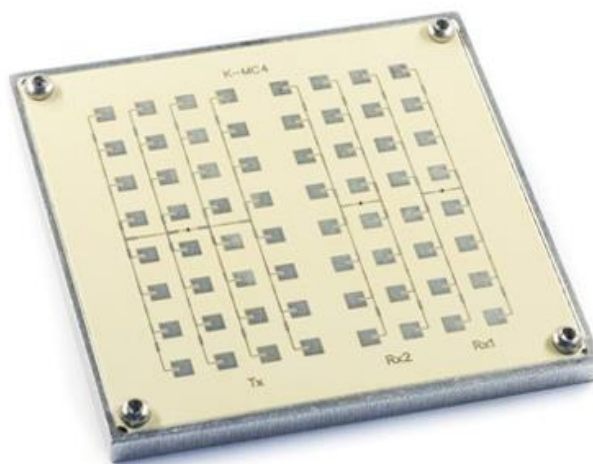
Nevýhody: jediná přijímací anténa (chybí úhlová korekce), pouze FMCW režim, nemá úsporný režim, vedlejší laloky s útlumem pouze 12 dB

Veškeré obrázky a informace o modulu K-LC5 jsou dostupné z:

<https://www.rfbeam.ch/product?id=9>

2.2.3 K-MC4

Jako další možný zástupce bylo vybráno rychlostní čidlo K-MC4 od firmy RFbeam MicroWave GmbH. Jedná se o kompaktní radar, který se v základní charakteristice vyznačuje jednou vysílací a dvěma přijímacími anténami. Z tohoto důvodu jsme schopni využít spojitý režim CW i režim frekvenční modulace FMCW kterým je radar též vybaven. Reálná podoba K-MC4 je ukázána na **Obrázek 2.6**.

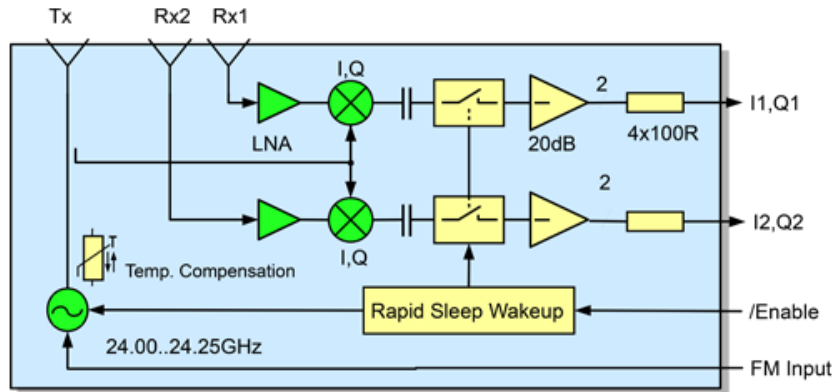


Obrázek 2.6: Radar K-MC4 se dvěma přijímacími anténami Rx1 a Rx2 schopný měřit skutečnou rychlost, vzdálenost a směr pohybu vozidel

Předchozí dvě uvedená čidla byla vždy vybavena pouze jednou přijímací anténou, což znemožňovalo použít spojitý vysílací režim CW, kterým bychom mohli korigovat kosinový efekt a získávat skutečné rychlosti jedoucích vozidel místo rychlostí relativních. Právě skrz dvě přijímací antény je radar opatřen čtyřmi výstupy, přičemž se jedná o výstupy I_1/Q_1 , které jsou závislé na signálu přijatém první přijímací anténou a I_2/Q_2 , které jsou dány signálem přijímaným druhou přijímací anténou (viz. **Obrázek 2.7**). Naopak z fázového posuvu $+90^\circ$ nebo -90° mezi signály na jednom kanále I_x/Q_x jsme schopni jako u typu K-LC5 detekovat směr pohybu automobilu. Frekvenční pásmo, které je

možné na výstupu zachytit je dáno nejnižší frekvencí 15 Hz a nejvyšší hodnotou 300 kHz což jsou hodnoty, z nichž se vychází při návrhu mezí modulačního řídicího signálu podkapitola 3.4.

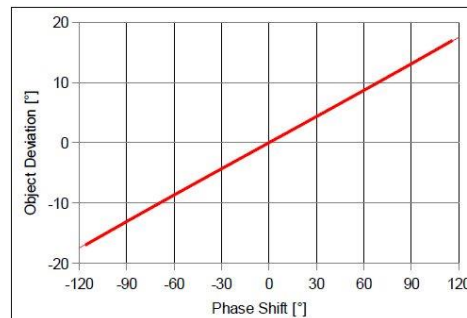
Zásadním rozdílem je, že struktura tohoto modelu obsahuje dva předzesilovače, z nichž jeden je nízko-šumový (LNA) se ziskem 16 dB a ten druhý disponuje ziskem 20 dB. Kompenzují se tak ztráty vzniklé ve směšovači (útlum +12,5dB), který má na starosti generování NF Dopplerova signálu. Jinak řečeno generuje mezifrekvenci, která je dána rozdílem signálu vyslaného a přijatého. Struktura K-MC4 je zachycena na **Obrázek 2.7**.



Obrázek 2.7: Vnitřní bloková struktura K-MC4

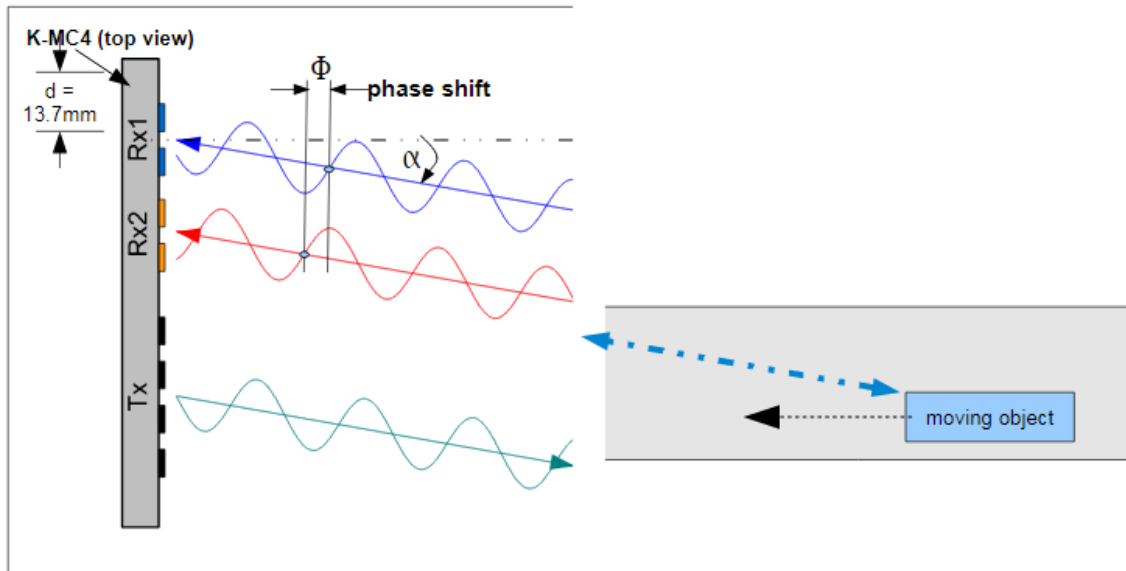
Také je radar vybaven úsporným režimem, který se stará o snížení spotřeby z běžného proudového odběru 140 mA na 7 mA při delší nečinnosti systému. Běžný odběr je dvojnásobný oproti předchozím dvěma čidlům právě z důvodu dalších dvou větví zpracovávání signál přijatý druhou přijímací anténou. Napětím řízený oscilátor je možné řídit různými modulačními signály s napěťovým rozsahem 1 V až 10 V a jeho citlivost, respektive změna frekvence na 1 V činí 18 MHz.

Tím, že jsme schopni oba dva kanály porovnávat, jsme schopni ze zpoždění mezi nimi, respektive z fázového posuvu mezi I_1/I_2 nebo Q_1/Q_2 získávat úhel na základě výrobcem daného přepočtu vycházejícího ze závislosti na obrázku **Obrázek 2.8**, pod kterým bylo dané vozidlo změřeno. Tento úhel je právě chybovým faktorem, pomocí něhož lze korigovat již zmíněnou relativní rychlost.



Obrázek 2.8: Závislost úhlu mezi osou radaru a měřeným vozidlem na fázovém posuvu signálů I_x/I_y nebo Q_x/Q_y

Z takto zjištěného fázového posuvu jsme schopni na základě přepočtení konstanty "k" udávané výrobcem spočítat pomocí vztahu 2.3 úhel α což je azimut, pod kterým je dané vozidlo změřeno. Jedná se tedy o chybový úhel, který můžeme využít ke korekci kosinového efektu a získat tak přesnější údaj bližší skutečnosti v podobě skutečné rychlosti. Celý princip je pro názornost uveden na **Obrázek 2.9**.

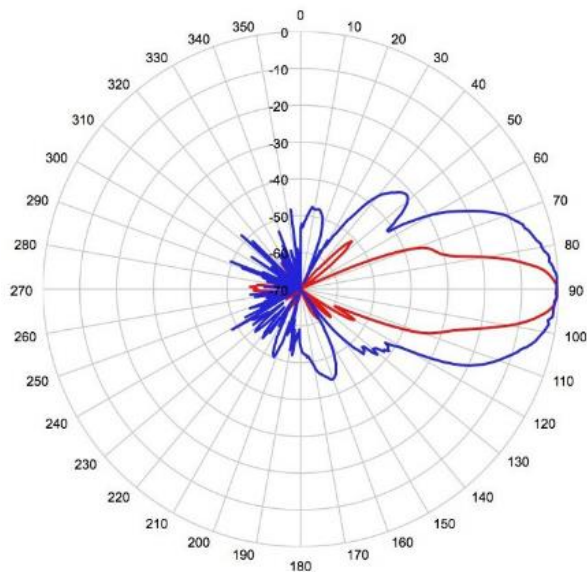


Obrázek 2.9: Vliv zpoždění přijímaného signálu anténou Rx1

$$\alpha = \frac{\Phi}{k} = \frac{\Phi}{6,7} \quad 2.3$$

Směrnost vysílací antény je pro naši aplikaci sledování více cílů též příznivá. V horizontální rovině je paprsek široký 30° přičemž vozovku pokrývá pouze 15° . Z této hodnoty jsme schopni jako příklad při vzdálenosti radaru od vozovky 1 m zjistit, v jaké vzdálenosti dojde k pokrytí všech 4 pruhů vozovky, respektive jaká vozidla budou měřena v daných pruzích v dané vzdálenosti.

Pokud tedy uvažujeme radar 1 m od vozovky a úhel 15° s šířkou čtyřproudové vozovky 15 m, zjistíme na základě vztahu 2.1 minimální vzdálenost, kdy dojde k pokrytí všech potřebných pruhů vozovky přibližně na 60 m. Z efektivního vyzařovaného výkonu vysílací anténou 18 dBm, citlivosti přijímače -116 dBm a uvažování ztrát šířením zjistíme, že přijímaný signál bude dostačující. Směrový diagram antény K-MC4 v obou rovinách ukazuje **Obrázek 2.10**.



Obrázek 2.10: Směrový diagram anténní řady radaru K-MC4, azimut 30° modře a elevace 12° červeně pro pokles vysílacího výkonu na polovinu

Veškeré obrázky a informace o modulu K-MC4 jsou dostupné z:

<https://www.rfbeam.ch/product?id=18>

2.2.4 RXS-TR-10

Zástupcem z řad radarů pro měření rychlosti a sledování provozu v K pásmu s interním signálovým zpracováním je právě tento typ RXS-TR-10 (**Obrázek 2.11**) od firmy RADARXSENSE. Jedná se už o hotový vyladěný výrobek, který se vhodně umístí k vozovce a skrz standard sériové komunikace RS422. Při vysílacím azimutu 70° a elevaci 11° by byl schopný pokrýt požadované pruhy v přijatelné vzdálenosti. Ovšem optimální výška pro instalaci činí 4 m až 7 m což by stěžovalo experimentování. Také je vhodné tento radar instalovat nad vozovku nikoli ke krajnici vzhledem k jeho směrovosti. RXS-TR-10 je tedy vhodným čidlem, které je opatřeno signálovým zpracováním a je použitelné pro naši aplikaci a svými parametry a vlastnostmi splňuje požadavky kladené na výsledné zařízení.



Obrázek 2.11: Radar RXS-TR-10 se zabudovaným signálovým zpracováním

Veškeré obrázky a informace o modulu RXS-TR-10 jsou dostupné z:

<http://www.radarxense.com/rxs-tr-10/>

2.2.5 Shrnutí výběru

Po důkladném porovnávání a zkoumání parametrů a vlastností spousty komerčně použitelných rychlostních čidel byly vybrány celkem tři, jenž by byly potencionálně použitelné pro naši aplikaci a splňovaly by naše požadavky sledovat dva až čtyři jízdní pruhy. Z těchto tří vybraných čidel bylo nakonec vybráno to s označením K-MC4. Hlavním důvodem pro výběr tohoto typu kromě jiného byla i skutečnost, že tento typ vlastní firma RAMET, ve spolupráci, s kterou byla tato bakalářská práce sepsána, a která byla ochotná radar pro experimentální účely zapůjčit.

Technických důvodů, které hráli hlavní roli, je mnoho. Jedním ze zásadních je skutečnost, že K-MC4 je vybaveno dvěma přijímacími anténami a tím pádem podporuje CW vysílací režim a existuje tak možnost korigovat změřenou rychlost. Tímto režimem předchozí dvě čidla IVS-148 a K-LC5 nejsou vybavena. Dalším důvodem je také skutečnost, že K-MC4 disponuje úsporným režimem, což by bylo při konečné aplikaci výhodné zejména při napájení z baterie. Napětím řízený oscilátor je možné řídit napětím 1-10 V načež u K-LC5 je tento rozsah pouze -0.5 až 2 V s to znamená, při podobném ladícím rozsahu větší kmitočtový krok a hrubší citlivost na jeden volt, což vypovídá o stabilitě a kvalitě oscilátoru která je lepší, pokud je ladící krok menší jako u K-MC4.

Další bezespornou výhodou je, že struktura K-MC4 je vybavena dvěma předzesilovači, které zajišťují na výstupu pro další zpracování vhodnější úroveň signálu než předchozí modely. Potlačení postranních laloků, jimiž jsou přijímány nechtěné odražené a nežádoucí signály mimo hlavní lalok dosahuje typické hodnoty 20 dB. Tato hodnota znamená stonásobný útlum nežádoucích signálů. Předchozí modely, měli postranní laloky více aktivní co do příjmu nežádoucích signálů. Výběr stojí i na kompromisu měřicí vzdálenosti detekce všech čtyř pruhů, která by byla u modelu IVS-148 při vzdálenosti 1 m od vozovky a šířce vozovky 15 m asi 152 m. U modelu K-LC5 při stejných výchozích parametrech bychom mohli měřit už ve vzdálenosti 20 m. U K-MC4 byla tato hranice spočítána na hodnotu 60 m. Samotný výpočet umístění radarového systému je popsán v následující podkapitole 2.3.

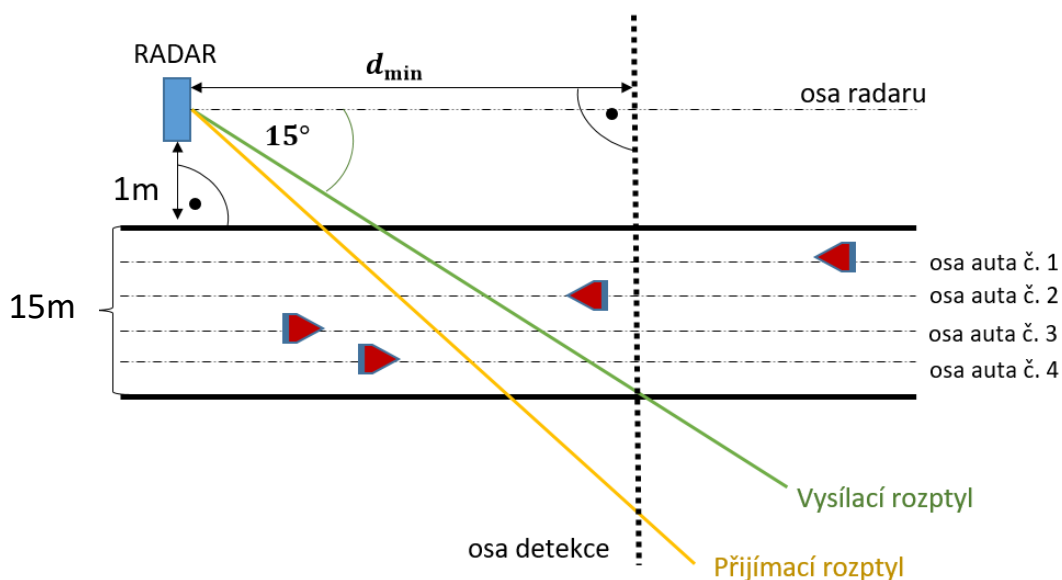
2.3 Umístění radaru K-MC4

V závislosti na konkrétním typu a parametrech vybraného radaru K-MC4 je nyní možné určit polohu radaru v prostoru u vozovky, ve které bude radar umístěn a kde bude spolehlivě měřit námi požadované informace o projíždějících vozidlech. Základním předpokladem je, že radar nebude umístěn v zatáčce ale u rovně vedoucí komunikace 1 m od krajnice $d_x = 1$ m. **Tabulka 2.1** udává základní informace pro výpočet umístění.

Směrnost vysílací antény K-MC4		
Rovina	Šířka hlavního laloku	Část pokrývající vozovku
Horizontální	30°	$\beta = 15^\circ$
Vertikální	12°	$\alpha = 6^\circ$

Tabulka 2.1: Směrnost vysílací antény K-MC4 pro pokles výkonu o 3 dB

Jako první bude na základě námi zvolené vzdálenosti radaru od vozovky $d_x = 1$ m a normou danou šířky čtyř pruhové vozovky 15 m vypočítána minimální vzdálenost d_{\min} [m]. Grafické znázornění, z něhož výpočet v horizontální rovině vychází je na **Obrázek 2.12**.



Obrázek 2.12: Půdorys situace výpočtu minimální vzdálenosti osy detekce 4 pruhů vozovky

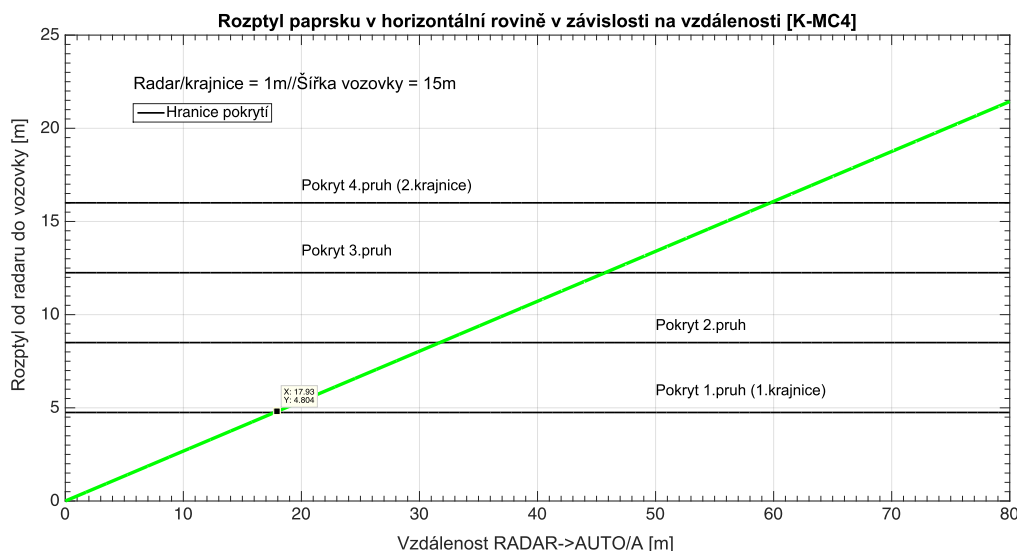
$$d_x + w_V = d_{\min X} \cdot \tan \beta \rightarrow d_{\min X} = \frac{d_x + w_V}{\tan \beta} = \frac{1 + 15}{\tan 15^\circ} \cong 60 \text{ m}$$

Nyní jsme schopni vypočítat, v jaké výšce by se měl radar při měření nacházet. Situace není úplně jednoznačná. Pokud bychom, pro výpočet výšky umístění použili výše získanou vzdálenost 60 m, výška radaru by vyšla velká a nebyla by optimální. Důvod je takový, že radar by tak nedetekoval automobily jedoucí v bližší vzdálenosti, než 60 m což jsou auta jedoucí v pruzích 1 až 3. Toto je důvod, proč musíme volit minimální vzdálenost pro výpočet výšky takovou, kdy je, v horizontální rovině pokryt 1. pruh vozovky, aby došlo k zachycení i bližších automobilů. To je výhodné zejména v situacích kdy řidič projede detekční zónou bez porušení rychlostního limitu, ale poté zrychlí, takto budou postupně detekovány pruhy 1 až 4, a nikoliv všechny 4 pruhy až ve vzdálenosti 60 m. Šířka vozovky w_V je dělena počtem pruhů, získáme tak šířku jednoho pruhu 3,75 m.

$$d_x + \frac{w_V}{4} = d_{\min Y} \cdot \tan \beta \rightarrow d_{\min Y} = \frac{d_x + \frac{w_V}{4}}{\tan \beta} = \frac{1 + \frac{15}{4}}{\tan 15^\circ} \cong 18 \text{ m}$$

$$d_Y = d_{\min Y} \cdot \tan \alpha = 18 \cdot \tan 6^\circ \cong 1,89 \text{ m}$$

Výpočtem jsme zjistili, že radar by měl být umístěn cca 1,9 m nad zemí, ovšem nejedná se o výslednou výšku, ale o maximální výšku, při níž, budou postupně sledované i pruhy 1 až 3 do vzdálenosti 60 m kde budou plně pokryty všechny čtyři pruhy. Jinak řečeno výšku lze zvolit i menší než 1,9 m. Postupné pokrývání jednotlivých pruhů znázorňuje **Obrázek 2.13**.



Obrázek 2.13 - Simulace postupného pokrývání jednotlivých pruhů anténním paprskem až do detekční zóny 60 m, od které jsou pokryty všechny čtyři pruhy

2.4 Výpočet maximální detekovatelné vzdálenosti

Při znalosti detekční hranice pokrytí čtyř pruhů 60 m je potřeba zjistit do jaké vzdálenosti od této hranice bude čidlo schopno přijímat signály, které budou mít ještě dostatečnou úroveň vzhledem k citlivosti -116 dBm (-134 dBc). Tato vzdálenost závisí na více faktorech, mezi které se řadí zmíněná citlivost, frekvence nosné vlny 24,125 GHz, a hlavně efektivní odrazná plocha automobilu RCS, která je relativní mírou.

Při výpočtu se musí počítat s nejhorsí variantou, kdy musíme brát v úvahu malé vozidlo, s malou uvažovanou odraznou plochou. Na základě **Obrázek 2.15** je vidět, že malé vozidlo má odraznou plochu asi 30 m². Efektivní odrazné plochy znázorňuje **Obrázek 2.15**. Tato malá odrazná plocha způsobí menší přijatou odezvu než větší vozidlo, a pokud tento vůz pojedede ve velké vzdálenosti, kterou musíme vypočítat na základě vztahu na **Obrázek 2.14** udávaného výrobcem jakožto zjednodušenou radarovou rovnicí pro dané K pásmo, vzhledem ke zmíněné citlivosti přijímače bude tato vzdálenost výchozí pro hledanou maximální detekční hranici. Nejhorším případem je tedy malý vůz jedoucí ve velké vzdálenosti. Na **Obrázek 2.16** jsou znázorněny dva vozy s odlišnými RCS kde RCS2 > RCS1. Při této podmínce může mít signál odražený od vozu s RCS2 větší úroveň než od vozu s RCS1, a to i přesto, že se nachází ve větší vzdálenosti. To dokazuje i rovnice na **Obrázek 2.14**.

The famous "Radar Equation" may be reduced for our K-band module to the following relation:

$$r = 0.0167 \cdot 10^{\frac{-S}{40}} \cdot \sqrt[4]{\sigma}$$

Maximum range for Doppler movement depends mainly on:

- Module sensitivity S: -134dBc (@1kHz IF Bandwidth)
- Carrier frequency f_0 : 24.125GHz
- Radar cross section RCS ("reflectivity") of the object σ ¹⁾: 1m² approx. for a moving person
>50m² for a moving car

Obrázek 2.14 - Citace upravené radarové rovnice uváděné výrobcem v dokumentaci K-MC4

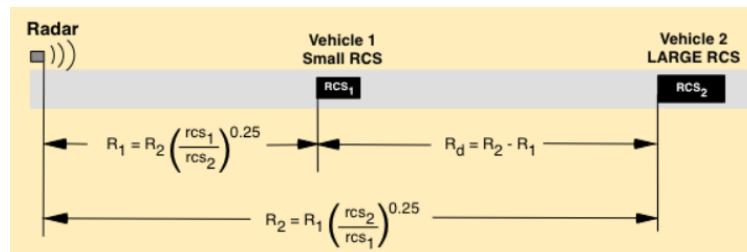
Estimated Vehicle RCS	
Vehicle Type	m ²
RV	400
Full Size Pickup	200
Large Car	120
Mid Size Car	60
Small Car	30

Obrázek 2.15 - Odhadované efektivní odrazné plochy vozidel různých typů (převzato z [5])

Výpočet maximální vzdálenosti, kdy bude detekováno malé vozidlo:

$$r_{\max} = 0,0167 \cdot 10 \cdot \frac{-\text{Sensitivity}}{40} \cdot \sqrt[4]{RCS} = 0,0167 \cdot 10 \cdot \frac{-(-134 \text{ dBc})}{40} \cdot \sqrt[4]{30} \cong 87,5 \text{ m}$$

Maximální hranice r_{\max} , kdy bude detekováno s minimálním přijímaným signálem malé auto s efektivní odraznou plochou na základě 30 m² byla vypočítána na 87,5 m. Ve skutečnosti však zvolíme pro minimální hodnotu přijímaného signálu větší hodnotu než -134 dBc, proto zvolíme hranici, kdy bude přijímaný signál vyhodnocovaný do 80 m. Tímto rozhodnutím jsme zajistili spolehlivou detekci všech uvedených vozidel na **Obrázek 2.15** do vzdálenosti 80 m. Tato hodnota by měla být maximální hranici pro výpočet prahovací úrovně zpoždění signálu případně jeho velikosti, kde se bude rozhodovat, zda byl přijatý signál odražen blíže než 80 m. Pokud ano bude se pokračovat v měření, pokud ne signál se nebude zpracovávat.



Obrázek 2.16 - Ilustrace pro vysvětlení závislosti velikosti přijatého signálu na RCS automobilu (převzato z [5])

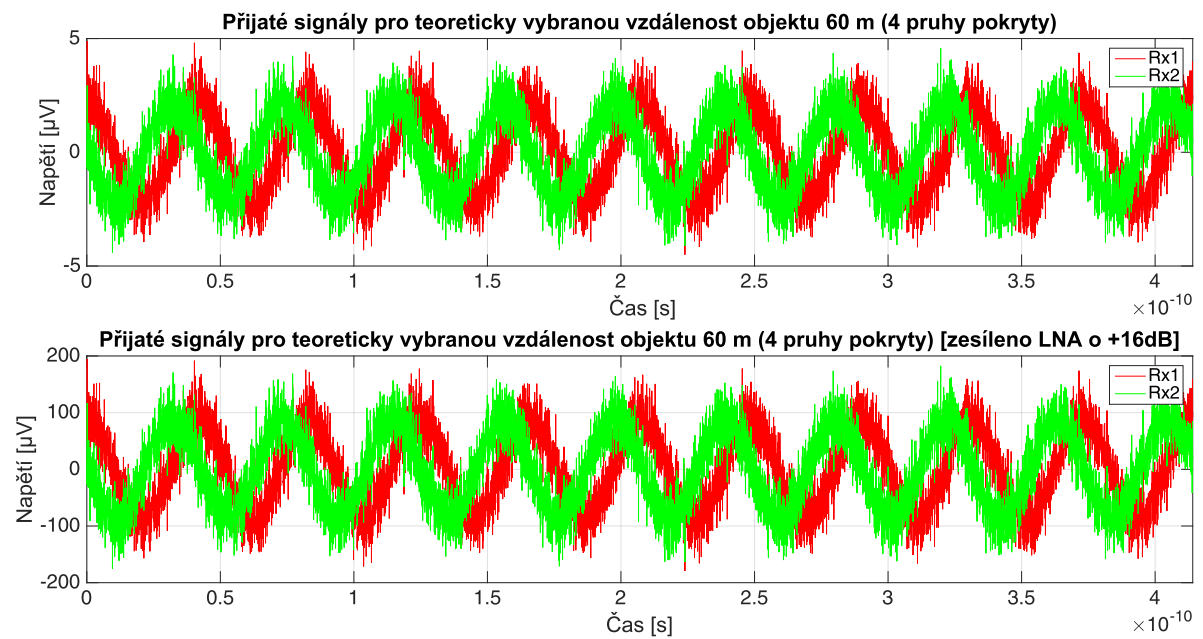
3 SIMULACE A NÁVRH SIGNÁLU

V této kapitole jsou interpretovány výsledky provedených simulací. Všechny simulace byly provedeny v interaktivním programovém prostředí MATLAB R2015a od firmy MathWorks. Simulace jsou prováděny pro námi dříve vybrané čidlo K-MC4, jehož základní parametry a vlastnosti jsou vstupními parametry pro provedení výsledného výpočtu. Předmětem simulací je vyzkoušet různé režimy tohoto čidla ve smyslu použití, respektive nepoužití frekvenční modulační (FMCW). Postupně je simulováno, jak se mění schopnost pro jednotlivé tvary modulačních signálů měřit rychlost, vzdálenost a z toho plynoucí další informace o měřeném objektu. Pro tyto jednotlivé kroky jsou využity celkem tři základní tvary modulačních signálů uvedené v teorii konkrétně na **Obrázek 1.10**. Jedná se o průběh pilovitý, obdélníkový a trojúhelníkový. Výsledkem těchto simulací je výběr optimálního modulačního signálu pro budoucí experimentování a přesný návrh jeho parametrů. Pro nakonec nejvhodnější vybraný typ modulační jsou v simulaci zahrnuty i vlivy okolního prostředí ve smyslu mnohacestného šíření a vlivu počasí na výsledný přijímaný signál. Celá simulace je založena na paprskové metodě nikoliv na metodě rovinné transverzálně elektromagnetické vlny (TEM).

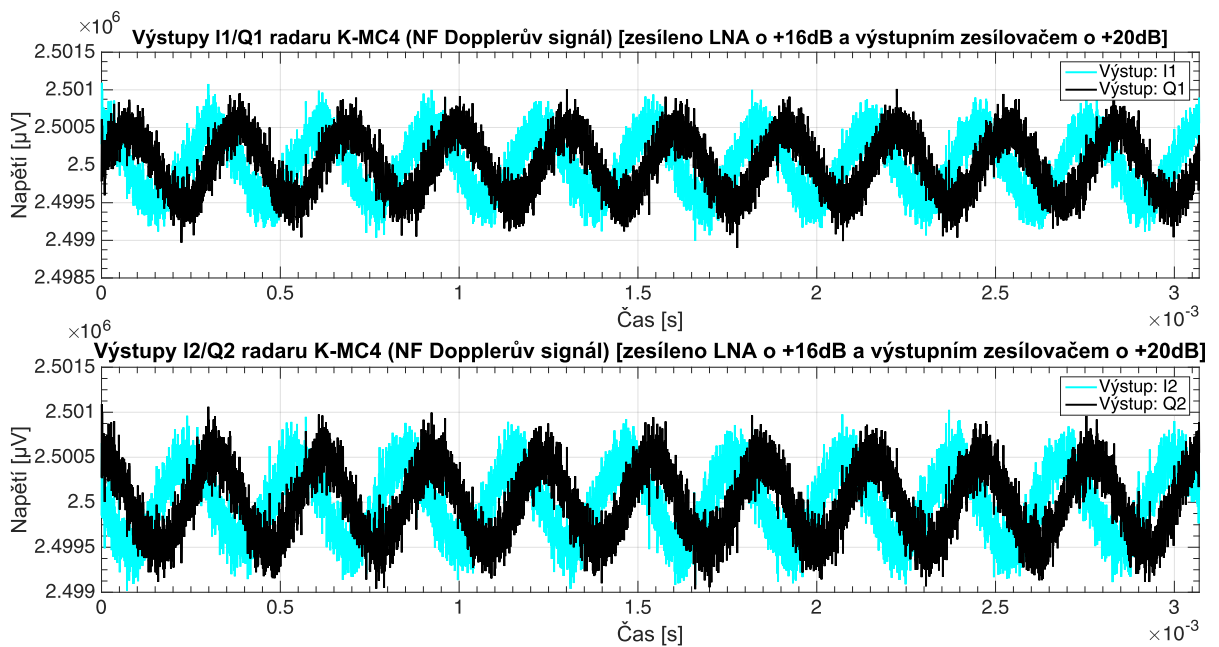
3.1 Režim bez modulační (CW)

Jako první základní režim, ve kterém je K-MC4 schopné pracovat je spojitý režim bez použití modulační s konstantní vysílanou frekvencí, která je dána hodnotou konstantního přiloženého napětí na řídicí vstup napětím řízeného oscilátoru VCO. Pokud tedy čidlo pracuje v CW režimu, potom signál odražený od měřeného objektu v sobě nese pouze informaci o rychlosti vozidla ve formě Dopplerovy frekvence. Zpoždění signálu, které je klíčové pro zjištění vzdálenosti objektu a zjištění jeho konkrétní polohy nejsme při statickém vysílání schopni zjistit. Jediné, co jsme schopni zjistit do polohy objektu je, že můžeme na základě přijatých signálů **Obrázek 3.1** získat na základě přepočtu dle vztahu **2.3** úhel, pod kterým byl objekt změřen. Poté jsme schopni detekovat při znalosti šířky vozovky pruh, ve kterém se automobil nachází nikoliv však jeho vzdálenost. Zároveň je vhodné korigovat relativní rychlost na skutečnou rychlost a potlačit tak kosinový efekt **1.7**.

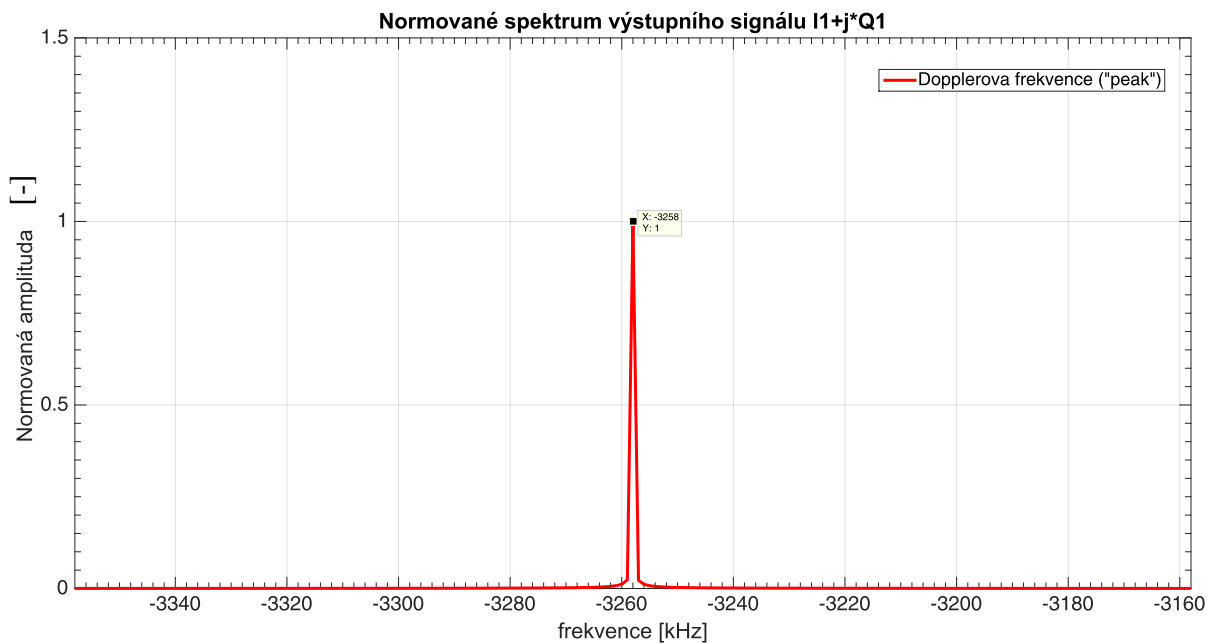
Na **Obrázek 3.1** nahoře jsou znázorněny VF signály přijaté z předem definované vzdálenosti 60 m oběma přijímacími anténami R_{x1} a R_{x2} bez započtení vlivu mnohacestného šíření s poměrem signálu a šumu $S/N = 6$ dB při kterém výrobce definuje citlivost přijímače na -116 dBm. Je také vidět, že signály jsou fázově posunuté. Tato skutečnost, respektive míra tohoto posuvu vypovídá právě o úhlu, pod kterým byl objekt změřený. Na spodní části **Obrázek 3.1** jsou zachyceny ty samé VF signály, ovšem jsou zesíleny nízko-šumovým zesilovačem (LNA) dle **Obrázek 2.7**. **Obrázek 3.2** znázorňuje NF Dopplerův signál na výstupu čidla, jehož frekvence odpovídá dle vztahu **1.2** skutečné rychlosti při uvážení významu úhlu θ jako úhlu, pod kterým byl objekt změřen. Jako další je na **Obrázek 3.3** uvedeno normované spektrum tohoto komplexního signálu, v němž jasně převažuje Dopplerova frekvence. Jako poslední zachycuje **Obrázek 3.4** výstupní komplexní signál v časové oblasti. Jelikož se jedná o komplexní signál, je tvar spirálovitý, kde směr spirály udává směr objektu a je ekvivalentem kladné, respektive záporné Dopplerovy frekvence. Celkové výsledky simulovaného CW měření radarem ukazuje **Obrázek 3.5**.



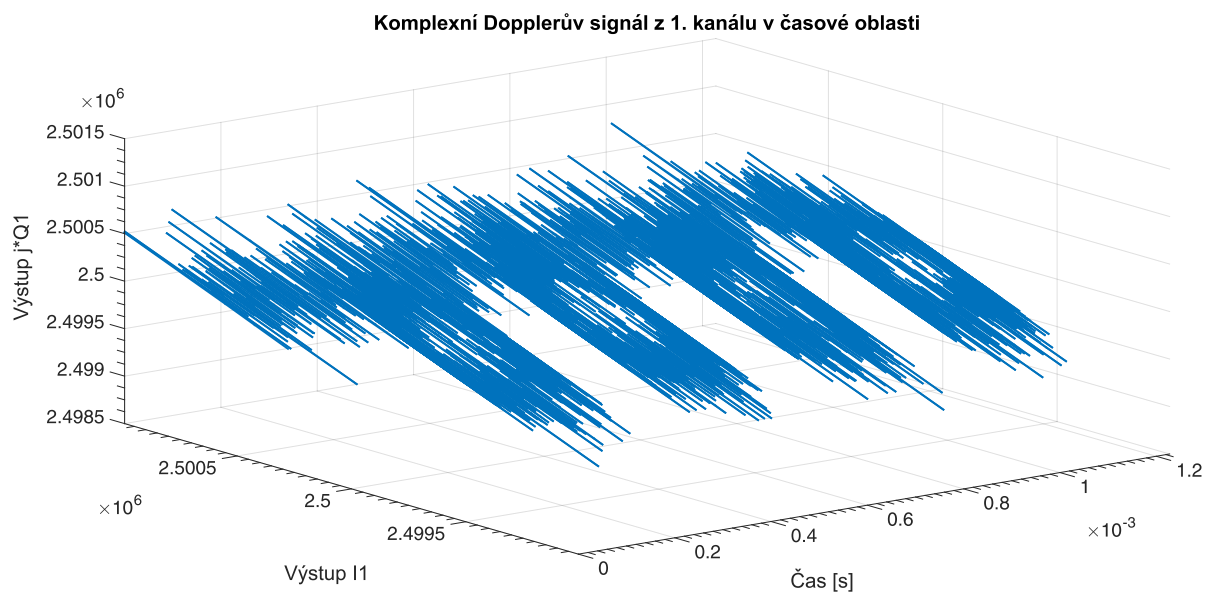
Obrázek 3.1: Přijatý signál (nahore) jeho zesílený obraz (dole)



Obrázek 3.2: Výstupní signály K-MC4 o Dopplerově frekvenci, 1. kanál (nahore) 2. kanál (dole)



Obrázek 3.3: Spektrum výstupního komplexního signálu



Obrázek 3.4: Komplexní signál v časové oblasti

-----CW-----
Fazový posun signálů [°] :
81.8797

Odchylka objektu od osy radaru [°] :
12.2209

Dopplerova frekvence [Hz]
3258

Směr pohybu: Od Radaru
Informace : Automobil se nachází v 2. pruhu

Relativní rychlost objektu [km/h] =
72.8497

Skutečná rychlost objektu [km/h] =
71.1988

Korigovaná chyba měření [%] =
2.3187

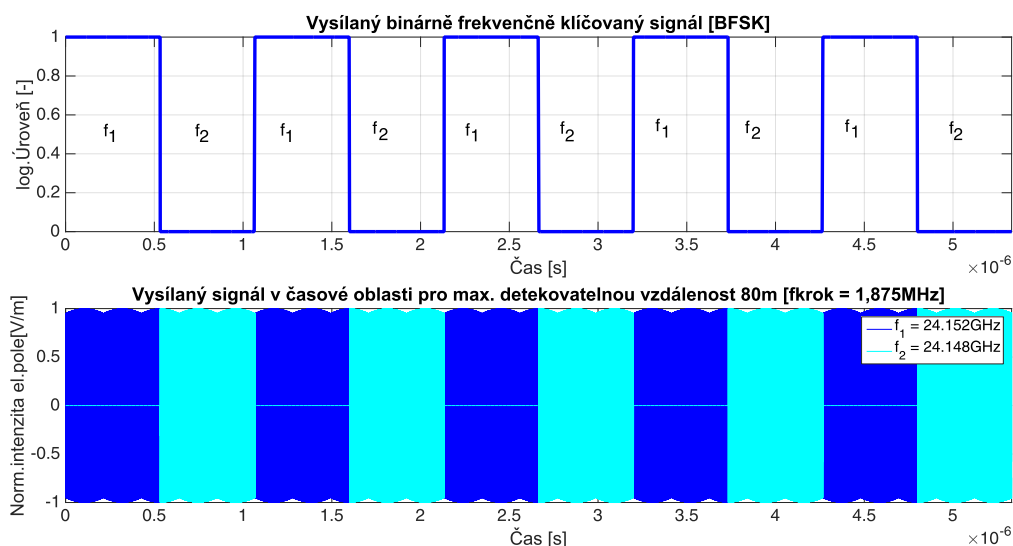
Rychlost je v toleranci +- 3km/h

Obrázek 3.5: Výsledek simulovaného měření v režimu CW

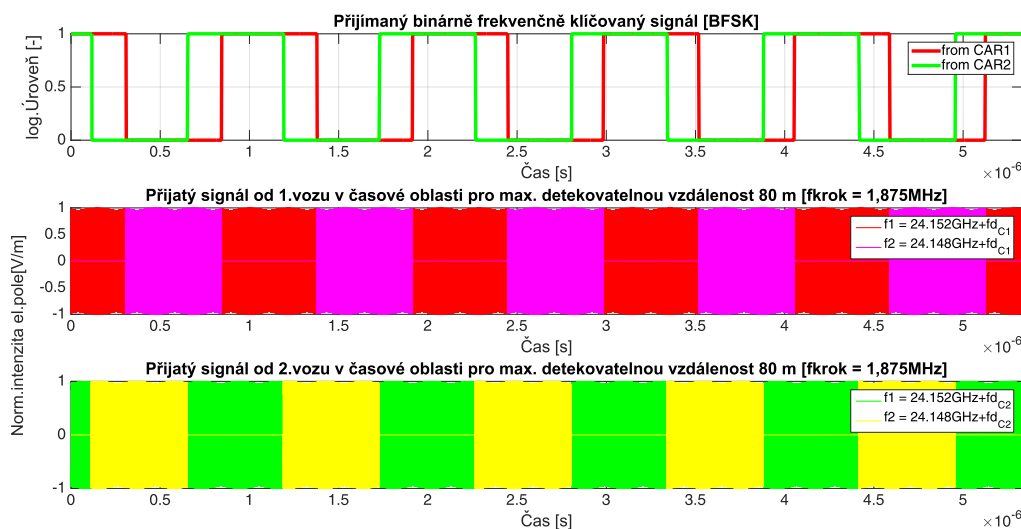
3.2 Režimy s modulací (FMCW)

3.2.1 Binary Frequency Shift Keying

Pro námi vybrané rychlostní čidlo K-MC4, se musí brát v úvahu vlastnosti jeho VCO. Konkrétně je podstatný kmitočtový laditelný rozsah, který činí 180 MHz (typ.) a citlivost ladění, která má hodnotu 18 MHz/V (typ.). Výhodou této modulace oproti režimu CW, ostatně jako každé frekvenční modulace je schopnost přenášet námi následně extrahovatelnou informaci o vzdálenosti měřeného objektu. Ovšem u této modulace získáváme zároveň i informaci o rychlosti objektu. **Obrázek 3.6** znázorňuje vysílací proces načež příjem je naznačen na **Obrázek 3.7**, kde je také pozorovatelné zpoždění VF signálu v časové oblasti neboli fázový posuv signálů, který hraje roli při výpočtu vzdálenosti objektu.



Obrázek 3.6: Vysílací proces BFSK

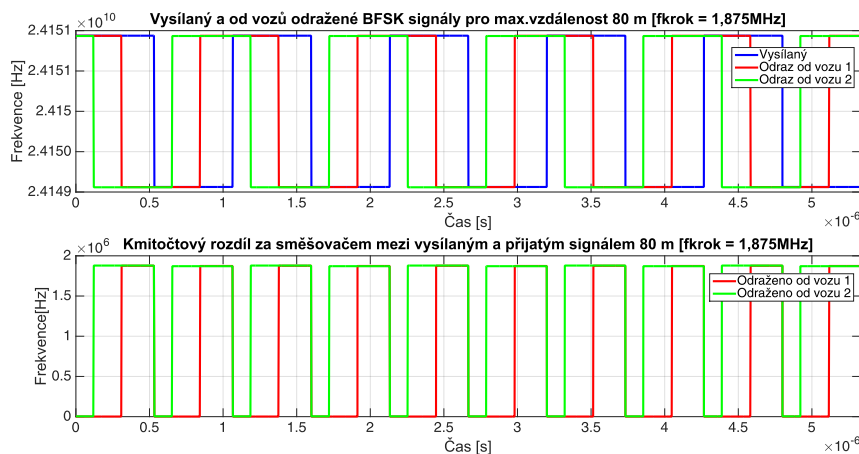


Obrázek 3.7: Přijímané odražené BFSK signály

Pokud se vezme do úvahy hlavní požadavek pokrýt všechny čtyři pruhy, zjistili jsme, že potřebujeme minimální detekovatelnou vzdálenost 60 m, která by v praxi měla být ještě o něco větší. Vzhledem k citlivosti, vybavení K-MC4 lze tuto vzdálenost uvažovat na 80 m s rezervou. Z těchto informací následně spočítáme potřebný frekvenční krok pro tuto modulaci. Uvažuje se při tom deklarovaná typická citlivost VCO 18 MHz/V. Frekvenční krok by měl odpovídat polovině vlnové délky frekvenčního kroku (mezi-frekvence), protože platí, že maximální detekovatelná vzdálenost je u této metody rovna $\lambda/2$.

$$\frac{\lambda}{2} = 80 \text{ m} \rightarrow f_{\text{step}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{300} = 1,875 \text{ MHz}$$

S frekvenčním krokem 1,875 MHz by to znamenalo změny řídicího napětí VCO o ± 104 mV, což není ideální pro VCO s ladícím napětím 1-10 V z důvodu nedostatečné citlivosti a možné nespolehlivosti. Jeden z hlavních důvodů, proč tato modulace nebyla vybrána, jako vhodná je právě tato skutečnost. Další důvody jsou pozorovatelné na výsledku simulace při detekci dvou automobilů, konkrétně na . Spodní průběh odražených signálů znázorňuje v šířce pulzů informaci o zpoždění signálu, zároveň v přiblížení na jsou vidět Dopplerovy posuvy jednotlivých odražených signálů. Pokud dojde k situaci, kdy automobily jedou stejnou rychlostí, ve stejném směru dojde tak ke stejnému frekvenčnímu posuvu a ztrátě informace o jednoznačnosti detekce konkrétního vozu. Méně podstatným problémem je, že s touto modulací nejsme schopni detekovat statické cíle, protože při odrazu nevznikne žádný Dopplerův posuv a signály dojdou do přijímače pouze zpožděné, přičemž rozdíl frekvencí za mixerem tedy Dopplerova frekvence bude nulová, ovšem získání informace o vzdálenosti vychází právě z fázového posuvu Dopplerovy frekvence dle 1.8.



Obrázek 3.8 - Vysílané a přijímané modulační signály (nahore), Rozdíl frekvencí (dole)



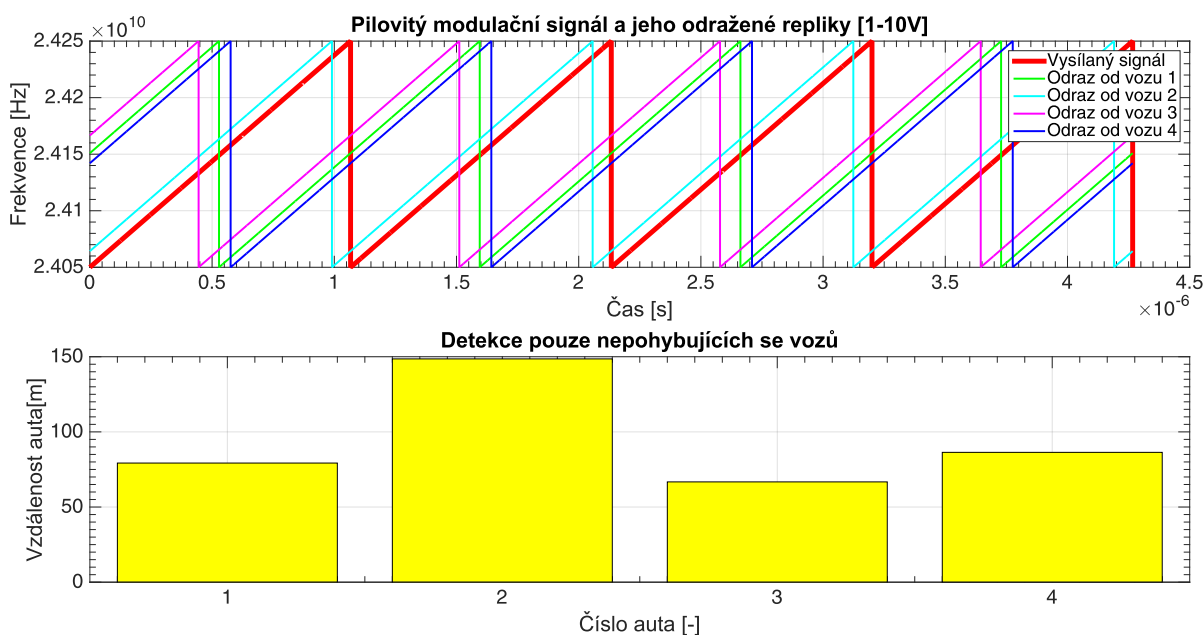
Obrázek 3.9 - Obrázek 3.8 (dole) v detailu pro viditelnost Dopplerovy frekvence

3.2.2 Pilovitý modulační signál

Dalším zkoumaným typem modulačního signálu byl signál pilovitý s lineárním růstem vysílané frekvence, který se opakuje v pracovní periodě $2T_{CPI}$. První výhodou oproti předešlému typu modulace je možnost využít celý laditelný rozsah VCO čidla K-MC4. Vzhledem k tomu, že se jedná o lineární růst kmitočtu nikoliv o změnu skokovou, tak nedochází za směšovačem k nulové rozdílové frekvenci ani při detekci statického objektu. Tato rozdílová frekvence za směšovačem tzv. „beat frekvence (f_b)“ nese v našem případě informace jak o rychlosti, tak o vzdálenosti. Pokud tedy detekujeme touto metodou statický objekt s nulovou rychlostí, jsme schopni ze znalosti f_b získat vzdálenost tohoto objektu, protože ve své velikosti obsahuje pouze časové zpoždění. Vysílaným modulačním signálem rozumíme hodnotu okamžité frekvence vysílané vlny v čase, kterou je vůz ozařován. Jinými slovy jde o průběh vysílané frekvence, který se mění dle řídicího signálu VCO, který musí mít vhodnou amplitudu i vlastní frekvenci $1/2T_{CPI}$ (viz. **Obrázek 1.11** nebo podkapitola 3.4).

Pokud bude objekt v pohybu, nastává problém, protože k dispozici je kvůli jedné náběžné hraně jedna f_b a ta nese v tomto případě informace obě. Jinými slovy získáváme jednu rovnici o dvou neznámých pro řešení. V takovém případě, nejsme tedy schopni pohybující se objekty přesně detekovat. Pokud budeme určovat vzdálenosti těchto objektu i přes jejich pohyb bude tato vzdálenost zkreslena přítomností Dopplerova posuvu přijatého signálu.

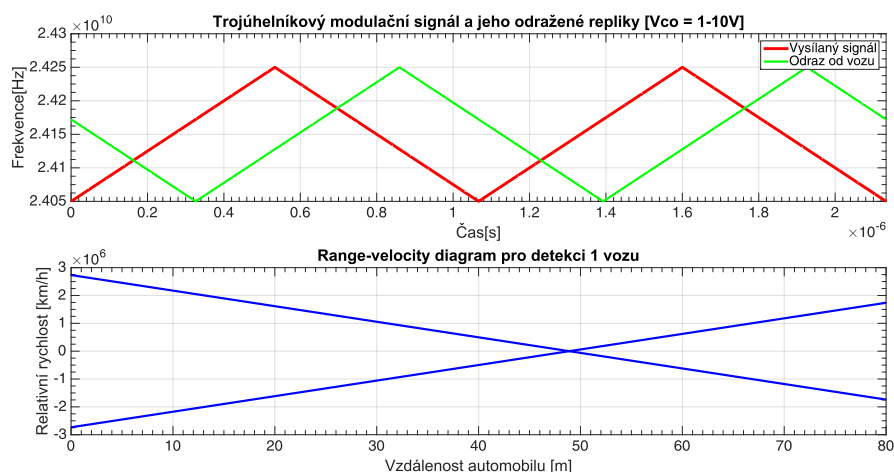
Tato modulace je tedy vhodná především pro zjišťování vzdáleností statických objektů na větší vzdálenosti, protože rampa trvá 2x delší dobu vysílání ($2T_{CPI}$). Na **Obrázek 3.10** je provedena simulace pro detekci až čtyř statických cílů, je vidět že detekovatelná vzdálenost je bez problémů větší jako 80 m. Další nevýhodou je, že při velké detekovatelné vzdálenosti už je pokrytí anténou v horizontálním směru mnohem větší než šířka vozovky a dochází k časté detekci falešných objektů mimo vozovku. Z těchto výsledků už nebylo dále potřeba se touto metodou zabývat, protože je pro kladené požadavky nedostačující.



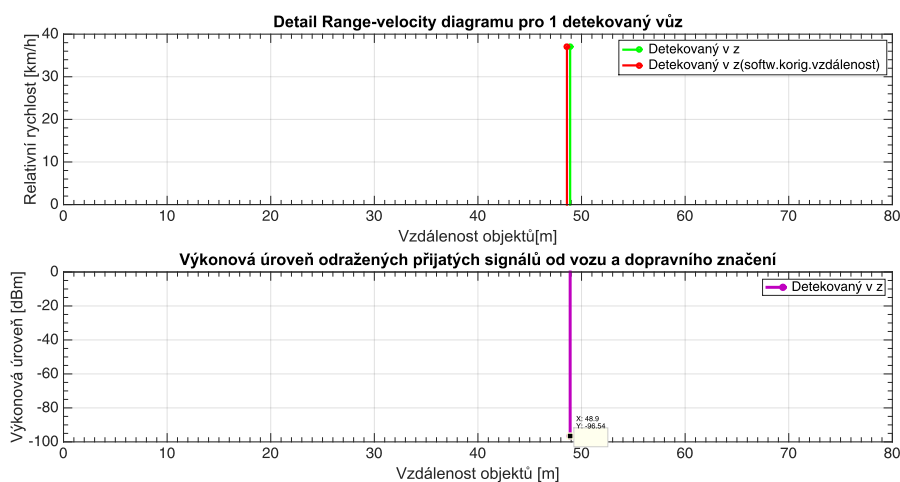
Obrázek 3.10: Detekce až čtyř statických cílů pomocí pilovitého modulačního signálu

3.2.3 Trojúhelníkový modulační signál

Řešením a vhodným kompromisem předchozích metod je právě použití trojúhelníkového modulačního signálu. Hlavní předností této metody je, že máme během jedné pracovní vysílací periody k dispozici celkem dvě „beat frekvence“. Pokud tedy budeme analyzovat přijatý signál, budeme na výstupu směšovače postupně získávat během jedné pracovní periody dvě frekvence f_{b1} a f_{b2} . Každá z těchto frekvencí je opět přímo závislá na zpoždění přijímaného signálu a na jeho posuvu vlivem Dopplerovy frekvence. Pokud objekt bude statický, budou obě frekvence stejné, pokud se bude objekt pohybovat, budou se lišit. V každém případě získáváme dvě rovnice o dvou neznámých na každou pracovní periody vysílaného signálu. Neznámými jsou relativní rychlost objektu a jeho vzdálenost. Detekce jednoho objektu v prostoru ukazuje **Obrázek 3.11** a výsledek tohoto měření **Obrázek 3.12** a **Obrázek 3.13**. Zároveň je i změřená vzdálenost korigována na základě úhlu, pod kterým byl objekt změřen, protože radar měří vzdálenost vždy větší, než je skutečná. Za skutečnou vzdálenost považujeme vzdálenost od radaru kolmo k ose, kde byl objekt detekován. Oproti předchozímu signálu pilovitému bude doba rampy $1/(T_{CPI})$ (viz. **Obrázek 1.12** nebo podkapitola 3.4).



Obrázek 3.11: Detekce 1 automobilu pomocí trojúhelníkového modulačního signálu



Obrázek 3.12: Grafická interpretace změřených informací o 1 vozidlu

```

-----FMCW[1 AUTO]-----
Informace : Automobil se nachází v 1. pruhu
Změřená vzdálenost automobilu [m]:
    48.9005

Korigovaná vzdálenost automobilu [m]:
    48.5906

Relativní rychlost automobilu [km/h]:
    37.0213

Skutečná rychlost automobilu [km/h]:
    36.7867

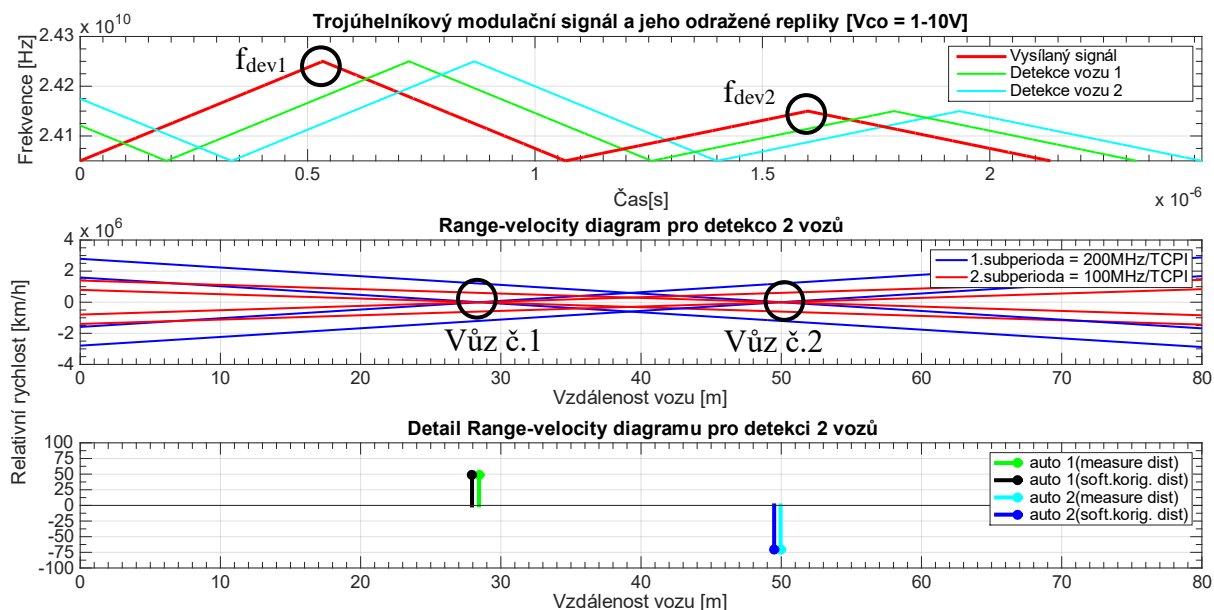
Korigovaná chyba měření [%] =
    0.6378

Směr pohybu: K radaru
Rychlost je v toleranci +- 3km/h

```

Obrázek 3.13: Výsledek simulace měření 1 vozu

Pro návrh je však podstatné rozpoznat až čtyři objekty na vozovce, což s touto modulací je možné. Je potřeba změnit strmost růstu vysílané frekvence během vysílací periody. Pro detekci čtyř cílů jsou tedy potřeba po sobě následující čtyři periody vysílání s rozdílnou strmostí růstu, které jako celek tvoří výslednou periodu, která říká, jak bude potřeba budit VCO. Touto metodou dochází ke zvětšení výpočetní náročnosti, ovšem za cenu spolehlivé detekce. **Obrázek 3.14** ukazuje detekci dvou cílů. Obě simulace obsahují také Range-velocity diagram. Na obou simulacích nejsou uvedeny signály odražené od okolního dopravního značení. **Obrázek 3.15** interpretuje výsledek simulace detekce 2 automobilů.



Obrázek 3.14: Detekce 2 automobilů pomocí trojúhelníkového modulačního signálu

-----FMCW[2 AUTA]-----

Automobil č.1

Informace : Automobil č.1 se nachází v 1. pruhu

Změřená vzdálenost automobilu [m]:

28.4427

Korigovaná vzdálenost automobilu [m]:

27.9465

Relativní rychlost automobilu [km/h]:

48.6400

Skutečná rychlost automobilu [km/h]:

47.7914

Korigovaná chyba měření [%] =

1.7756

Směr pohybu auta: K radaru

Rychlost je v toleranci +- 3km/h

Automobil č.2

Informace : Automobil č.2 se nachází v 1. pruhu

Změřená vzdálenost automobilu [m]:

49.9497

Korigovaná vzdálenost automobilu [m]:

49.4914

Relativní rychlost automobilu [km/h]:|

70.8943

Skutečná rychlost automobilu [km/h]:

70.2438

Korigovaná chyba měření [%] =

0.9260

Směr pohybu auta: Od radaru

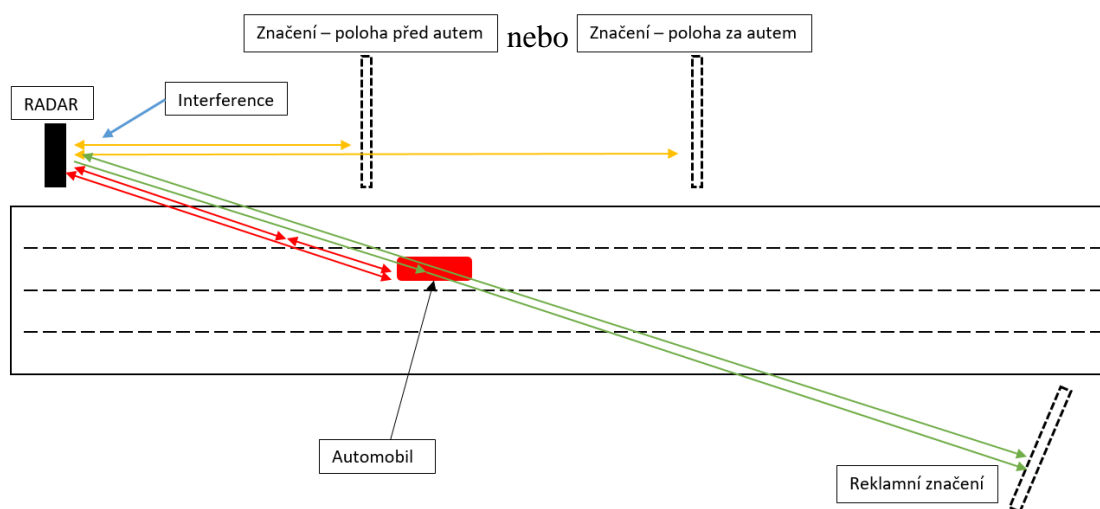
Rychlost je v toleranci +- 3km/h

Obrázek 3.15: Výsledek simulace detekce 2 automobilů trojúhelníkovým modulačním signálem

3.3 Vlivy okolního prostředí

Vlivy okolního prostředí mohou zásadně ovlivňovat výsledky měření. Velkou problematikou je mnohacestné šíření a odrazy od okolních objektů, a to zejména od dopravního značení, reklamních cedulí ale i odrazy od automobilu, které ovšem na své cestě jsou odraženy ještě od vozovky. Vlna má vlnovou délku pouze 12,42 mm, takže i nerovnost může být problém. Všechny tyto situace a mnohé další, respektive všechny tyto odražené vlny s různými amplitudami a fázovými posuvy se ve výsledku sčítají a tvoří tak konstruktivní nebo destruktivní interferenci na vstupu přijímacích antén R_{x1} a R_{x2} . Simulace umožňuje v nabídce volit přítomnost, polohu a velikost dopravního značení v okolí vozovky. Simulace předpokládá plochu značení perfektně elektricky vodivou.

Možné simulované situace zachycuje **Obrázek 3.16**. Jednotlivé přímo i nepřímo odražené signály zachycuje **Obrázek 3.17**, na kterém je též zobrazen výsledný signál po výsledné destruktivní interferenci utopen v šumu, načež na **Obrázek 3.18** je interference konstruktivní. Též je možnost zvolit míru dešťových srážek a tím pozorovat vliv tohoto jevu na signál viz. **Obrázek 3.19**. Veškeré odrazy jsou opět řešeny paprskovou metodou, kdy uživatel si může volit i hustotu paprsků, které chce brát v úvahu v daném intervalu při výpočtu a získat tak reálnější výsledek. Taktéž simulace počítá, zda nedojde k minutí překážky, ale opravdu dojde k odrazu a návratu zpět do radaru. Pro každý vyslaný paprsek je všechno propočítáváno zvlášť pro všechny uvažované situace.



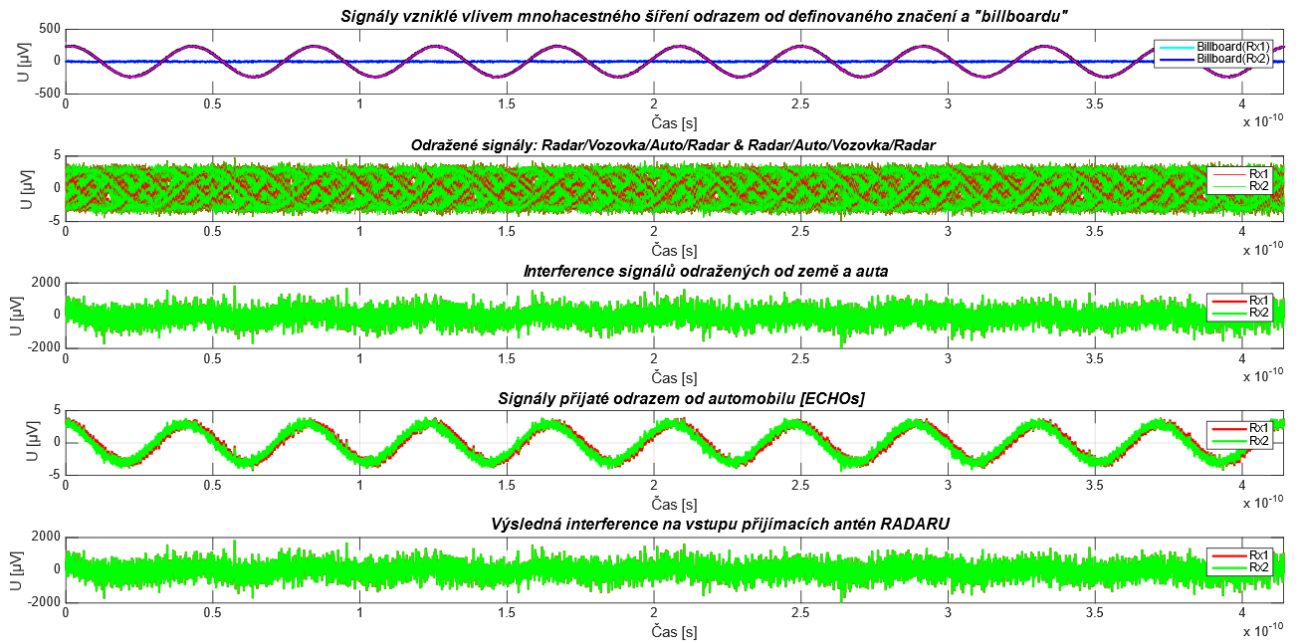
Obrázek 3.16: Princip mnohacestného šíření a konkrétní volitelné situace

Červené paprsky simulují odraz: RADAR-VOZOVKA-AUTOMOBIL-RADAR (a naopak)

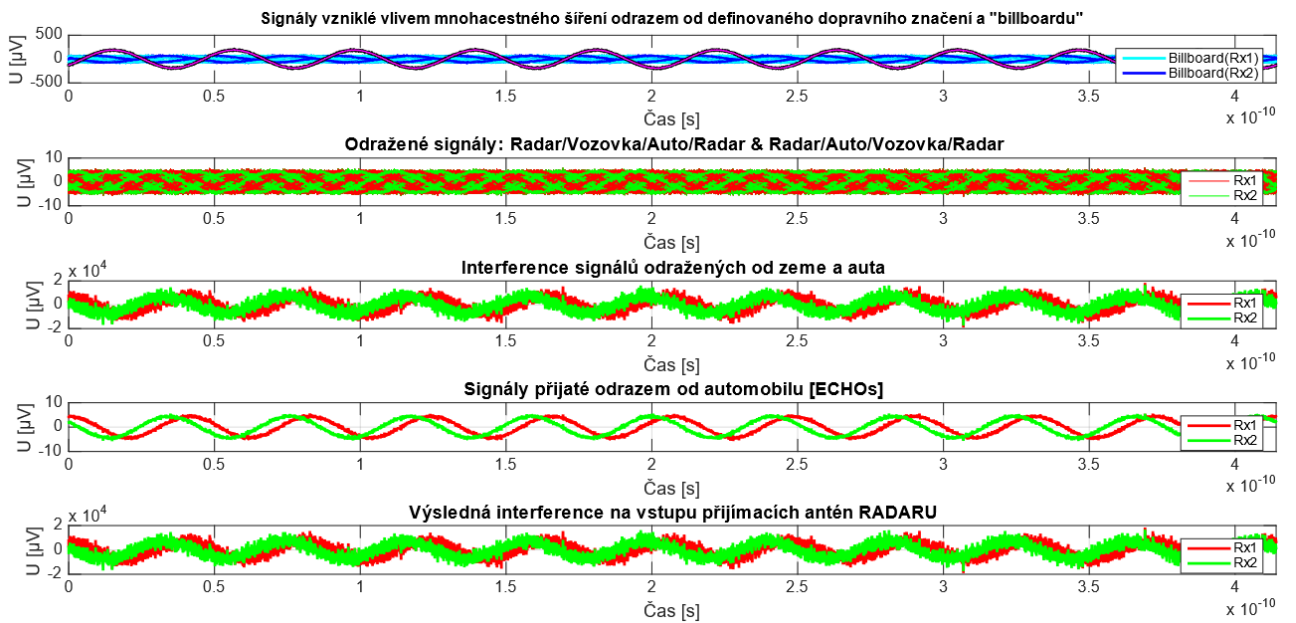
Žluté paprsky simulují odraz: RADAR-ZNAČENÍ-RADAR

Zelené paprsky simulují odraz: RADAR-AUTOMOBIL-BILLBOARD-RADAR

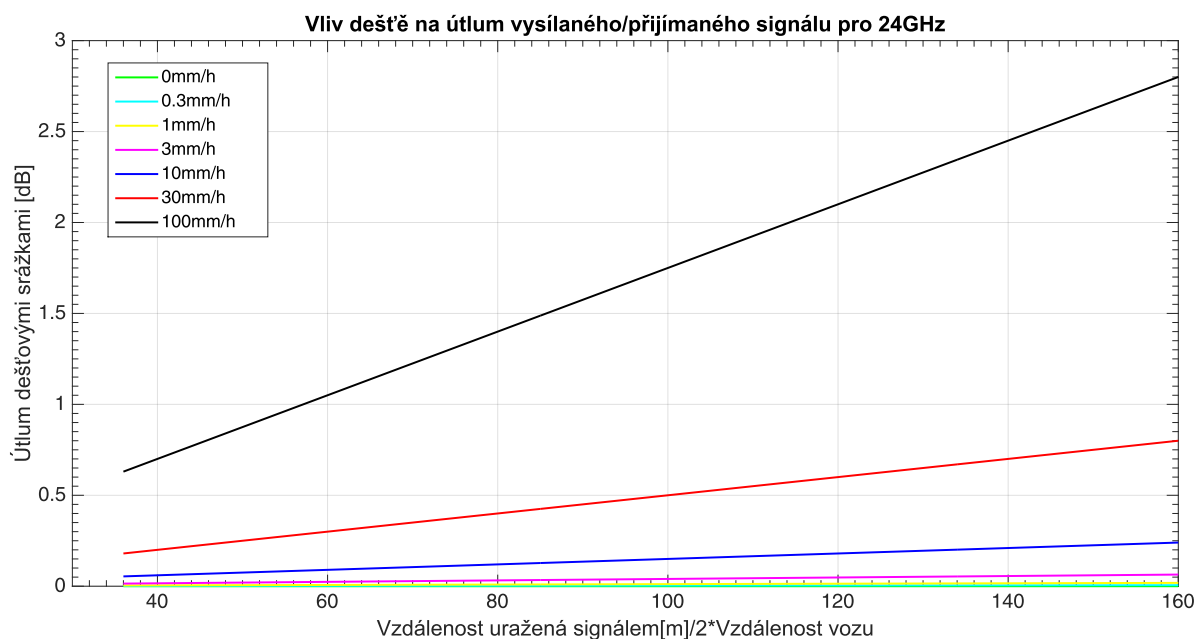
Taktéž jsou v simulaci brány velmi zjednodušeně rozměry auta co do jeho výšky a délky. Tento výpočet využívá již získaných výsledků z měření vzdálenosti metodou trojúhelníkového modulačního signálu, z kterého se vychází. Konkrétně pro automobil č. 1.



Obrázek 3.17: Destructivní interference, kde postupně Shora – Paprsky značené zeleně a žlutě, Červeně, Jejich interference, Užitečný signál odražený od automobilu, Interference všech signálů (dole)



Obrázek 3.18: Konstruktivní interference, kde postupně Shora – Paprsky značené zeleně a žlutě, Červeně, Jejich interference, Užitečný signál odražený od automobilu, Interference všech signálů (dole)



Obrázek 3.19 - Vliv dešťových srážek na útlum signálu při kmitočtu 24GHz

3.4 Návrh vybraného modulačního signálu

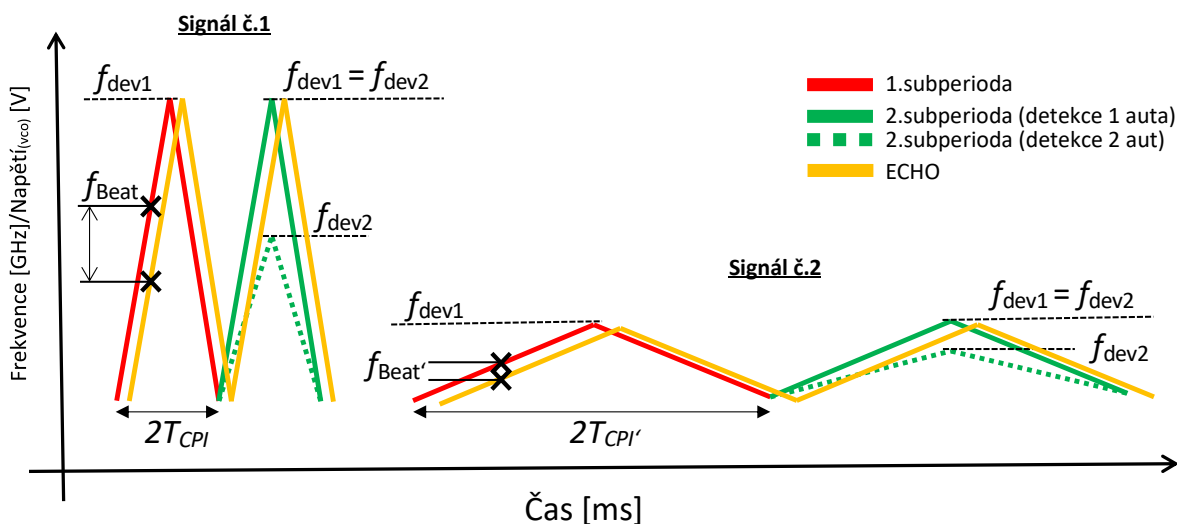
Pomocí výše uvedených simulací jsme zjistili, že neoptimálnější tvar modulačního signálu je tvar trojúhelníkový. Nyní je potřeba navrhnout konkrétní parametry tohoto signálu, tak aby námi vybrané čidlo K-MC4 pracovalo správně a spolehlivě.

Hlavním podnětem pro tento návrh je interval frekvencí, které je schopno čidlo dle výrobce generovat na jeho výstupech I_X/Q_X . Tento interval činí 15 Hz – 300 kHz. Jedná se jinými slovy o frekvence, kterých může nabývat výstupní signál v základním pásmu. Tyto frekvence jsou vlastně rozdílovými kmitočty získanými za směšovačem výše nazývanými „beat frekvencemi“ v případě FMCW režimu a „Dopplerovy frekvence“ v režimu spojitým CW.

Hlavními parametry modulačního signálu, kterými se návrh zabývá jsou jeho frekvence (pracovní perioda $2T_{CPI}$) a amplituda, kterým odpovídá maximální vysílaná frekvence (viz. **Obrázek 1.12**), s níž souvisí hloubka modulace. Cílem návrhu je nalézt kompromis mezi těmito dvěma parametry, tak aby bylo možné detekovat automobily i v extrémních případech. Tyto případy jsou celkem dva, a řídí se jimi minimální a maximální kmitočet modulačního řídicího signálu pouštěného do VCO při dané maximální, respektive minimální hloubce modulace při detekci dvou vozidel (viz. **Obrázek 3.14**).

První extrémní situací je detekce vozidla, které jede maximální návrhovou rychlostí 230 km/h směrem od radaru v maximální detekovatelné vzdálenosti 80 m. Tato skutečnost by měla vyvolat maximální rozdíl frekvence přijaté a vysílané (maximální zpoždění & maximální „záporný“ Doppler) s čímž souvisí horní hranice $f_{BeatMax} = 300$ kHz.

Naopak druhým extrémním případem je detekce vozidla jedoucího v nejbližší možné detekovatelné vzdálenosti (závisí na umístění radaru viz. **Obrázek 2.13**) při maximální uvažované rychlosti 230 km/h směrem k radaru (minimální zpoždění & maximální „kladný“ Doppler). Tento případ by měl vyvolat minimální frekvenční rozdíl a tím pádem minimální frekvenci na výstupu $f_{\text{BeatMin}} = 15$ Hz. Základní problematika a vztahy mezi vlastnostmi modulačního signálu a signálu výstupního je pro představu interpretována na (**Obrázek 3.20**).



Obrázek 3.20 - Parametry modulačního signálu pro následnou optimalizaci a návrh

Z výše uvedeného „Signálu č.1“ je patrné, že s rostoucí maximální hodnotou vysílané frekvence f_{dev1} nebo f_{dev2} (bez nosné \rightarrow hloubka modulace), přičemž je jedno, která bude větší a která menší (při detekci 2 vozidel), může nabývat při zachování určité uvážené periody tohoto signálu $2T_{\text{CPI}}$ rozdílová frekvence f_{Beat} hodnoty větší jako zmíněných 300 kHz a radar nemusí pracovat správně. Řešením je signál označený jako „Signál č.2“, u kterého byla vůči pořád stejně uvažovanému kmitočtu (periodě $2T_{\text{CPI}}$) přizpůsobena velikost maximálních frekvencí f_{dev1} a f_{dev2} . Tímto způsobem se, jak je viditelné z obrázku, snížila i hodnota rozdílové frekvence na výstupu $f_{\text{Beat}'}$. Samozřejmě je možné ponechat maximální hodnoty f_{dev1} a f_{dev2} na vyšší úrovni a korigovat tento rozdíl i kmitočtově. Vzhledem k tomu ale, že parametr, jenž bude nastavovaný uživatelem jsou maximální hodnoty f_{dev1} a f_{dev2} (hloubky modulací), protože souvisí s rozlišitelností dvou vedle sebe jedoucích vozidel bude potřeba zjistit maximální a minimální použitelný kmitočet a potom z tohoto intervalu vybrat už konečnou reálnou frekvenci našeho modulačního signálu a tím zároveň zajistit správnou funkci radaru K-MC4. Níže uvedené vztahy pro hranice těchto frekvencí jsou odvozeny z rovnic uvedených v teorii **1.5** a **1.6**.

$$f_{\text{CPI_max}} = \frac{\left(f_{\text{BeatMax}} - \frac{2}{\lambda} \cdot v_{\text{max}}\right) \cdot c}{4 \cdot f_{\text{dev1}} \cdot d_{\text{max}}} \quad 3.1$$

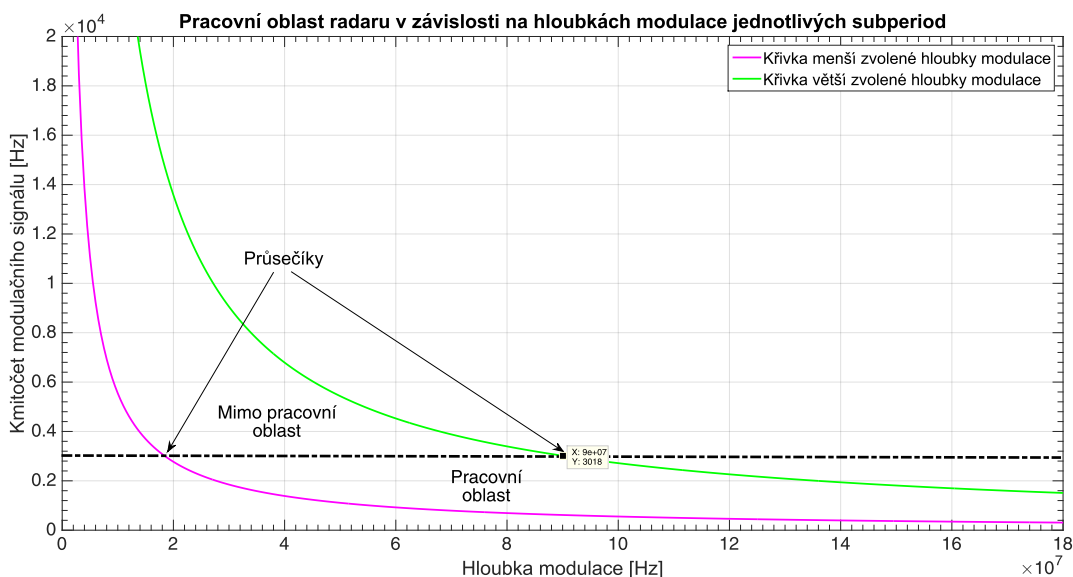
$$f_{\text{CPI_min}} = \frac{\left(f_{\text{BeatMin}} + \frac{2}{\lambda} \cdot v_{\text{max}}\right) \cdot c}{4 \cdot f_{\text{dev2}} \cdot d_{\text{pruh1}}} \quad 3.2$$

Kde: f_{CPI_max} [Hz] je maximálně možný nastavitelný kmitočet modulačního signálu, f_{CPI_min} [Hz] je minimální nastavitelný kmitočet modulačního signálu, $f_{BeatMax}$ [Hz] je maximální rozdílová frekvence na výstupu dle výrobce, $f_{BeatMin}$ [Hz] je minimální rozdílová frekvence na výstupu dle výrobce, λ [m] je vlnová délka nosné vlny, v_{max} [m/s] je maximální uvažovaná měřitelná rychlost, f_{dev1} [Hz] je větší nastavená hloubka modulační subperiody, f_{dev2} [Hz] je menší hloubka modulační subperiody, d_{max} [m] je maximální detekovatelná vzdálenost 80 m, d_{pruh1} [m] je minimální detekovatelná vzdálenost závislá na umístění radaru u vozovky (pokrytí 1. pruhu), c [m/s] má význam rychlosti světla.

Přičemž pro výpočet dolní hranice se musí použít vždy menší hloubka modulační subperiody a pro horní hranici vždy větší hloubka modulační subperiody, protože s tím přímo souvisí rozdílový kmitočet na výstupu (viz. **Obrázek 3.20**). Větší hloubce odpovídá větší rozdíl a menší hloubce rozdíl menší.

3.4.1 Pracovní oblast radaru

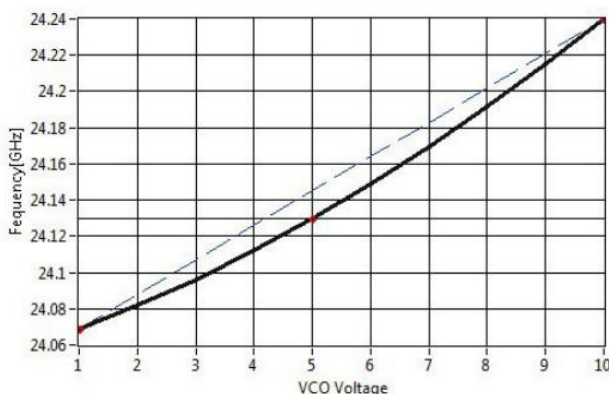
Z výše uvedených závislostí mezi jednotlivými parametry modulačního signálu je zřejmé, že volba kmitočtu f_{CPI} z vypočítaného intervalu je stejně jako i meze tohoto intervalu závislá na zvolených modulačních hloubkách v jednotlivých subperiodách. **Obrázek 3.21** níže demonstruje princip graficky pro jeden konkrétní příklad větší zvolené hloubky 90 MHz (pohyb po zelené křivce). Je tedy jasné, že druhá hloubka může být do určité míry menší nebo rovna (detekce 1 vozu) (pohyb po fialové křivce) což ihned automaticky ukazuje mezní šrafovaná křivka. Pokud by byla větší jako 90 MHz body na křivkách se prohodí. První dvě možnosti platí pouze v pracovní oblasti což je plocha mezi oběma křivkami dole v intervalu mezi body kde šrafovaná mezní přímka protíná obě barevné křivky. Pokud bychom zvolili tuto hloubku příliš nízkou (zde konkrétně přibližně 50 MHz, dostali bychom se mimo pracovní oblast vlivem situace $f_{CPI_MIN} > f_{CPI_MAX}$ a nebyla by zaručena spolehlivá detekce i výše zmíněných extrémních případů. Průsečíky zelené a fialové křivky vypovídají o maximálním povoleném rozdílu hloubek modulačních subperiod.



Obrázek 3.21 - Pracovní oblast radaru v závislosti na zvolených modulačních hloubkách

3.4.2 Přepočít modulačního signálu

Jak už bylo výše popsáno a jak je i zároveň patrné z **Obrázek 3.20**, modulační signál lze vyjádřit jako změnu vysílané frekvence v čase nebo ekvivalentně jako změnu napětí v čase, kterou řídíme VCO. Na základě **Obrázek 3.22** je plnou čarou zachycen reálný průběh vysílané frekvence v plném rozsahu 1 V až 10 V, který je mírně nelineární s určitou odchylkou v maximu při 5 V přivedených na vstup VCO. Pro zjednodušení tedy byla uvažována při odvození přepočítací rovnice 3.3 křivka přerušovaná, která je idealizovaná.



Obrázek 3.22 - Vzájemný vztah mezi frekvenčním a napětíovým vyjádřením modulačního signálu

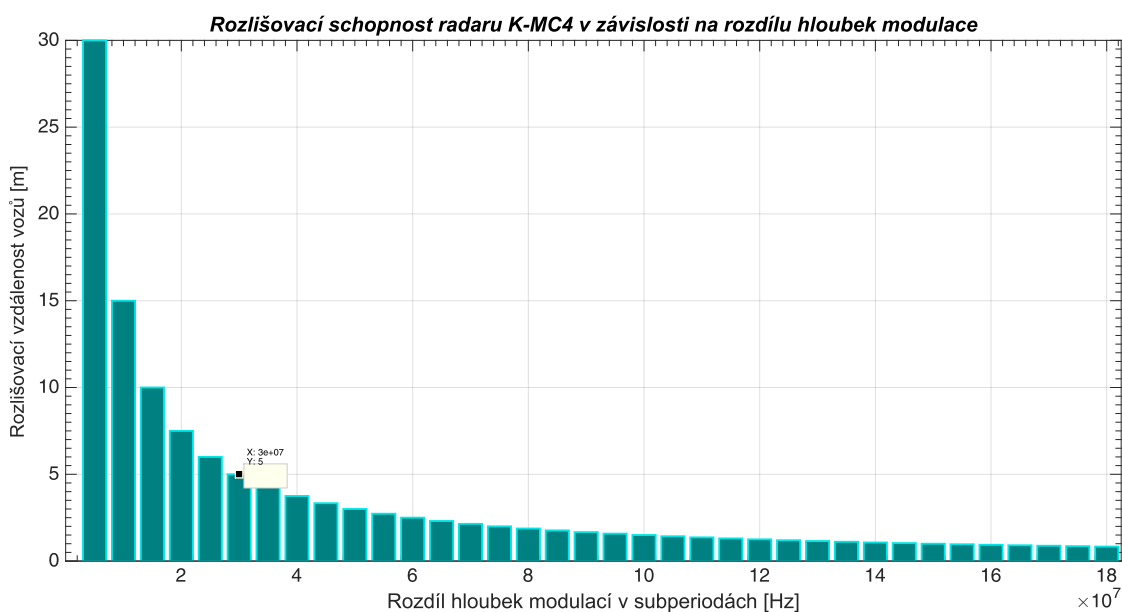
$$U_{VCO} = 9 \cdot \frac{f_{out} - 24.05 \cdot 10^9}{0.18 \cdot 10^9} \quad [V] \quad 3.3$$

Kde: U_{VCO} [V] je okamžitá hodnota napětí na vstupu oscilátoru, f_{out} [Hz] nosná frekvence a ostatní jsou konstanty vycházející z procesu odvození.

3.4.3 Rozlišitelnost vozů

Rozlišitelnost vozů je faktor, který je plně závislý na rozdílu zvolených hloubek modulací v jednotlivých subperiodách. Logické je, že čím bude tento rozdíl větší tím bude rozlišitelnost lepší. To ovšem tak úplně neplatí, pokud vezmeme v úvahu podkapitole 3.4.1 a v ní vysvětlenou pracovní oblast radaru. Při návrhu umístění radaru v podkapitole 2.3 jsme uvažovali šířku čtyřproudové vozovky 15 m dle [14], to znamená 3,75 m široký pruh.

Každý automobil je jinak široký, ale pokud vezmeme v úvahu například „jedničkou“ škodu Fabia, která je uvažována v simulačním softwaru níže, a která je široká dle výrobce 1,646 m zjistíme, že pokud vedle sebe pojedou dvě tyto vozidla. Každé z nich uprostřed svého pruhu, budou vedle sebe vzdáleny při dané šířce pruhu 3,75 m o 2,1 m. Při této znalosti už je potom možné z **Obrázek 3.23** vyčíst, že minimální rozdíl hloubek modulací musí být alespoň 75 MHz. Také je dále logické, že rozdíl nemůže nabývat hodnoty 180 MHz (z jednoho objektu bychom získali dva) ale může nabývat hodnoty 0 MHz čímž dle teorie bychom rozlišili obě vozidla tzv. „v nekonečnu“.

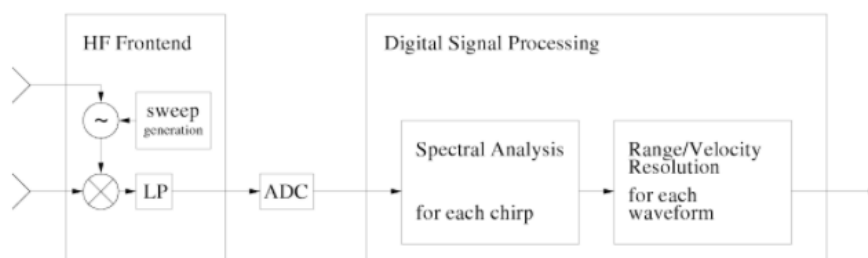


Obrázek 3.23 - Rozlišitelnost vedle sebe jedoucích vozů pro dané rozdíly hloubek modulací

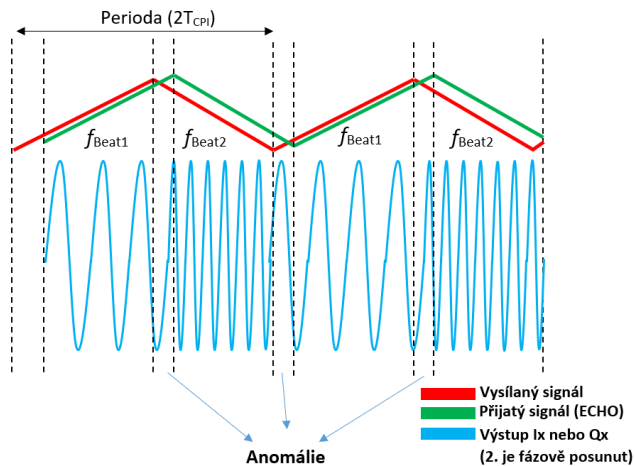
3.5 Zpracování signálů

Po konkrétním návrhu modulačního signálu, kterým bude řízen interní napětím řízený oscilátor je tedy zajištěn aktivní pracovní režim radaru pro příjem odražených signálů, které jsou nosiči námi požadovaných informací, kterými jsou rychlost a vzdálenost daného vozu. Dalším nezbytným krokem je potom tato data optimálně zpracovávat a výše zmíněné informace z nich extrahovat a převést do podoby lidského chápání. Abychom toho dosáhli je potřeba k tomuto účelu použít vhodný algoritmus signálového zpracování v podobě spektrální analýzy.

Na **Obrázek 3.25** níže je pro názornost modře uvedena struktura obecného signálu na jednom z výstupů Ix/Qx našeho radaru při detekci 1 vozu. Je zřejmé, že při detekci jednoho vozidla bude pro analýzu potřeba minimálně úsek signálu trvající jednu periodu signálu v případě, že obě zvolené hloubky modulací v jednotlivých subperiodách budou stejné což na **Obrázek 3.25** platí (subperioda se neuvažuje). Předpokladem je řízení signálem s rozdílnými hloubkami modulace v jednotlivých subperiodách, aby byl radar připraven na situaci měření dvou vozidel. V takové situaci bude signál na 1 z výstupů Ix/Qx radaru (opět pro 1 vůz) vypadat jako na **Obrázek 3.26** (modře). Obecný blok ukazující princip zpracování je na **Obrázek 3.24**.

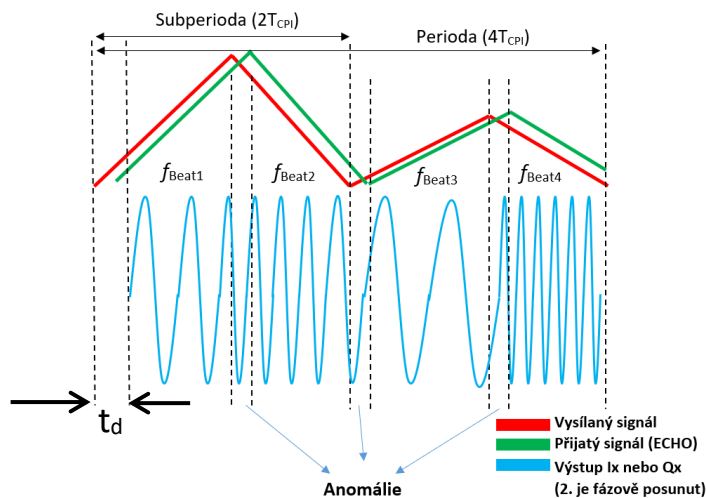


Obrázek 3.24 - Blokové schéma zpracování výstupních signálů Ix/Qx (převzato z [10])

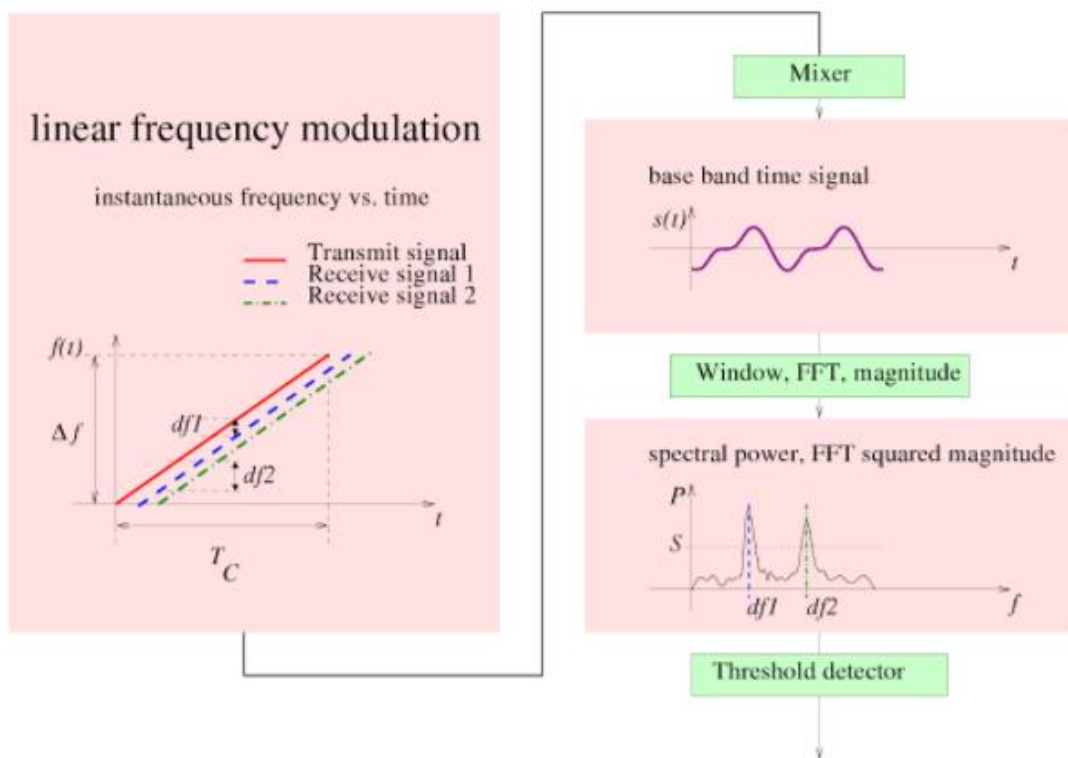


Obrázek 3.25 - Výstupní signál Ix nebo Qx při detekci 1 vozu a stejných hloubkách modulace

Stejně tvrzení o délce signálu platí paradoxně i v případě nerovnosti obou hloubek, ovšem pokud budeme chtít detekovat dva vozy a rozlišit je, budeme potřebovat úsek signálu trvající minimálně dvě subperiody modulačního signálu (tedy jednu jeho periodu, která je časově ekvivalentní při zachování kmitočtu s dvěma periodami signálu v případě rovnosti hloubek modulací). Pro tuto situaci budeme na výstupech Ix/Qx dostávat součet obou signálů, v němž budou po dobu trvání T_{CPI} dominovat rozdílové „beat frekvence“ od obou vozů. Celkem tak získáme osm těchto frekvencí ve spektru. Blokové schéma, které ukazuje princip podrobně pro náběžnou hranu modulačního signálu je ukázán na **Obrázek 3.27**. Na obrázku je také vidět, že pokud získáme na výstupu spodní hranici 15 Hz nemuseli bychom pro analýzu získat ani jednu periodu trvání signálu po segmentaci oknem, když vezmeme do úvahy, že kmitočet modulačního signálu je řádově větší a tím pádem musí platit, aby frekvence v segmentu měla hodnotu minimálně $1/(T_{CPImin} - t_{dmin})$, kde t_{dmin} je zpoždění přijatého signálu z minimální vzdálenosti T_{CPImin} doba náběžné/sestupné hrany při maximální frekvenci modulačního signálu. V simulaci se přepočítává minimální frekvence na výstupu pro dané měření a možnost zvolení horní frekvenční hranice modulačního signálu (nejkratší úsek trvání náběžné hrany modulačního signálu/největší minimální frekvence na výstupu).



Obrázek 3.26 - Výstupní signál Ix nebo Qx při detekci 1 vozu a odlišných hloubkách modulace



Obrázek 3.27 - Proces signálového zpracování využitý při tvorbě softwaru (převzato z [10])

Celý proces analýzy časového průběhu začíná vzorkováním, tj. převodem z jeho analogové (spojité) formy do číslicové. Při tvorbě simulačního softwaru byla zvolena frekvence 1 MHz s ohledem na splnění vzorkovacího teorému. Tento teorém říká, že pro jednoznačné získání číslicového obrazu signálu z analogové formy potřebujeme, aby vzorkovací frekvence byla minimálně dvojnásobná, než je maximální uvažovaná užitečná frekvence nesoucí informaci.

Vzhledem k tomu, že maximální frekvence na výstupu je 300 kHz jak bylo uvedeno, je 1 MHz pro virtuální simulování dostačující. Samozřejmě návrh počítá s využitím maximálního rozsahu výstupních frekvencí, ale je možné tento interval zmenšit za cenu horší rozlišitelnosti, protože celý rozsah rychlostí a vzdáleností a jejich kombinací se bude muset „vměstnat“ do menšího pásma. Při experimentálním měření bude vzorkovací proces řešen použitím digitálního osciloskopu a pro konečný návrh musí už být navržen vhodný vzorkovací obvod.

Dalším krokem je poté aplikace vhodného okna, čímž ze signálu získáme určitou jeho část (určitý počet navazujících vzorků) na něhož poté bude aplikována tzv. rychlá Fourierova transformace FFT (z angl. *Fast Fourier Transform*). Pro jednoduchost bylo v simulaci zvoleno okno obdélníkové. Také je vhodné provést tzv. *zero-padding* (doplnění vybraného úseku nulami za účelem lepší vizualizace špičky ve spektru a lepší odečtení rozdílových frekvencí nikoliv však zlepšení frekvenčního rozlišení).

U prakticky získaných spekter postižených šumem a parazitními rušivými složkami je potřeba experimentovat. Důvodem je situace kdy, pokud detekujeme dva objekty jejichž spektrální čáry se co do amplitudy liší, ale frekvenčně jsou si blízké, tak by mohlo dojít k tomu, že silnější signál překryje svým ne příliš dobrým frekvenčním rozlišením ten s nižší úrovní. Volba vhodného okna je tak na uživateli a prováděném experimentu a výsledcích, podle toho potom lze zvolit optimální okno. Srovnání parametrů jednotlivých oken je na **Obrázek 3.28**.

Window	Peak to side lobe level/dB	3dB bandwidth/bin	6dB bandwidth/bin
Rectangular	-13	0.89	1.21
Hanning	-31	1.44	2.00
Hamming	-41	1.31	1.82
Blackman	-57	1.65	2.30

Obrázek 3.28 - Parametry vybraných oken pro výběr části signálu (převzato z [10])

V bodě kdy máme k dispozici spektrum, je potřeba vhodně nastavit tzv. detekční úroveň nebo práh. Tento práh souvisí se správnou detekcí objektu. Lze si například představit, že před radarem proletí pták. Jelikož efektivní odrazná plocha RCS takového ptáka je mnohem menší, než RCS automobilu projeví se detekce ptáka ve spektru menší úrovní amplitudy.

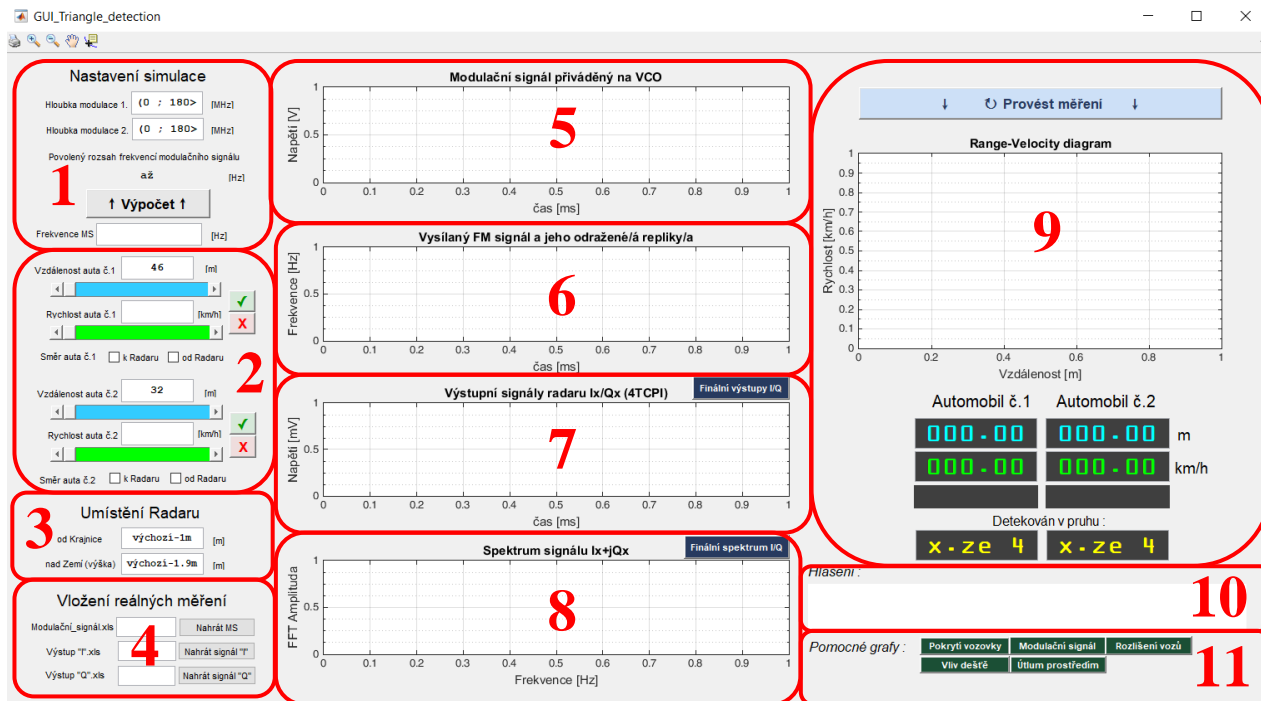
Při volbě detekčního prahu je tedy potřeba hledat kompromis, protože pokud bude práh příliš malý, bude často docházet k falešné detekci naopak pokud bude úroveň příliš vysoká bude detekovaných objektů méně, ale nemusí být detekována ani velikostně menší vozidla co do RCS. Při volbě se tedy vychází z křivek pravděpodobnosti a Gaussovského rozložení hustoty pravděpodobnosti, kde se bere určitý interval úrovní amplitudy ve spektru s největší pravděpodobností příslušejícímu vozidlu.

Jelikož jsou ale výstupní signály celkem 2 (1 kanál) I_x/Q_x a jsou vždy fázově posunuté v závislosti na směru pohybu právě detekovaného vozu o $+90^\circ$ respektive -90° , a tento jev směru se projevuje i na Dopplerově frekvenci, bylo při návrhu využito spojení těchto dvou vektorů I_x/Q_x do jednoho komplexního vektoru $I_x + jQ_x$. Počítačové zpracování je potom snadnější, protože fázový posuv se projeví ve spektru pozicí hlavní spektrální čáry v kladných frekvencích při pohybu k radaru a v záporných při pohybu od radaru, respektive směrem otáčení spirály na **Obrázek 3.4** ve spojitém CW režimu.

3.6 Grafické uživatelské rozhraní (GUI) – MATLAB

Grafické uživatelské rozhraní bylo navrženo z důvodu snadnější obsluhy, větší komplexnosti a zisku teoretických výsledků pro jednotlivé situace, které na vozovce mohou nastat. Program uvažuje onen vybraný trojúhelníkový signál a shrnuje do jednoho celku veškeré dříve popsané a zjištěné skutečnosti. Program poskytuje možnost volby detekce jednoho nebo dvou vozidel pro všechny kombinace směrů maximální detekovatelnou rychlost 230 km/h a maximální detekovatelnou vzdálenost 80 m při pokrytí čtyřproudové vozovky, které je závislé na umístění radaru u vozovky co do výšky i dálky od krajnice, které je také bráno v úvahu. Program má interně vloženy dvě vozidla z důvodu značné nejen časové náročnosti návrhu pro 4 vozidla. Detekci dalších dvou vozidel je však možné nakonfigurovat a přidat, a vycházet při tom z tohoto pevného základu. Hlavním cílem bylo vytvořit dobře pracující program a dát tak základ pro další eventuální vylepšování. Program pracuje s jako výchozím vozem Škoda Fabia I, kde počítá zejména s jeho rozměry pro výpočet splnění podmínky nastavení, aby bylo možné auta rozlišit i pokud budou jedoucí vedle sebe. Program byl navrhován i s důrazem na „blbu-vzdornost“, takže upozorňuje uživatele, na chybnou manipulaci.

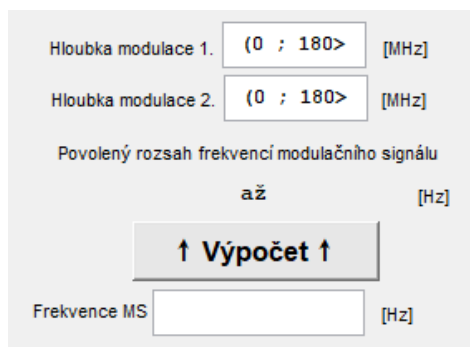
Obrázek 3.29 zobrazuje pracovní okno při spuštění programu a dělí ho do jednotlivých bloků (značeno červeně) ve kterých probíhají dílčí operace celého procesu. Pod tímto obrázkem jsou podle čísel v blocích vysvětleny funkce jednotlivých bloků a práce s nimi.



Obrázek 3.29 - Výchozí stav programu pro zadávání parametrů simulované situace

1. Parametrizace modulačního signálu



Tento blok slouží k nastavení parametrů modulačního signálu a výpočtu frekvenčního pásma, ze kterého je potom možno volit kmitočet modulačního signálu, a to tak aby nedošlo k opuštění pracovní oblasti radaru. Program kontroluje, zda nebyly překročeny meze nebo nebyl zadán parametr odporující vlastnostem K-MC4. Současně také upozorní na nemožnost rozlišit dva automobily při stejných hloubkách modulační. Ovšem uživatel si tuto skutečnost může sám simulovat a přesvědčit se.

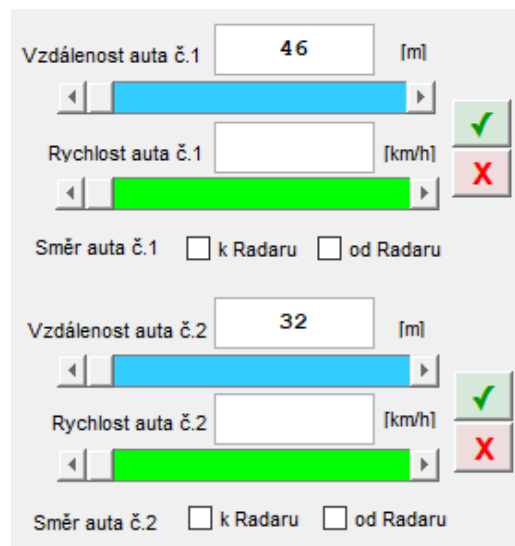


Obrázek 3.30 - Detail bloku č.1

S tímto blokem souvisí grafický blok č.5 a č.6 kde postupně v bloku 5 je zobrazen signál po přepočtu do napěťové oblasti pro VCO (blok pro výběr generátoru, který je schopen daný signál generovat) a v 6. bloku je tento signál už chápán jako vysílaná frekvence v čase.

2. Nastavení měřené situace na vozovce

V tomto bloku má uživatel možnost namodelovat si celou eventuálně reálně měřenou situaci. K dispozici jsou celkem dva automobily, jak už bylo řečeno výše. Lze kombinovat veškeré povolené vzdálenosti, rychlosti a směry pohybu, a to včetně situací kdy jsou vozidla změřena vedle sebe. Vzhledem k tomu ale, že náhodná veličina se kterou program pracuje je generování jízdního pruhu pro oba automobily jsou už při spuštění programu vypočítány minimální detekovatelné meze (vzdálenosti) pro oba vozy při výchozím umístění radaru od krajnice 1 m a výšce 1,9 m, což jsou hodnoty, jenž odpovídají pokrytí na **Obrázek 2.13**. Pokud si uživatel přeje změnit nastavení situace tlačítkem  zruší příslušné vozidlo/vozidla, nastaví nové parametry a potvrdí tlačítkem  vozy, které si přeje v následné simulaci uvažovat.



Vzdálenost auta č.1 46 [m]
Rychlost auta č.1 [km/h]
Směr auta č.1 k Radaru od Radaru

Vzdálenost auta č.2 32 [m]
Rychlost auta č.2 [km/h]
Směr auta č.2 k Radaru od Radaru

Obrázek 3.31 - Detail bloku č.2

V momentě, kdy uživatel potvrdí nastavené vlastnosti vozů zobrazí se výstupní signály Ix/Qx radaru K-MC4 v grafickém bloku č.7 v časové oblasti, a stejně tak se vypočítá a zobrazí zároveň i spektrum tohoto signálu jakožto komplexního vektoru v podobě segmentů vybraných pomocí obdélníkového okna z výstupního signálu během jednotlivých náběžných/sestupných hran modulačního signálu viz. 3.5. Co se týká tlačítek pro výpočet „finálního“ spektra nebo výstupu Ix/Qx tak dochází k součtu signálů v časové oblasti od obou vozů a z tohoto signálu lze potom vizualizovat i výsledné spektrum.

3. Nastavení pozice radaru u vozovky

Tato část je určena k nastavení pozice radaru u vozovky. Bere se v úvahu jak umístění od krajnice vozovky, tak výška nad povrchem země, ve které radar bude pracovat. Výchozí hodnoty jsou zvoleny tak jak je vidět z důvodu uvedeného v popisu bloku č.2.



Umístění Radaru

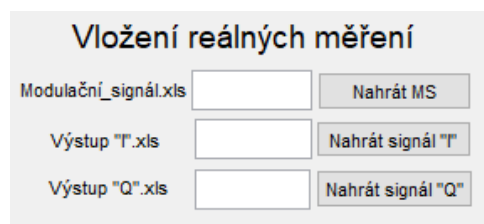
od Krajnice výchozí-1m [m]
nad Zemí (výška) výchozí-1.9m [m]

Obrázek 3.32 - Detail bloku č.3

Při změně a kombinování těchto vzdáleností se kontroluje vždy zda automobil nacházející se v bližším jízdním pruhu nebude přehlédnut vlivem vysokého umístění nebo naopak při změně umístění od krajnice, se přepočítávají meze, kdy jsou jednotlivé pruhy detekovány s čímž potom zpětně zase souvisí maximální umístění radaru nad zemí. Na základě těchto výpočtů jsou potom nabídnuty možné minimální vzdálenosti automobilu/ů, které může uživatel zvolit v bloku č.2 tak aby je radar opravdu detekoval.

4. Vložení reálných signálů

Blok č.4 slouží k vkládání naměřených signálů v terénu v podobě souboru .xls. Uživatel pouze zadá pro úspěšné nahrání název xls souboru a tento krok potvrdí příslušným tlačítkem. Soubor se musí nacházet ve složce s „*m-file*“, kde je uložen program. Samozřejmě, že signály by měli být vzorkované tak, aby vkládaná data nebyla příliš objemná a výpočet netrval příliš dlouho. Vzhledem k tomu, ale že je vždy potřeba k analýze jen úsek signál při daném typu měření podle 3.5 neměl by s objemem dat být problém.



Obrázek 3.33 - Detail bloku č.4

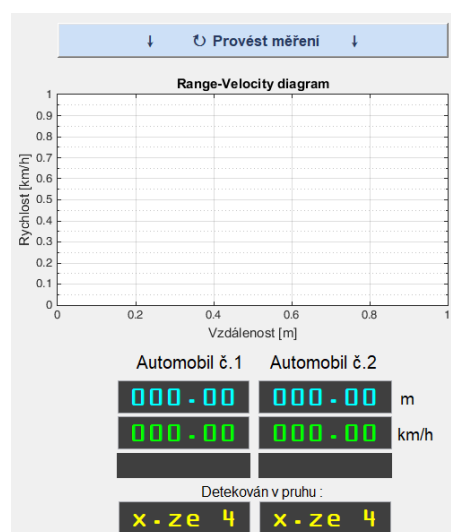
Navíc většina osciloskopu, z kterých by data byla pravděpodobně extrahována umožňují uživateli zvolit počet odebraných vzorků ve výsledku, tak i při vysoké vzorkovací frekvenci osciloskopu lze potom vybrat menší počet vzorků a tím zredukovat velikost souboru. Principem je, že souřadová složka I_x a kvadraturní složka Q_x se rozdělí na jednotlivé segmenty (viz. 3.5) a z těchto segmentů se vytvoří komplexní vektory, které se poté podrobí FFT čímž se získají rozdílové frekvence (kladné nebo záporné) obsahující informace námi požadované. Před samotným nahráním je třeba převést CSV soubor na .xls soubor.

5./ 6. / 7. / 8. Grafická interpretace signálu v časové a frekvenční oblasti

Bloky č.5, č.6, č.7 a č.8 znázorňují na základě dříve zadaných vstupních parametrů postupně řídicí signál pro VCO radaru v napěťové oblasti, jeho vyjádření jakožto vysílané frekvence radaru v čase a odražené repliky tohoto signálu časově zpožděné a eventuálně frekvenčně posunuté, signály na výstupech I_x/Q_x radaru v časové oblasti a spektrum tohoto časového průběhu jakožto komplexního vektoru. Pro názornost jsou v podkapitole 3.6.1 uvedeny příklady simulací pro pár typických zajímavých situací na vozovce, kde je vše viditelné.

9. Výstupní data získaná z přijatých signálů

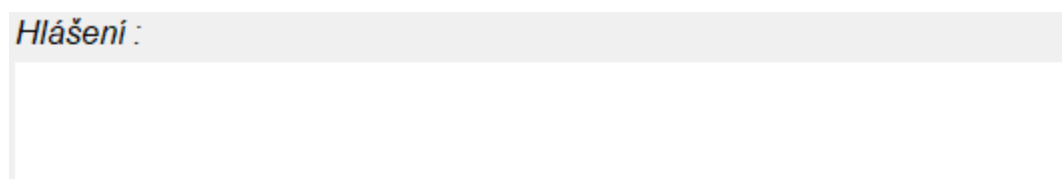
Blok č.9 je blokem měřicím, kde, pokud je všechno potřebné zadáno a jsou k dispozici všechny potřebné signály pro analýzu i samotné výsledky této analýzy tak po stisku tlačítka „*provést měření*“ se provede převod těchto informací do srozumitelné podoby jakožto Range-velocity diagramu, který lze chápat jako grafické řešení celkem čtyř soustav lineárních rovnic a dvou neznámých, i v podobě číselné na virtuálních displejích ve spodní části tohoto bloku. Modrými číslicemi je zobrazována vzdálenost daného vozu v metrech, zeleně pak jeho rychlost. Prázdný šedý blok pod tím je ukazatel směru pohybu, kterým změřené auto jelo a pod tím v blocích úplně dole je ukázán konkrétní pruh (tedy náhodná veličina)



Obrázek 3.34 - Detail bloku č.9

10. Výstražné okénko

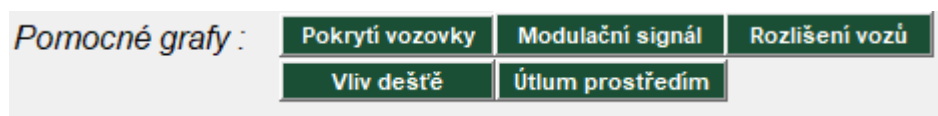
Výstražné okénko slouží k upozornění uživatele na chybnou manipulaci, a to jak v zadávání hodnot mimo dovolený interval, tak v zadávání nesmyslných vstupů v podobě například symbolů a písmen. Také slouží k upozornění, že lze měřit jen jeden vůz kvůli zadaným hloubkám modulací nebo například, že nebylo vypočítáno finální spektrum pro výslednou detekci obou vozů v bloku č.8. Zkratka navádí uživatele, jak dosáhnout vytouženého cíle.



Obrázek 3.35 - Detail bloku č.10

11. Pomocné grafické závislosti

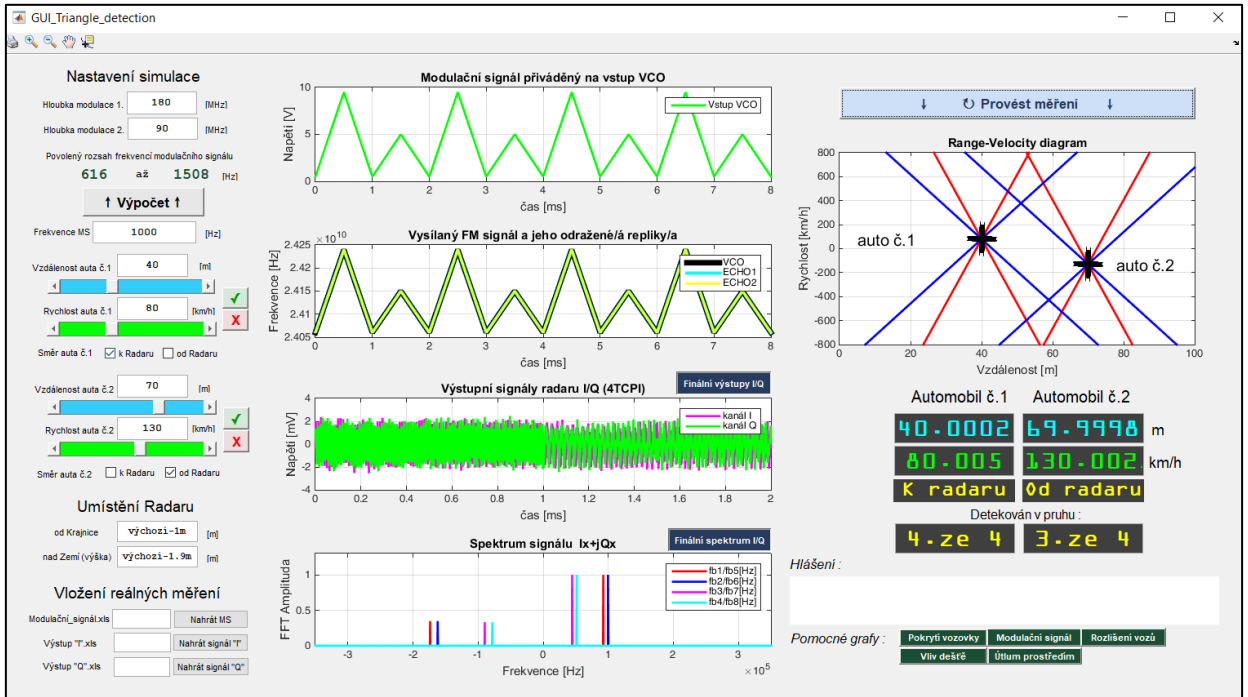
Tato část je určena k možnosti zobrazit graficky problematiku návrhu a usnadnit tak uživateli další postup. Jedná se grafické vyjádření pokrytí vozovky pro zadané umístění radaru v bloku č.3, pracovní oblasti radaru skryté pod tlačítkem „Modulační signál“, vlivu dešťových srážek různé intenzity na útlum signálu vlivem jeho šíření, útlumu vlivem ztrát volného prostoru a rozlišení jednotlivých vozidel v závislosti na rozdílu hloubek modulací



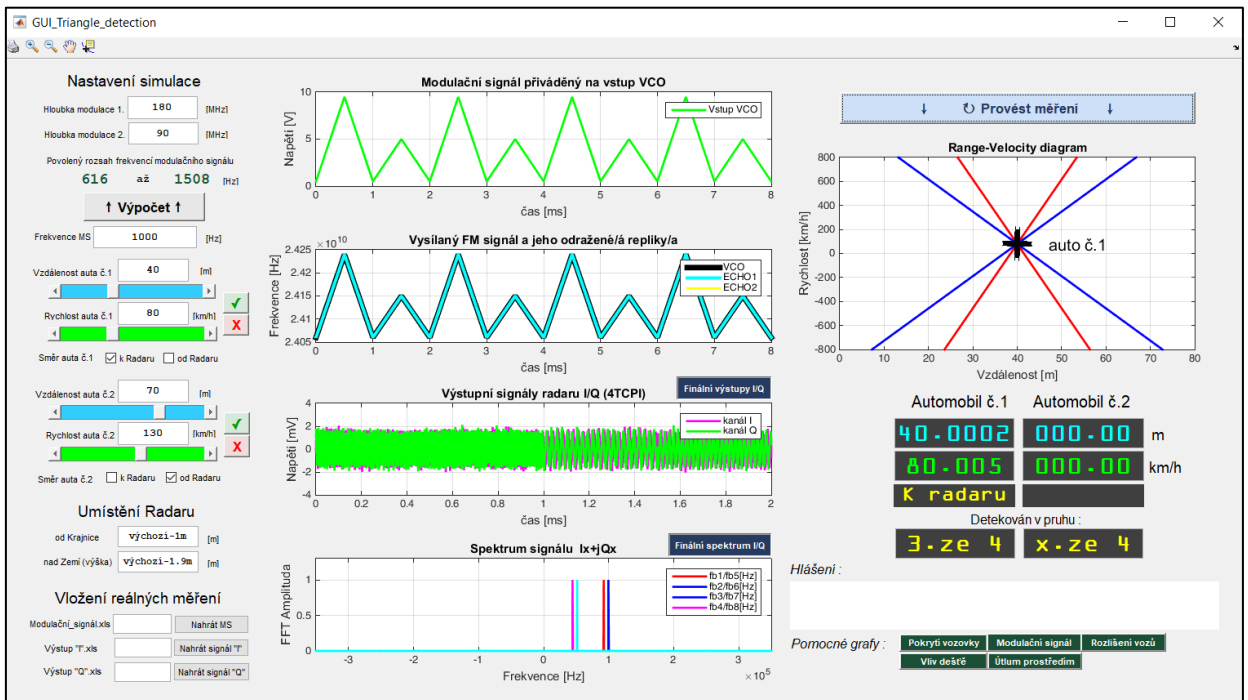
Obrázek 3.36 - Detail bloku č.11

3.6.1 Výsledky simulací

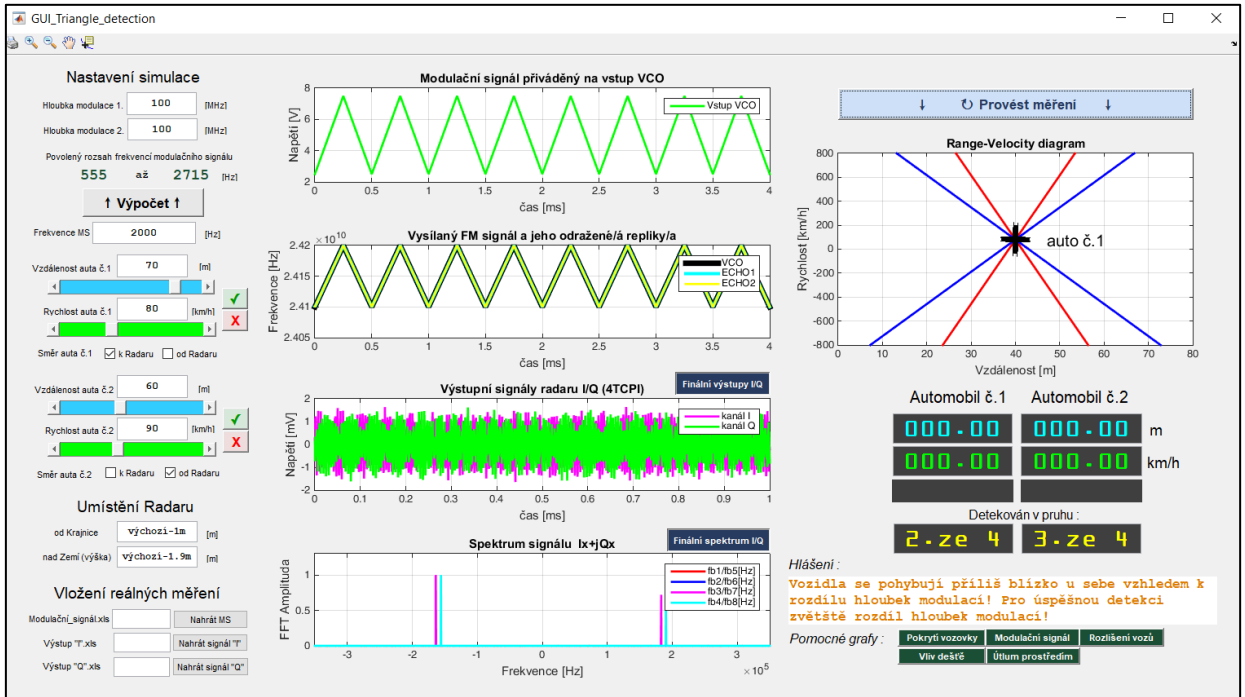
Na níže uvedených obrázcích jsou uvedeny některé simulované situace se zajímavým charakterem a jejich výsledky získané z programu popsaneho výše. V příloze je tento „Matlabovský“ program dostupný pod názvem *GUI_Triangle_detection.m*. Ve složce s tímto skriptem je další skript *InterX.m*, který je funkcí volně dostupnou na serveru *mathworks.com* za účelem získávání numerických hodnot z Range-velocity diagramu. Jinými slovy převod grafického řešení na řešení numerické. Do této složky je také potřeba jak už bylo výše zmíněno nahrát jednotlivé .xls soubory obsahující jednotlivé číselné vektory reprezentující daný signál, se kterým bude potom chtít uživatel pracovat.



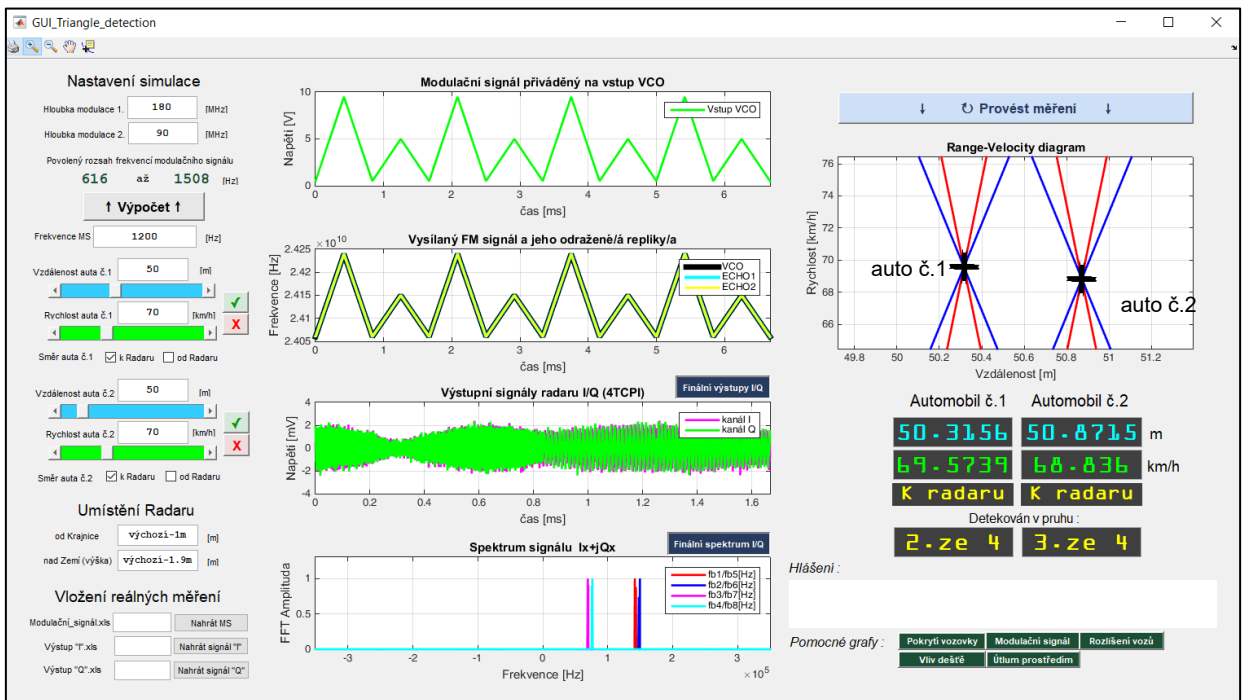
Obrázek 3.37 - Ukázka simulace 2 detekovaných vozů



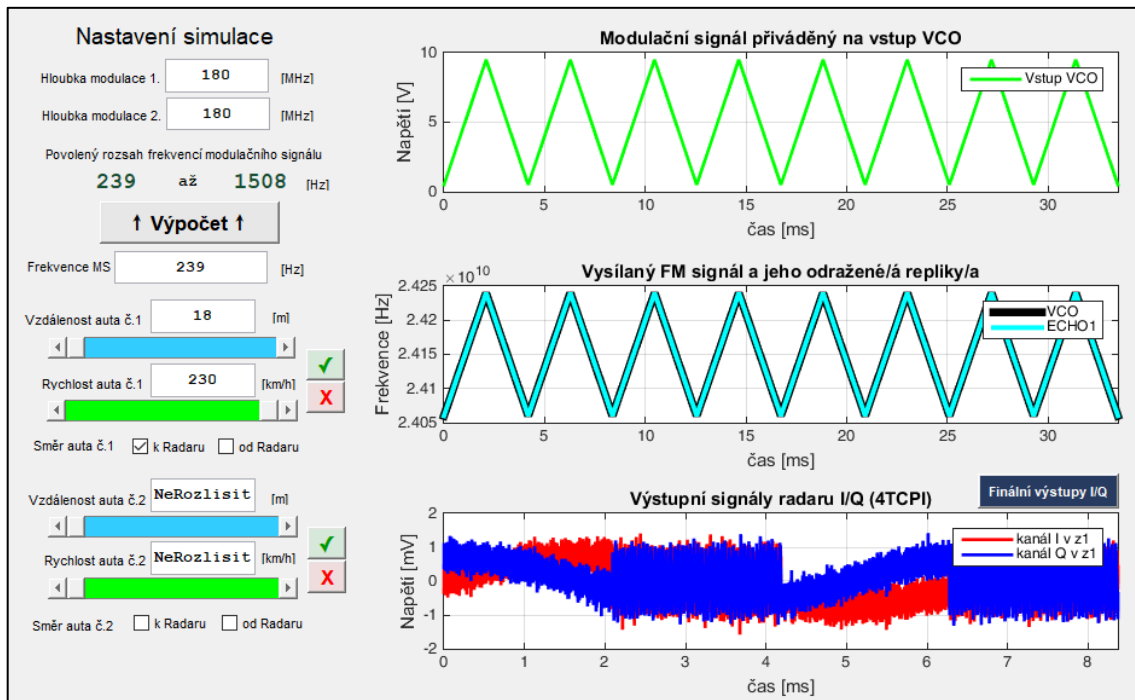
Obrázek 3.38 - Ukázka simulace 1 detekovaného vozu při stejných parametrech



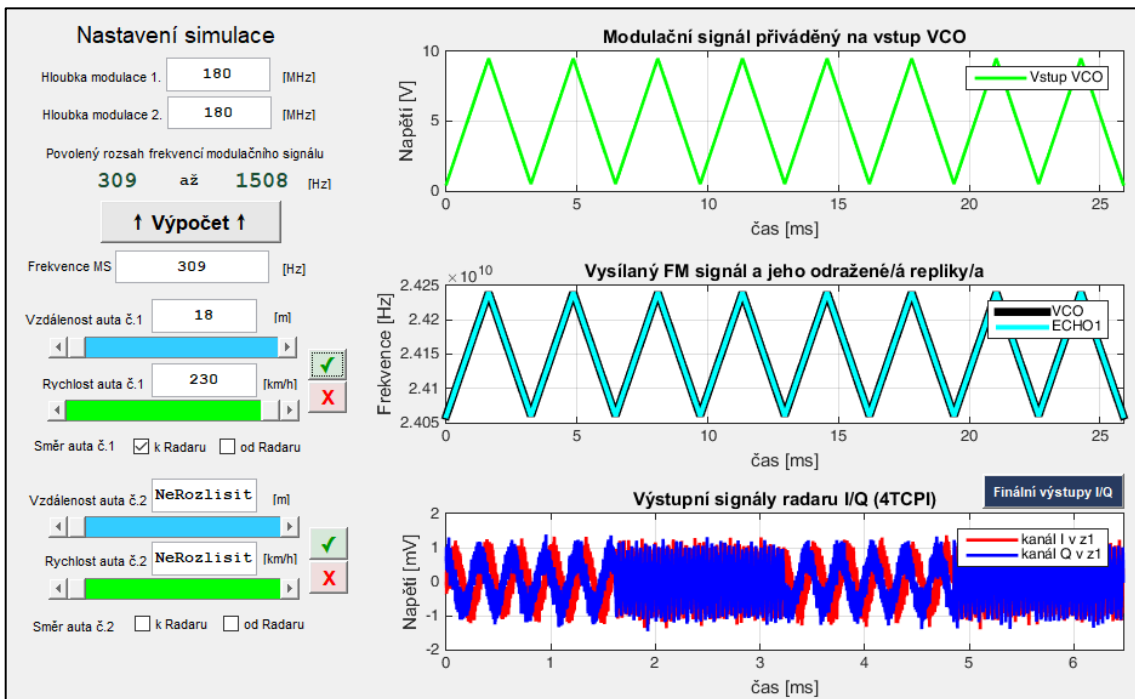
Obrázek 3.39 - Pokus o detekci dvou vozidel při špatném nastavení modulačního signálu



Obrázek 3.40 - Ukázka detekce po uposlechnutí upozornění, a navíc dvou vozidel jedoucích vedle sebe stejnou rychlostí i směrem



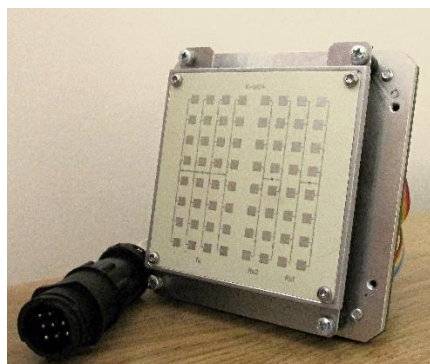
Obrázek 3.41 - Ukázka nesprávného nastavení dolní hranice výstupní frekvence a efekt příliš dlouhé periody na segment pro signálové zpracování (Simulace extrému, kdy vozidlo jede maximální rychlostí směrem k radaru v minimální detekovatelné vzdálenosti)



Obrázek 3.42 - Oprava na Obrázek 3.41 ilustrovaného efektu dle vzorce $1/(T_{CP\min} - t_{d\min})$ uvedeného v podkapitole 3.5 (Stejný simulovaný případ jako na Obrázek 3.41)

4 REÁLNÉ MĚŘENÍ

Tato kapitola popisuje praktické pokusy provedené za účelem ověření teoretických poznatků. K těmto měřicím účelům bylo použito originální komerčně prodávané vybrané čidlo K-MC4, které bylo zapůjčeno firmou RAMET a.s. Kunovice ve spolupráci s kterou je tato bakalářská práce vedena. Čidlo je ilustrováno na **Obrázek 4.1 a)**. Reálné měření a pokusy se skládaly celkem ze tří základních pilířů. Jako první bylo potřeba čidlo vůbec oživit a ověřit jeho funkčnost co nejjednodušším způsobem. Tímto se zabývá podkapitola 4.1. Dále potom byl proveden složitější experiment pomocí koutového odražeče (viz. kapitola 4.2). V neposlední řadě bylo provedeno měření i v RAMETu (viz 4.3). Pro měření popisované v 4.1 a 4.2 byly použity měřicí přístroje ilustrované na **Obrázek 4.1 b)**. Veškerá osciloskopem zaznamenaná data byla v osciloskopu vhodně upravena, případně byla provedena interní FFT a výsledky byly extrahovány na flashdisk ve formátu CSV pro další případné zpracování i jako obrázky PNG. Pokud bude potřeba signál dále zpracovávat je potřeba před nahráním do GUI konvertovat soubor z CSV na xls, aby došlo k jednoznačnému rozdělení řádků a sloupců v souboru.



a)



b)

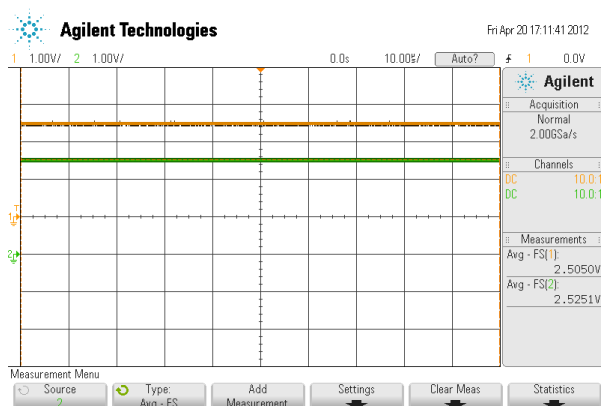
Obrázek 4.1 - Zapůjčené rychlostní čidlo K-MC4 a) Digitální osciloskop MSO-X 3012A od firmy Agilent (vlevo) a Laboratorní zdroj AUL 201 (vpravo) b)

4.1 Oživení radaru

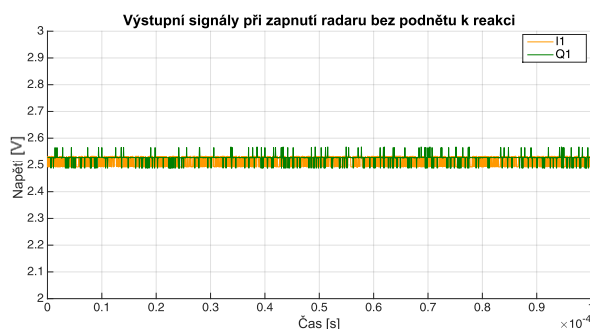
Před samotnými smysluplnými experimenty bylo čidlo úspěšně oživeno. Celé oživení radaru spočívalo ve správném zapojení jeho výstupů. Na základě informací, které k tomuto výrobku přikládá výrobce bylo stabilizovaným laboratorním zdrojem uvedeným výše přivedeno napětí +5 V na napájecí vstup. Dále bylo potřeba čidlo aktivovat, a zamezit tak neustálému zapínání a vypínání vlivem úsporného režimu při experimentování. Tato trvalá aktivace proběhla připojením povolovacího vstupu „enable“ na definovanou úroveň 0 V.

Na vstup VCO bylo přivedeno též napětí +5 V z laboratorního zdroje. Tomuto napětí odpovídala frekvence 24,13 GHz na základě **Obrázek 3.22**. Čidlo bylo tedy oživeno v režimu spojitým CW. Ovšem následně bylo provedeno i ověření funkce FMCW režimu připojením trojúhelníkového signálu na tento vstup. Ovšem výsledek byl při tomto jednoduchém oživení, které spočívalo v mávnutí ruky před radarem stejný a nenesl žádnou jinou smysluplnou informaci, než že čidlo je funkční. Testovány na funkčnost byly všechny čtyři výstupy I_1 , Q_1 , I_2 , Q_2 .

Ověření stejnosměrné úrovně na výstupech I_x/Q_x při zapnutí radaru, kterou výrobce garantuje mezi 2,2 V až 2,8 V při typické hodnotě 2,5 V ilustruje **Obrázek 4.2**, a to konkrétně pro výstupy I_1/Q_1 . Reakce těchto výstupů, při aktivní AC vazbě na osciloskopu, na mávnutí ruky před radarem je zachycena na **Obrázek 4.3**. Stejně tak je funkčnost znatelná i pro kanály I_2/Q_2 na **Obrázek 4.4** a **Obrázek 4.5**.

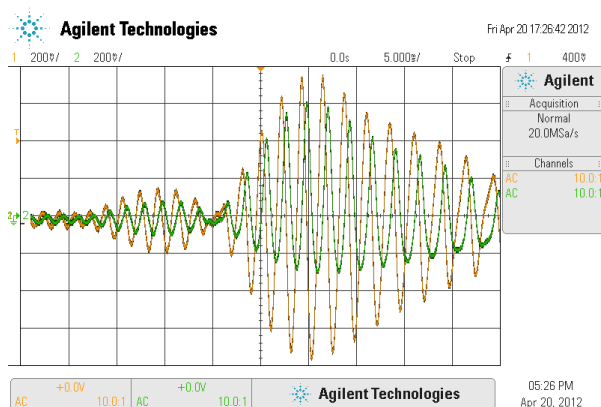


a)

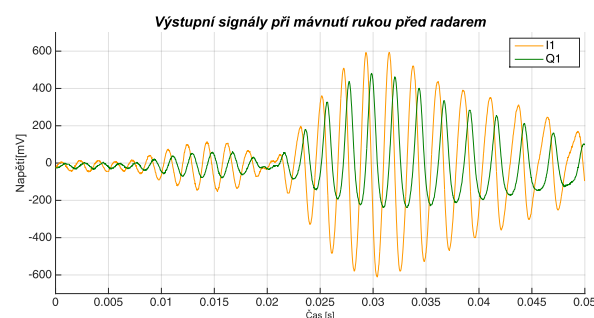


b)

Obrázek 4.2 - Ověření výstupní stejnosměrné složky na oscilogramu a) a totožný signál nahraný přes GUI do MATLABu z .xls souboru pro výstupy I_1/Q_1

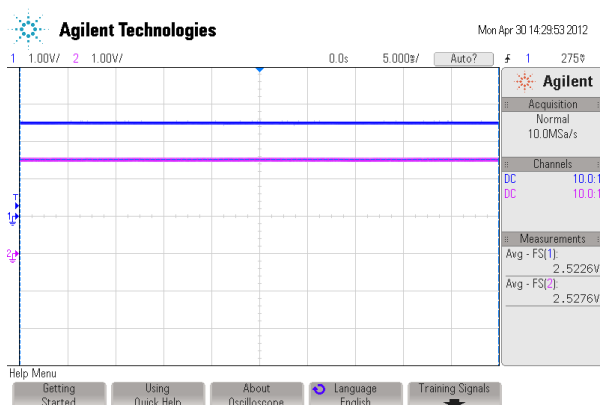


a)

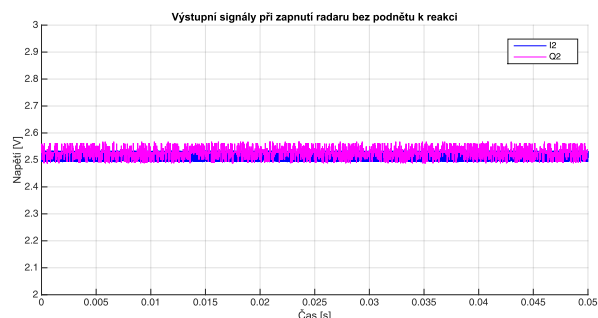


b)

Obrázek 4.3 - Ověření funkčnosti mávnutím ruky před radarem na oscilogramu a) a totožný signál nahraný přes GUI do MATLABu z .xls souboru pro výstupy I_1/Q_1

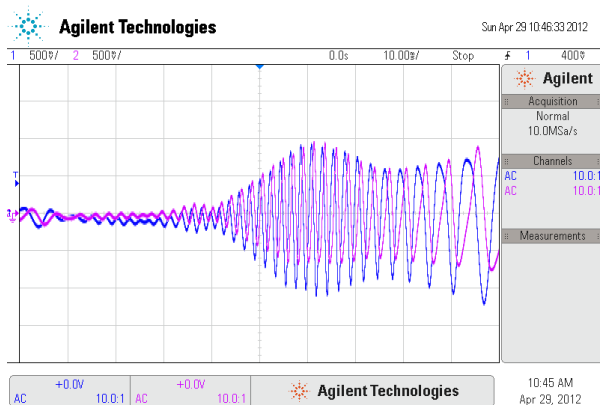


a)

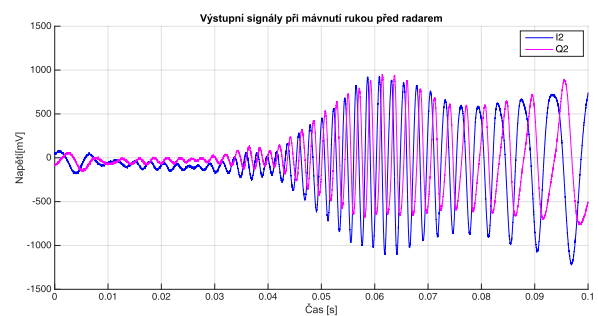


b)

Obrázek 4.4 - Ověření výstupní stejnosměrné složky na oscilogramu a) a totožný signál nahraný přes GUI do MATLABu z .xls souboru pro výstupy I_2/Q_2



a)



b)

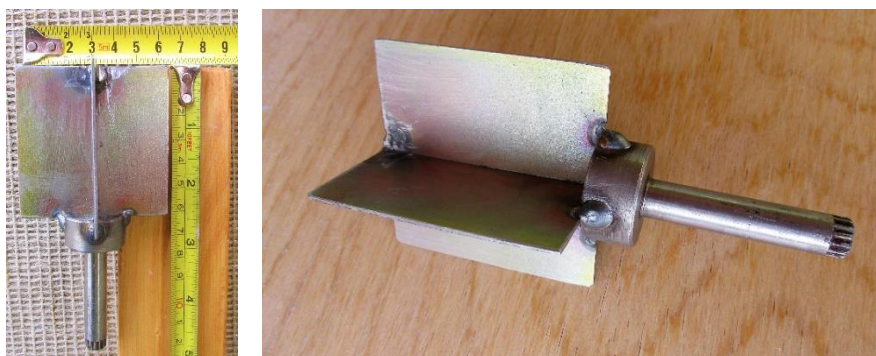
Obrázek 4.5 - Ověření funkčnosti mávnutím ruky před radarem na oscilogramu a) a totožný signál nahraný přes GUI do MATLABu z .xls souboru pro výstupy I_2/Q_2

4.2 Koutový odražeč simulující vozidlo

Po oživení rychlostního čidla by bylo bývalo vhodné provést nějaký složitější experiment ještě před tím, než přijde na řadu samotné měření ve firmě RAMET. Nakonec se přistoupilo k experimentu s koutovým odražečem vhodných rozměrů otáčejících se určitou obvodovou rychlostí, tedy určitým počtem otáček za jednotku času v prostoru hlavního vyzářovacího laloku před radarem. Vzhledem k tomu, že takový koutový odražeč požadovaných rozměrů není lehce k dostání musel být kromě návrhu i sestaven, a to včetně zdroje točivého momentu, kterým se nakonec stala elektrická vrtačka. V níže uvedených podkapitolách je popsán princip funkce, postup návrhu odražeče i ukázky z měření a naměřené výsledky včetně jejich shody s teorií.

4.2.1 Princip simulátoru

Pro představu je navržený a vyrobený koutový odražeč použitý při měření ilustrován na **Obrázek 4.6**. Celý princip spočívá v pohybu jednotlivých lopatek, vyrobených z vodivého materiálu. Pokud jsou tyto lopatky v pohybu a zároveň jsou ozařovány radarem, tak vlivem jejich vodivosti dochází k intenzivnímu odrazu dopadajícího záření pod úhlem, pod nimž dopadl na danou stěnu a při tomto procesu tak vzniká ve zpětně přijímaném signálu Dopplerův posuv, který je potom zachytitelný na výstupech radaru I/Q.



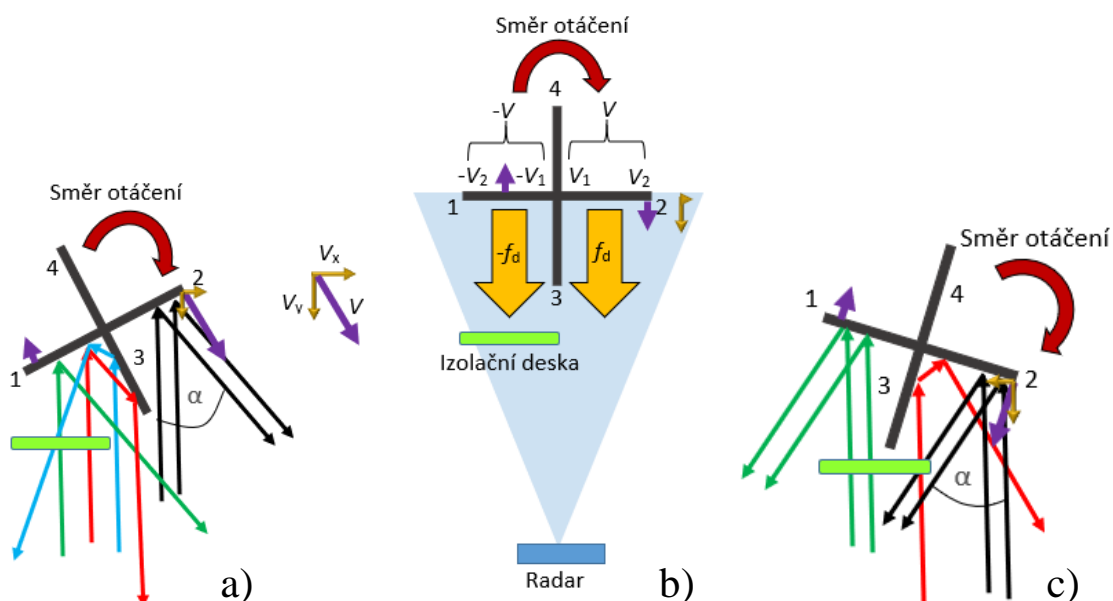
Obrázek 4.6 - Výsledná podoba navrženého koutového odražeče

Ovšem faktor v podobě točivého momentu zavádí do měření určitou nejistotu a chybu měření. Pro představu je princip ukázán na **Obrázek 4.7 a) b) c)**. Tyto obrázky ukazují princip ve třech krocích pootočení odražeče, přičemž důležitým momentem je moment, kdy jsou lopatky v pohybu a jsou kolmé k radaru. Na obrázku **a)** vlevo dochází k přibližování lopatky č.2 k radaru a lopatky č.1 od radaru. Při ozařování radarem dochází k odrazu od lopatky č.2 pod úhlem dopadu. Pokud se lopatka dále přibližuje úhel alfa se zmenšuje, protože úhel dopadu a tím pádem i odrazu se mění (černé paprsky). V určitý moment se tak dostanou do prostoru pokrytí přijímací anténou a jsou přijímány.

Co se týče rychlosti otáčení, je jasné, že obvodová rychlost není stejná blíže středu odražeče a na okraji lopatky. Tomu odpovídají různé Dopplerovy posuvy jednotlivých odrazů od lopatky v různých místech. Výsledkem je střední hodnota Dopplerova posuvu (tedy střední hodnota z celé lopatky), která je opravdu detekovatelná na výstupech I/Q. Pokud ale budeme dále otáčet odražečem dostáváme se do bodu na obrázku **b)** uprostřed. Zde je hodnota úhlu alfa nulová. V tomto momentě je y-ová složka rychlosti maximální a x-ová nulová.

Taktéž odraz bude mít největší intenzitu, což se projeví ve spektru výstupního signálu dominancí Dopplerovy frekvence. Kolem této frekvence však budou další složky vlivem vícenásobných parazitních Dopplerových posuvů a otáčení celého soustrojí.

Důležitou částí soustrojí je izolační deska, která zakrývá polovinu odražeče (přibližovanou lopatku, oddalovanou lopatku). Tato deska způsobuje útlum paprsků skrz ni procházejících, tak aby co nejméně ovlivňovaly výstupní spektrum. Pokud bychom izolační desku zanedbali vraceli by se v situaci **b)** dvě Dopplerovy frekvence navzájem inverzní vlivem jedné lopatky pohybující se od a jedné k radaru. Na výstupu bychom tak získali střední hodnotu v podobě nulové Dopplerovy frekvence $(-V + V)$ $(-f_d + f_d)$. Situace **c)** ukazuje vývoj odrazů při dalším kroku otočení. Je zřejmé, že se opět objevil úhel alfa, a situace je podobná jako v případě **a)**. Fialová šipka znázorňuje vektor okamžité maximální rychlosti, který je vektorovým součtem složek x, y.



Obrázek 4.7 - Princip generování Dopplerovy frekvence koutovým odražečem pro jednotlivá natočení

4.2.2 Návrh odražeče

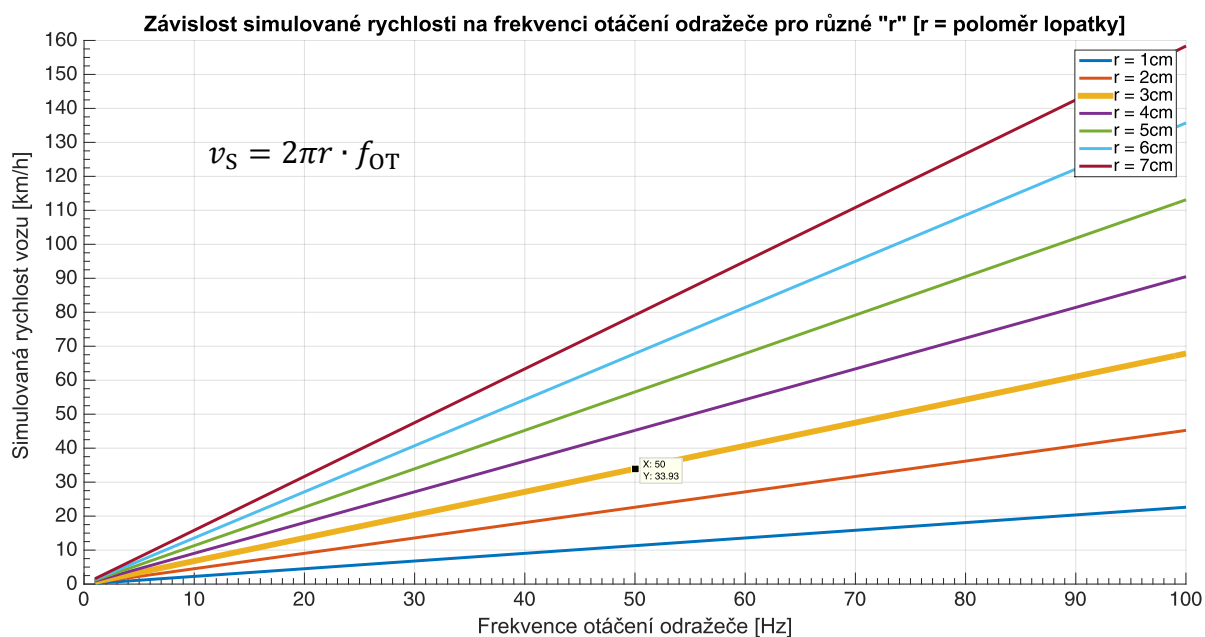
Odražeč byl navrhnut v závislosti na mnoha faktorech. Těmito faktory jsou, frekvence vlny, respektive pásmo, ve kterém radar pracuje (pásmo K – 24GHz), otáčky vrtačky, která bude použita pro měření a rychlosti, která bude požadována jako simulovaná. Z těchto faktorů potom vychází výsledné rozměry lopatky. Ovšem aby systém byl bezpečný je potřeba udržet velikost odražeče co nejmenší, ale tak aby splňoval minimální požadavky.

Těmito požadavky jsou simulovaná rychlost mezi 10 km/h a 40 km/h. Čím větší lopatky zvolíme tím menší rychlostí jimi bude třeba otáčet pro danou simulovanou rychlost, protože jejich efektivní odrazná plocha RCS bude větší a snadněji detekovatelná radarem. Pokud tyto lopatky zmenšíme budeme muset pro dosažení té samé rychlosti úměrně tomu zvýšit otáčky. Z důvodu použití vrtačky se 3000 ot./min (50 ot./s) zvolíme rozměr odražeče na základě grafické závislosti na **Obrázek 4.8** (žlutá tučná křivka) na 60x60 mm (rozměr lopatky 30x60 mm) . Při tak vysokých otáčkách bychom měli dosáhnout naměřené rychlosti 34 km/h při bezpečném chodu soustrojí, jak ukazuje kurzor na **Obrázek 4.8**.

Vztahy pro výpočet potřebných otáček pro požadovanou simulovanou rychlost při dané velikosti lopatek odražeče vzhledem k frekvenci nosné vlny:

$$f_{OT} = \frac{v_S}{2\pi r} = \frac{c \cdot f_D}{4\pi r \cdot f_0} \quad [\text{Hz}] \quad \rightarrow \quad v_S = \frac{c \cdot f_D}{2 \cdot f_0} \quad [\text{m/s}] \quad 4.1$$

Kde, f_{OT} [Hz] je frekvence otáčení odražeče (okraje lopatky) ve vzdálenosti r [m] od středu odražeče, v_S [m/s] má význam obvodové rychlosti označené na **Obrázek 4.7 b)** jako V_2 , c [m/s] je rychlost světla ve vzduchu, f_D [Hz] je Dopplerova frekvence odpovídající rychlosti v_S a f_0 [Hz] je frekvence nosné vlny.



Obrázek 4.8 - Grafická interpretace vztahu 4.1 mezi simulovanou rychlostí, rychlostí otáčení lopatek odražeče a jejich poloměrem "r"

4.2.3 Výsledky a průběh měření

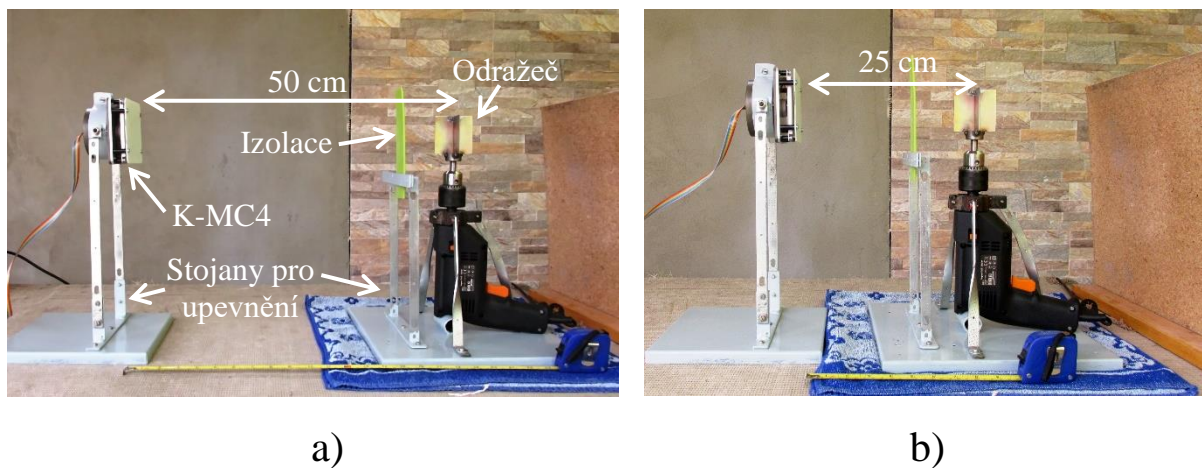
Samotné měření bylo provedeno celkem pro čtyři konkrétní situace, kterými jsou pohyb lopatky k radaru a pohyb lopatky od radaru. Každá z těchto dvou situací byla měřena pro dvě různé vzdálenosti mezi radarem a středem odražeče (50 cm a 25 cm). Při měření byly použity výstupy I_1/Q_1 z důvodu dvoukanálového osciloskopu, a hlavně z důvodu nepotřeby dalších dvou výstupů vzhledem k jejich účelu. Celé měření bylo prováděno v režimu spojitým CW. Frekvence otáčení byla zvolena na 50 Hz (otáčky vrtačky). Radarem vysílaná spojitá frekvence byla zvolena při 5 V připojených na vstup VCO na 24,13 GHz a poloměr lopatky na 3 cm.

Celé měření bylo ovlivňováno elektrickým rušením od vrtačky v podobě 50 Hz rušivé frekvence, která se uplatňuje i ve spektrech a je pozorovatelná i v časových průbězích na oscilogramu nebo průbězích z Matlabu. Vlivem točivého momentu není pozorovatelný fázový posuv mezi signály I_1/Q_1 , který by vypovídal o směru otáčení odražeče, protože Dopplerova frekvence sice je vygenerována odrazem od lopatky, ale vlivem pohybu lopatky po kružnici nikoliv po ose rovnoběžné s osou radaru jako předpokládaný automobil je tato informace pravděpodobně ztracena.

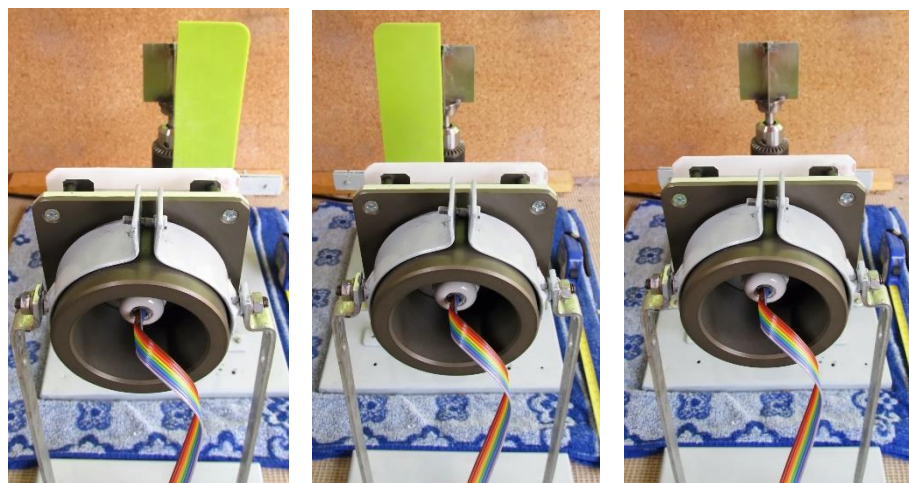
Co se týče samotných výsledků, bylo dosaženo hodnot, které jsou srovnatelné s teoretickými předpoklady výše. Naměřená rychlost byla nezávislá na zvolené vzdálenosti radar/odražeč. Tento faktor ovlivňoval pouze úroveň přijímaného signálu. Dopplerův posuv se pohybuje celou dobu kolem 1,3 kHz což po přepočtu uvedeném níže činí rychlost přibližně 29 km/h, a když vezmeme v potaz obvodovou rychlost konce lopatky 34 km/h, přesnost návrhu, otáček vrtačky a úvahu o střední hodnotě Dopplerova posuvu a výsledné rychlosti z celé lopatky je to hodnota potvrzující funkčnost metody i radaru. Graficky jsou výsledky ilustrovány na následujících stránkách. Na **Obrázek 4.9** je také ukázáno měřící pracoviště a na **Obrázek 4.10** jednotlivé měřící vzdálenosti a zároveň detail přípravku, který byl součástí návrhu odražeče.



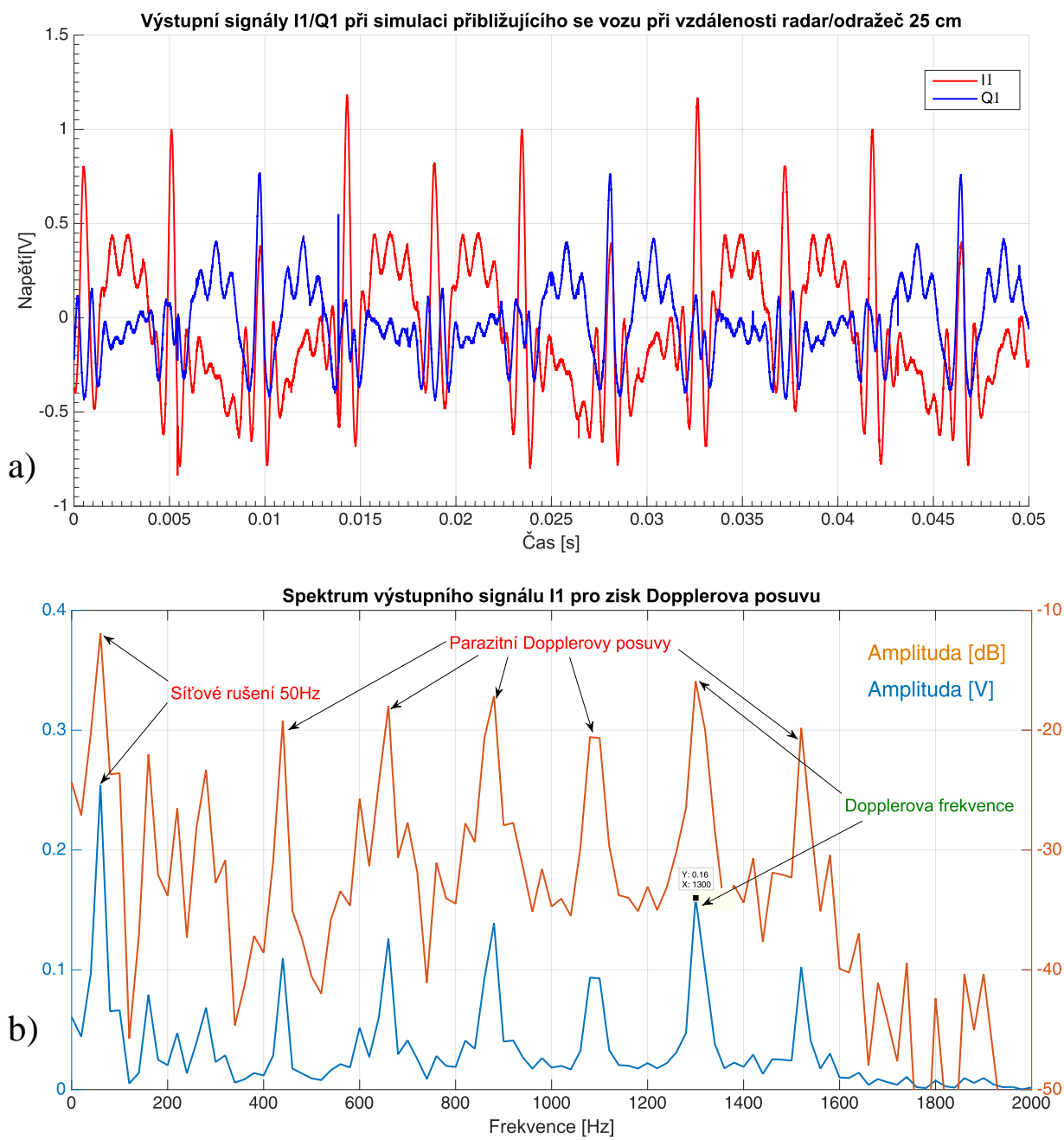
Obrázek 4.9 - Měřicí pracoviště



Obrázek 4.10 - Detail přípravku sestavený pro měření včetně odražeče a popisu přípravku pro měřící vzdálenosti 50 cm a) 25 cm b)



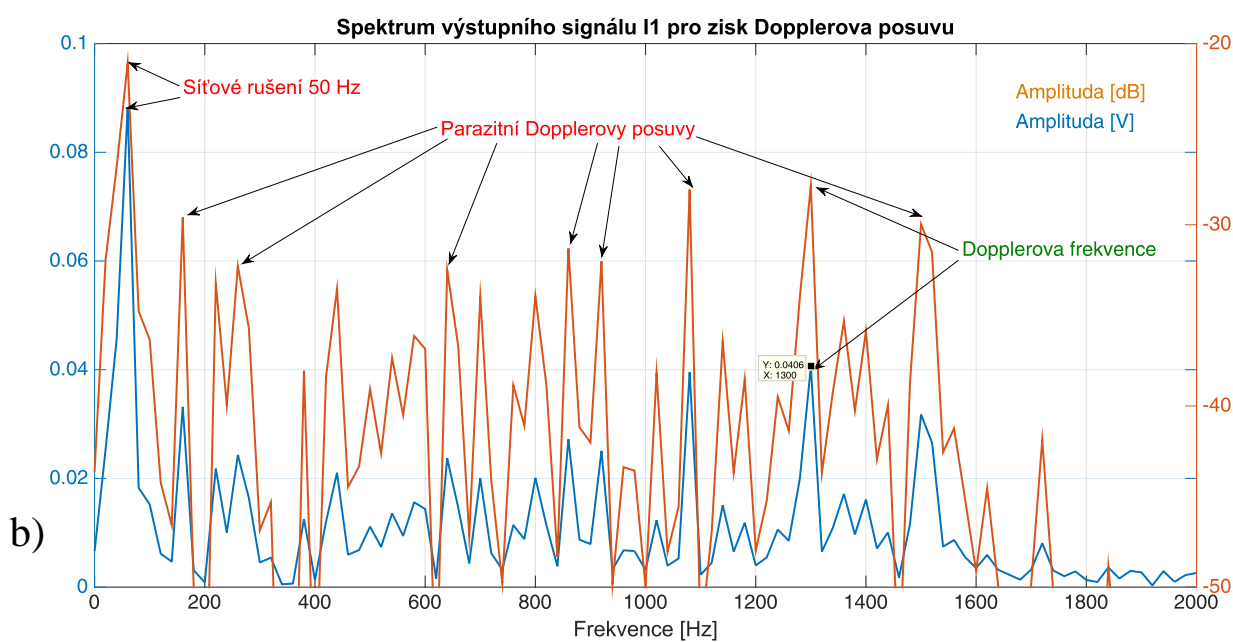
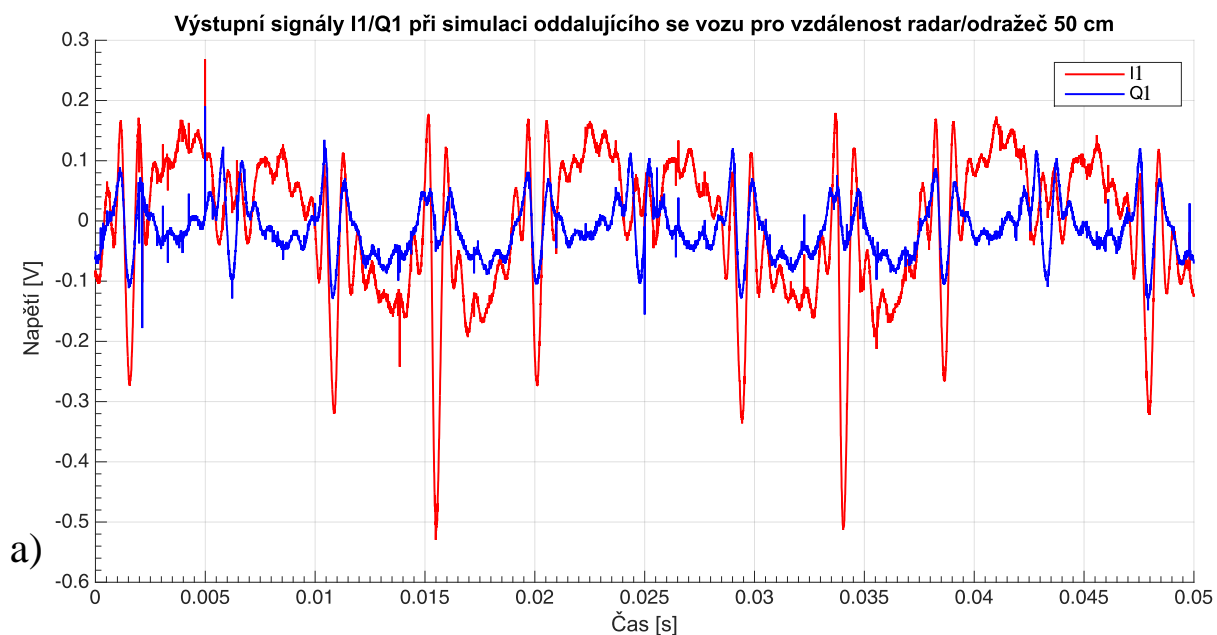
Obrázek 4.11 - Simulace přibližujícího se vozu a) oddalujícího b) a sestava pro ověření vyrušení obou složek Dopplerovy frekvence dle **Obrázek 4.7 b)**



Obrázek 4.12 - Výsledky simulace přibližujícího se vozu pro vzdálenost radar/odražeč 25 cm, Časové průběhy výstupních složek I₁/Q₁ a) Spektrum výstupního signálu I₁ b)

Výpočet naměřené rychlosti pomocí rovnice 4.1:

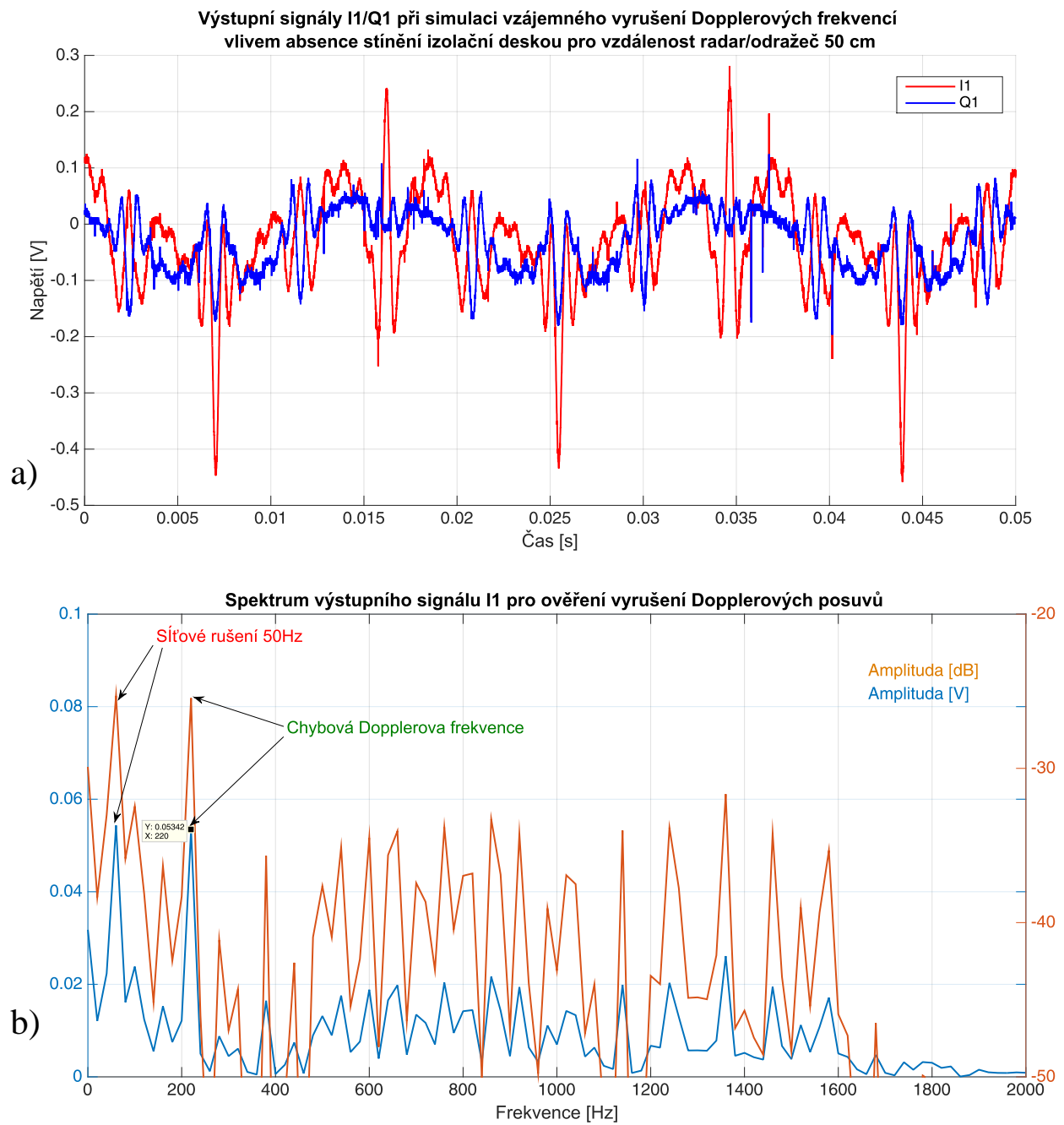
$$v_s = \frac{c \cdot f_D}{2 \cdot f_0} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,3 \text{ kHz}}{2 \cdot 24,13 \text{ GHz}} \cong 8,08 \text{ m/s} \cong 29 \text{ km/h}$$



Obrázek 4.13 - Výsledky simulace oddalujícího se vozu pro vzdálenost radar/odražeč 50 cm, Časové průběhy výstupních složek I₁/Q₁ a) Spektrum výstupního signálu I₁ b)

Výpočet naměřené rychlosti pomocí rovnice 4.1:

$$v_s = \frac{c \cdot f_D}{2 \cdot f_0} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,3 \text{ kHz}}{2 \cdot 24,13 \text{ GHz}} \cong 8,08 \text{ m/s} \cong 29 \text{ km/h}$$



Obrázek 4.14 - Výsledky simulace pro ověření vzájemného vyrušení Dopplerových posuvů pro vzdálenost radar/odražeč 50 cm, Časové průběhy výstupních složek I₁/Q₁ a) Spektrum výstupního signálu I₁ b)

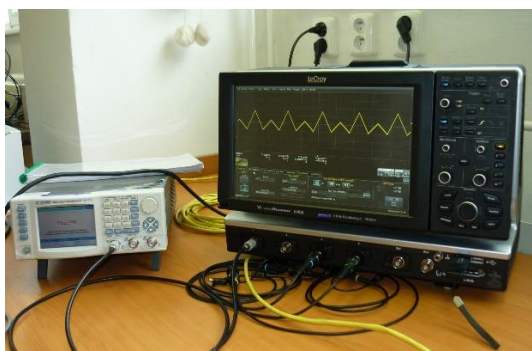
Výpočet naměřené rychlosti pomocí rovnice 4.1:

$$v_s = \frac{c \cdot f_D}{2 \cdot f_0} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 220 \text{ Hz}}{2 \cdot 24,13 \text{ GHz}} \cong 1,37 \text{ m/s} \cong 4,92 \text{ km/h}$$

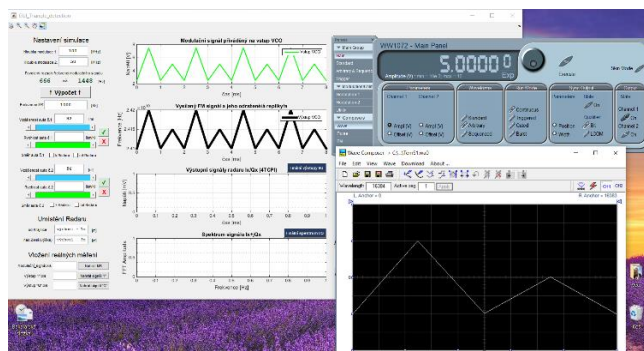
Z **Obrázek 4.14 b)** je zřejmé, že kromě 50 Hz síťového rušení se ve spektru vyskytuje i Dopplerova frekvence i přes to, že by měla být dle teorie nulová. Pokud ovšem tento Dopplerův kmitočet budeme brát v úvahu, protože se uplatňuje výrazně, a vypočítáme dle rovnice 4.1 rychlost, které odpovídá, dojdeme k výsledku 4,92 km/h. Vzhledem k tomu, že předchozí naměřené rychlosti 29,01 km/h v obou směrech se od teoretické hodnoty 33,93 km/h liší právě o tuto hodnotu, bude se jednat s největší pravděpodobností o chybový faktor zahrnující přesnost výroby a celkovou chybu měřicí metody. Lze tuto hodnotu považovat za korekční faktor. Na výše uvedených obrázcích ilustrujících výsledky měření jsou uvedeny pouze situace „k radaru 25 cm“ a „od radaru 50 cm“ z důvodu pouhé změny úrovně přijímaného signálu, která není pro tuto metodu významná, ale aby byly viditelné její změny pro dvě různé vzdálenosti. Závěrem lze tedy říci, že zvolená metoda je funkční a schopna simulovat rychlost vozidla s překvapivě dostatečnou přesností.

4.3 Měření v RAMET

Jako další praktické měření přišlo na řadu měření přímo ve firmě RAMET v Kunovicích. Vzhledem k tomu, že se jednalo o první prakticky využitelný a opravdu realitě nejvíce se přibližující experiment, neobešel se bez komplikací. Měření bylo jakožto celek prováděno celkem dvakrát ve dvou odlišných dnech. Stěžejním úkolem bylo jako první vytvořit modulační signál vhodných a pokud možno co nejvíce optimálních parametrů. Po úspěšném vytvoření modulačního signálu nastaveného pro měření automobilu pohybujícího se v určitém intervalu rychlostí a v určité minimální vzdálenosti od radaru přišlo na řadu první měření. Tento sestrojený modulační signál (MS) o frekvenci cca 1,2 kHz určený pro detekci jak jednoho, tak dvou vedle sebe jedoucích vozidel je ilustrován na **Obrázek 4.15 a)** přímo na osciloskopu, na **Obrázek 4.15 b)** je zachycena pracovní plocha PC, kde je viditelný na základě simulace sestrojený modulační signál následně poslaný přes síť LAN do funkčního generátoru (**Obrázek 4.15 a)** vlevo). Komunikaci mezi počítačem a generátorem TR-0465 zajišťoval software *ArbConnection v4.3* od firmy *Tabor Electronics*. Modulační signál je také zachycen na **Obrázek 4.16** jako screenshot pro ilustraci jeho parametrů. Pracovní stanoviště použité k tomuto účelu ilustruje **Obrázek 4.17** a stanoviště použité pro reálné měření v areálu na **Obrázek 4.18**.

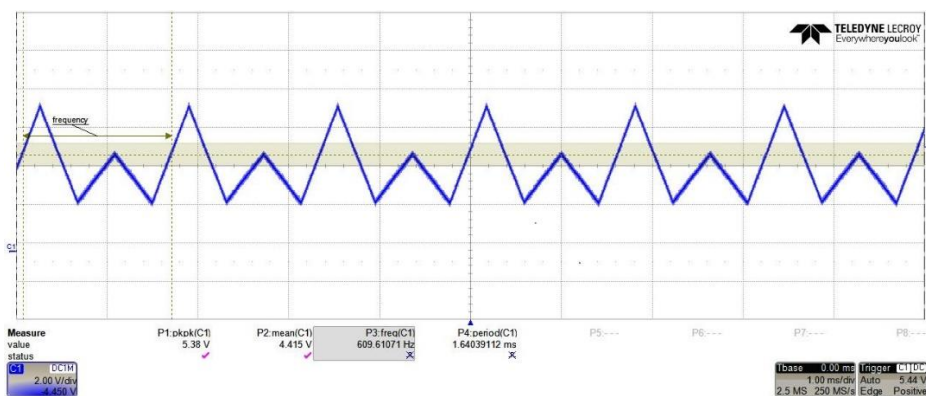


a)



b)

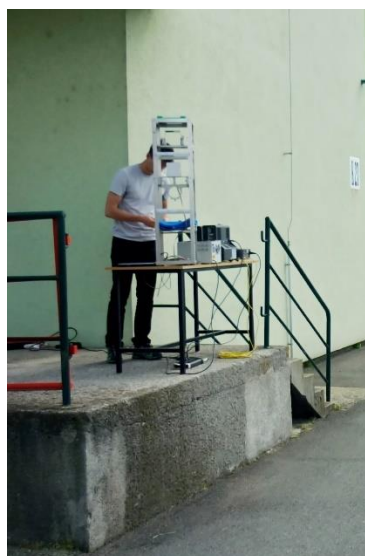
Obrázek 4.15 - Sestrojený modulační signál pro detekci jednoho i dvou vozů a) screenshot pracovní plochy PC se softwarově sestrojeným modulačním signálem (černé okno)



Obrázek 4.16 - Screenshot modulačního signálu z osciloskopu včetně jeho parametrů



Obrázek 4.17 - Pracoviště použité pro sestavení modulačního signálu



Obrázek 4.18 - Měřicí pracoviště pro reálné měření

Pokud vezmeme do úvahy parametry sestrojeného modulačního signálu a předpoklad měření automobilu vzdáleného 18 až 80 m (budoucí pokrytí čtyřproudé vozovky), níže uvedenými výpočty lze dokázat jeho korektnost. Hloubka modulace v 1. subperiodě je cca 90 MHz a ve 2. subperiodě polovina tedy cca 45 MHz (viz). Dále bylo předpokládáno, že automobil/y bude/ou detekován/y mezi 18. a 80. metrem od radaru a rychlosti nepřekročí 50 km/h (pro výpočet uvažujeme 15 m/s což odpovídá 54 km/h).

Potom lze psát s využitím rovnic 3.1 a 3.2:

$$f_{\text{CPI}_{\text{max}}} = \frac{\left(f_{\text{BeatMax}} - \frac{2}{\lambda} \cdot v_{\text{max}}\right) \cdot c}{4 \cdot f_{\text{dev1}} \cdot d_{\text{max}}} = \frac{\left(300\text{kHz} - \frac{2}{12,42\text{mm}} \cdot \frac{15\text{m}}{\text{s}}\right) \cdot \frac{3 \cdot 10^8\text{m}}{\text{s}}}{4 \cdot 90\text{MHz} \cdot 80\text{m}} \cong \mathbf{3,1 \text{ kHz}}$$

Dalším krokem je výpočet minimální povolené frekvence na výstupech I/Q aby byla k dispozici alespoň jedna perioda signálu při zpracování frekvenčním oknem a provedení FFT pro získání „beat“ frekvencí (eliminace efektu ilustrovaného na **Obrázek 3.41**):

$$t_{\text{ramp}} = \frac{1}{2 \cdot f_{\text{CPI}_{\text{max}}}} = \frac{1}{2 \cdot 3,1\text{kHz}} \cong 161 \mu\text{s} \dots (\text{min. doba rampy MS})$$

$$f_{\text{BeatMin}} = \frac{1}{t_{\text{ramp}}} = \frac{1}{161\mu\text{s}} \cong 6,2 \text{ kHz} \dots (\text{min. frekvence IQ})$$

$$f_{\text{CPI}_{\text{min}}} = \frac{\left(f_{\text{BeatMin}} + \frac{2}{\lambda} \cdot v_{\text{max}}\right) \cdot c}{4 \cdot f_{\text{dev2}} \cdot d_{\text{pruh1}}} = \frac{\left(6,2\text{kHz} + \frac{2}{12,42\text{mm}} \cdot \frac{15\text{m}}{\text{s}}\right) \cdot \frac{3 \cdot 10^8\text{m}}{\text{s}}}{4 \cdot 45\text{MHz} \cdot 18\text{m}} \cong \mathbf{798 \text{ Hz}}$$

Zvolená frekvence modulačního signálu 1,2 kHz tedy leží v intervalu <798 Hz;3,1 kHz> a je tedy tímto signálem možné detekovat vozidlo/a jedoucí do 54 km/h ve vzdálenosti 18 až 80 m od radaru. Při měření se však vyskytla zásadní komplikace, kdy po správném zapojení jednotlivých vstupů a výstupů čidla nebyla ani při největší možné nastavitelné citlivosti jednotlivých kanálů osciloskopu 10 mV/dílek a minimální detekovatelné vzdálenosti viditelná žádná odezva při projíždějícím vozidle.

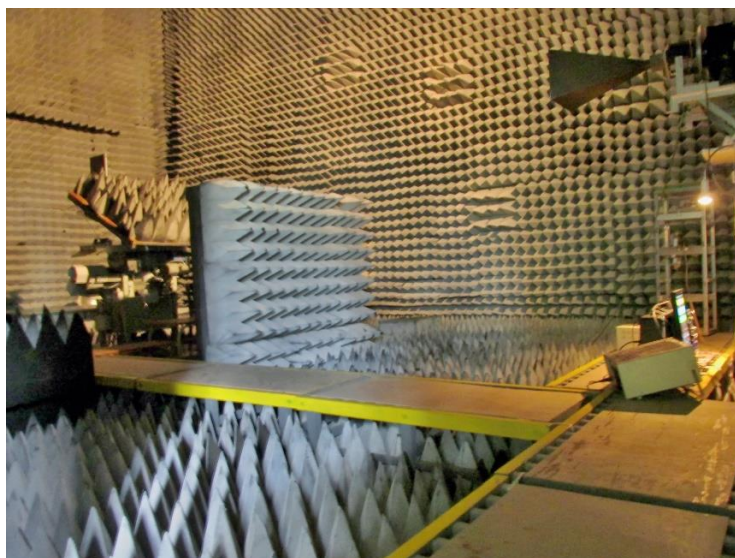
Ovšem na mávnutí ruky radar reagoval dostatečnou výstupní úrovní. V případě, kdy se velmi blízko (cca 3 m) před radarem směrem k němu prošlo byla viditelná minimální odezva na osciloskopu. Závěr tohoto prvního měření nakonec byl takový, že úroveň signálů na výstupech I/Q se nepodařilo optimalizovat a signál byl kompletně tzv. „utopený“ v šumu a sondami snímaném rušení okolního prostředí. Z důvodu časové tísně se další pokusy nechali na další termín.

Tímto měřením se tedy bohužel nepodařilo prakticky ověřit a doložit výsledky, které by dokazovaly teorii kvůli zmíněným komplikacím, každopádně se jedná o perspektivu do budoucna a zásadní věc na kterou bude kladen důraz. Nakonec se došlo k závěru, že zanedbatelná výstupní úroveň bude s největší pravděpodobností způsobena nevhodným měřicím prostředím. V okolí se nacházela spousta kovových garážových vrat, kontejnerů a budov jejichž odražené repliky vytvořili spolu s užitečným signálem destruktivní interferenci. Pro měření vozidel bude potřeba na budoucím měření zvolit vhodnější terén. Takovým ideálním místem může být například přistávací dráha na nějakém malém příměstském letišti. Z důvodu časové tísně byl proto při druhém měření zvolen zcela jiný přístup k problematice. Aby byla dokázána možnost získat při použití vybraného MS rychlost i vzdálenost objektu, přikročilo se k měření v EMC komoře, kde byly veškeré rušivé vlivy potlačeny. Toto měření je popsáno níže.

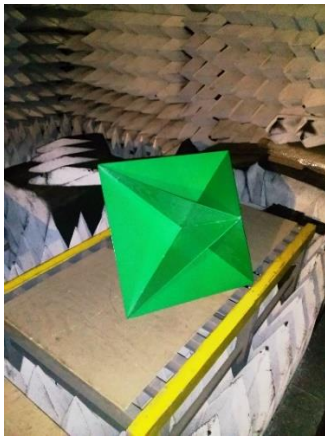
4.3.1 Měření v EMC komoře

V této podkapitole popisované měření bylo prováděno v EMC komoře nacházející se v areálu firmy RAMET. Interiér komory je ukázán na **Obrázek 4.19**. Měřicí pracoviště uvnitř komory ilustruje **Obrázek 4.20 b)**. Při měření byl použit trojúhelníkový modulační signál o frekvenci 1 kHz a odpovídající hloubce modulace 160 MHz v obou subperiodách, z důvodu identifikace pouze jednoho objektu. Jako měřený cíl byl použit nejprve parabolický hliníkový talíř. Ovšem z důvodu jeho velmi malé odrazné plochy nebyla odezva dostatečná, ale byla viditelná. Jako další cíl byl použit koutový odražeč, který je ilustrován na **Obrázek 4.20 a)**. Odraz od tohoto cíle byl větší což se projevilo vyššími úrovněmi signálů I_2/Q_2 , které byly použity jako výstupní pro další zpracování. Z tohoto důvodu jsou uvedeny pouze výsledky s koutovým odražečem jakožto měřeným cílem. Vzorkovací frekvence u 1 s úseku je 2,5MSa/s a u 0,5 ms 5GSa/s.

Celé měření bylo prováděno celkem pro tři základní situace. Tyto situace jsou následující: měření „*statického cíle*“/ „*pohybujícího se cíle směrem k radaru*“/ „*pohybujícího se cíle směrem od radaru*“. Při měření statického cíle byl objekt umístěn zhruba do vzdálenosti 7 m od radaru, přičemž u měření, při němž byl objekt v pohybu, byl tento pohyb generován člověkem. Díky tomuto lidskému faktoru tedy není známa dopředu rychlost objektu jako by mohla být v případě měření automobilu pro další kontrolu.



Obrázek 4.19 - EMC komora



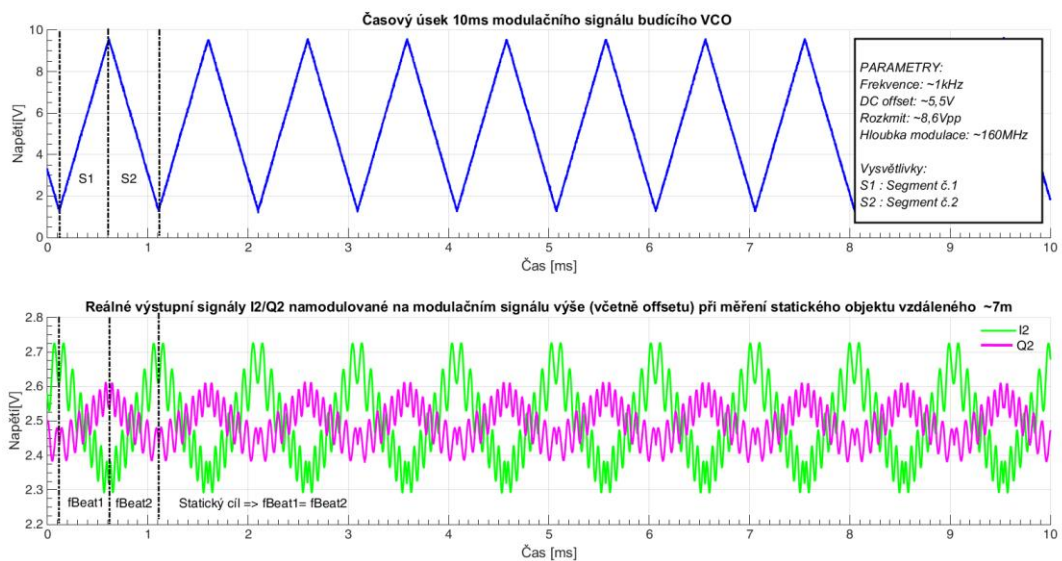
a)



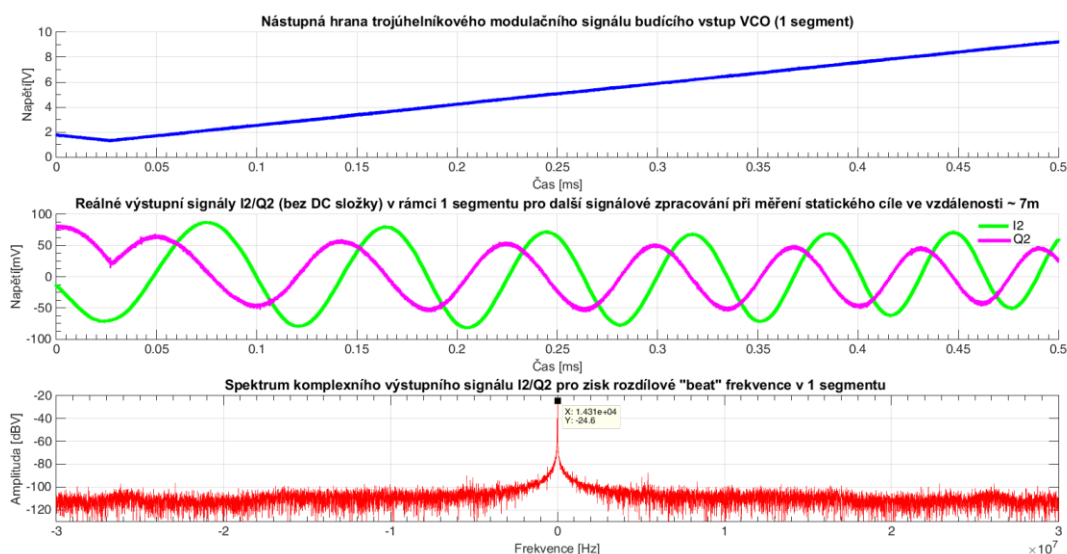
b)

Obrázek 4.20 - Koutový odražeč a) Měřicí pracoviště (zleva: funkční generátor MS, Osciloskop LeCroy WaveRunner 640Zi, Stabilizovaný zdroj Diametral P130R51D b)

Jako první se provedlo měření statického cíle, přičemž hledaná informace následně extrahovaná z naměřených signálů je jeho vzdálenost. Parametry MS signálu byly během všech realizovaných měření neměnné. Časový úsek 20 ms jak MS, tak signálů na výstupech I_2/Q_2 je zobrazen na **Obrázek 4.21**. Na první pohled je vidět, že je zajištěna synchronizace modulačního signálu a signálů na výstupech I_2/Q_2 , takže lze signál segmentovat, protože je znám vždy začátek, respektive konec daného segmentu, nad kterým bude provedena FFT a budou získány „beat“ frekvence. Jelikož cíl nebyl v pohybu při tomto měření Dopplerův posuv je nulový a frekvence v jednotlivých segmentech jsou si rovny. Na **Obrázek 4.22** je uveden detail segmentu, nad kterým byla provedena FFT a následně získána ona hledaná frekvence. Při této analýze bylo použito pro výběr segmentu obdélníkové okno. Na **Obrázek 4.21** dole je také vidět, že pro jednotlivé nástupné, respektive sestupné hrany se navzájem vlivem změny fáze signálu Q_2 na přechodu hran nástupná/sestupná mění posuvy mezi signály I_2/Q_2 o $+90^\circ/-90^\circ$.



Obrázek 4.21 - Modulační signál (nahore), Časový signál na výstupech I_2/Q_2 (dole)



Obrázek 4.22 - Nástupná hrana MS (nahore), Vybraný segment v časové oblasti (uprostřed), Spektrum tohoto segmentu (dole)

Výpočet vzdálenosti ze zjištěné rozdílové frekvence $f_{\text{Beat}} = 14,31 \text{ kHz}$:

(Při všech následujících výpočtech se vychází z rovnic 1.5 a 1.6 do kterých se dosazuje v základních jednotkách)

$$f_{B1} = f_B + f_D = \frac{2}{c} \cdot \frac{f_{\text{dev}}}{T_{\text{CPI}}} R - \frac{2}{\lambda} v_r$$

$$f_{B2} = -f_B + f_D = -\frac{2}{c} \cdot \frac{f_{\text{dev}}}{T_{\text{CPI}}} R - \frac{2}{\lambda} v_r$$

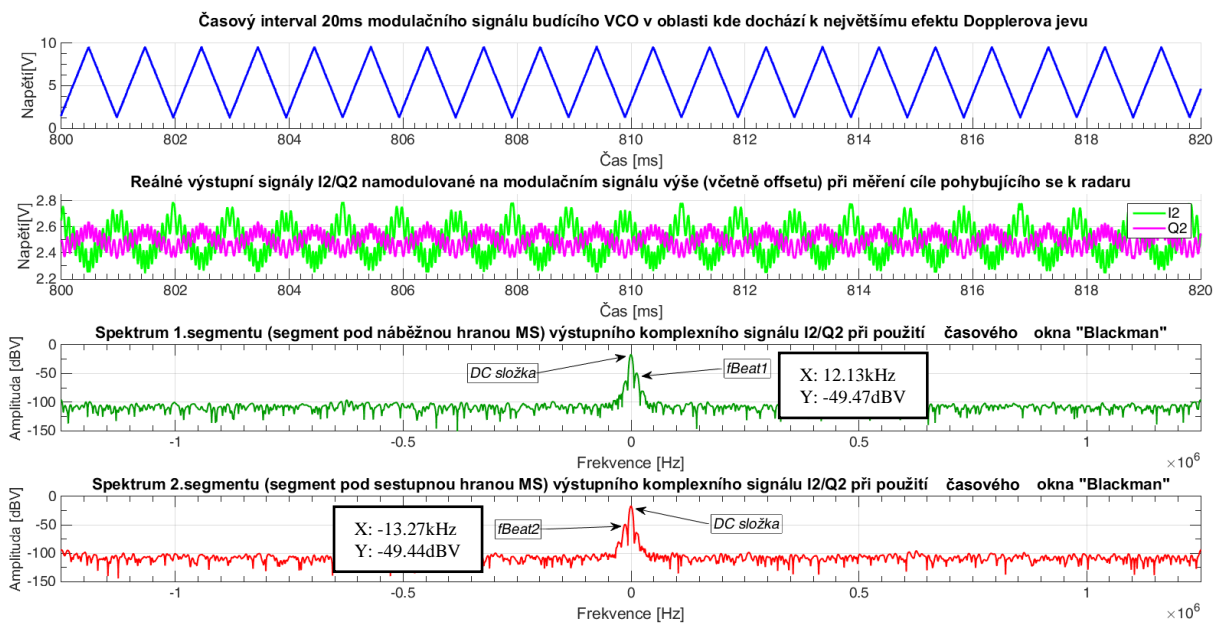
Protože platí $|f_{B1}| = |f_{B2}|$ stačí pouze 1 rovnice pro výpočet vzdálenosti:

$$f_{B1} = \frac{2}{c} \cdot \frac{f_{\text{dev}}}{T_{\text{CPI}}} R \rightarrow R = \frac{c}{2} \cdot \frac{f_{B1}}{f_{\text{dev}}} \cdot T_{\text{CPI}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2} \cdot \frac{14,31 \text{ kHz}}{160 \text{ MHz}} \cdot 0,5 \text{ ms} \cong \mathbf{6,7 \text{ m}}$$

Kde: f_{B1}, f_{B2} jsou rozdílové frekvence [Hz], f_B [Hz] je rozdílový kmitočet daný pouze časovým zpožděním, f_D [Hz] je Dopplerův kmitočet vlivem pohybu, f_{dev} [Hz] je hloubka modulace, λ [m] vlnová délka vysílaného signálu (nosné), T_{CPI} [s] doba náběžné/sestupné hrany MS, R [m] vzdálenost objektu, v_r [m/s] jeho relativní rychlost a c [m/s] rychlost světla aneb rychlost šíření vlny ve vzduchu.

Z výsledku 6,7 m je patrné, že měření bylo správné při teoretické vzdálenosti ~7 m.

Jako druhé v pořadí se provedlo měření pohybujícího se cíle směrem k radaru. Výsledky tohoto měření jsou viditelné na **Obrázek 4.23**. Opět se jedná o 20 ms dlouhý úsek vybraný z úseku 1 sek. kvůli viditelnosti. Z důvodu pohybu cíle, už není Dopplerův posuv nulový, proto nebude platit rovnost rozdílových frekvencí v sousedních segmentech jako v předchozím případě. Pro analýzu se tedy použily dva segmenty z oblasti 1 sek. úseku kde byl projev Dopplera nejvíce znatelný a nad nimi se provedla FFT. Před samotnou FFT se provedl tzv. *zero-padding* díky němuž se energie signálu ve spektru zmenšila a dále pak aplikace výběrového časového okna. Výsledky tohoto kroku jsou na spodních dvou grafech z **Obrázek 4.23**. Je viditelné, že pro segment pod náběžnou hranou je frekvence „kladná“ a v segmentu pod sestupnou hranou „záporná“ z důvodu zpracování výstupních signálu I₂/Q₂ jakožto komplexního vektoru. Důvodem je právě skutečnost změny fáze časových složek I₂/Q₂ v jednotlivých segmentech. V oblasti grafů spekter segmentů jsou také souřadnice rozdílových frekvencí v příslušných grafech značených jako f_{Beat1} & f_{Beat2} . Platí, že $|f_{Beat1}| < |f_{Beat2}|$ což dokazuje, že objekt se opravdu pohyboval směrem k radaru (Dopplerův frekvenční posuv).



Obrázek 4.23 - Postupně shora: Modulační signál, Časové průběhy složek I₂/Q₂, Spektrum 1.segmentu, Spektrum 2.segmentu

Výpočet vzdálenosti a rychlosti ze zjištěných rozdílových frekvencí:

$$f_{Beat1} = 12,13 \text{ kHz} / f_{Beat2} = -13,27 \text{ kHz:}$$

$$f_{B1} = f_B + f_D = \frac{2}{c} \cdot \frac{f_{dev}}{T_{CPI}} R - \frac{2}{\lambda} v_r$$

$$f_{B2} = -f_B + f_D = -\frac{2}{c} \cdot \frac{f_{dev}}{T_{CPI}} R - \frac{2}{\lambda} v_r$$

$$\begin{aligned}
 f_{B1} &= f_B + f_D = \frac{2}{c} \cdot \frac{f_{\text{dev}}}{T_{\text{CPI}}} R - \frac{2}{\lambda} v_r \\
 &= \frac{2}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{160\text{MHz}}{0,5\text{ms}} R - \frac{2}{12,42\text{mm}} v_r \cong \mathbf{2133R - 161v_r} \\
 \\
 f_{B2} &= -f_B + f_D = -\frac{2}{c} \cdot \frac{f_{\text{dev}}}{T_{\text{CPI}}} R - \frac{2}{\lambda} v_r \\
 &= -\frac{2}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{160\text{MHz}}{0,5\text{ms}} R - \frac{2}{12,42\text{mm}} v_r \cong \mathbf{-2133R - 161v_r}
 \end{aligned}$$

→	$f_{B1} \cong \mathbf{2133R - 161v_r} \rightarrow +12,13\text{kHz} = \mathbf{2133R - 161v_r}$	Sčítací metoda
	$f_{B2} \cong \mathbf{-2133R - 161v_r} \rightarrow -13,27\text{kHz} = \mathbf{-2133R - 161v_r}$	
	$-1,14\text{kHz} = \mathbf{-322v_r} \rightarrow v_r \cong \mathbf{+3,5 m \cdot s^{-1}} = \mathbf{+12,6 km \cdot h^{-1}}$	

Zpětný výpočet vzdálenosti

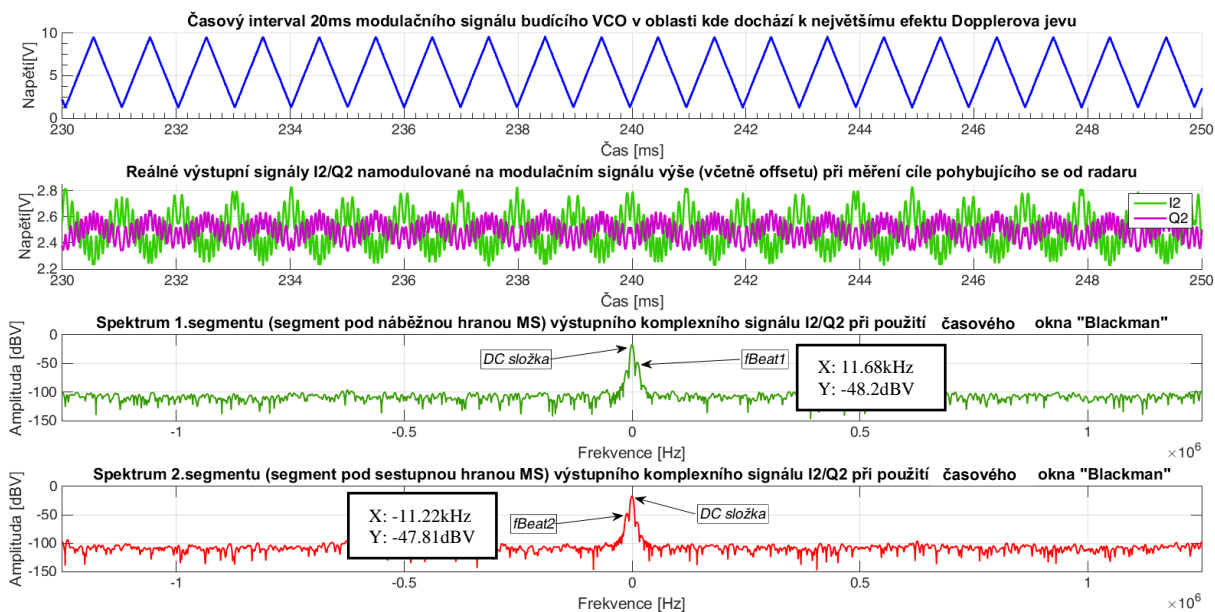
$$+12,13\text{kHz} = \mathbf{2133R - 161v_r} \rightarrow R = \frac{f_{B1} + 161v_r}{2133} = \frac{+12,13\text{kHz} + 161 \cdot 3,5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{2133}$$

$$\mathbf{R \cong 5,95 m}$$

Před interpretací výsledného řešení je třeba říci, že měření probíhalo tak, že koutový odražeč se lidskou silou pohyboval směrem k radaru a na povel byl sejmout signál z osciloskopu. Tento signál tak nesl informaci o vzdálenosti a rychlosti odražeče v okamžiku, kdy zazněl povel.

Koutový odražeč se udával do pohybu ve výše změřené vzdálenosti zhruba 6,7 m. Než zazněl povel pro záznam signálu, urazil tak určitou vzdálenost k radaru, aby nabral dostatečnou rychlost, takže vzdálenost naměřená, respektive z měření vypočítaná výše na 5,95 m je odpovídající a potvrzuje toto tvrzení. Vypočítaná rychlost v okamžiku povelu 3,5 m/s je též adekvátní vzhledem k tomu, že koutový odražeč vážil cca 7 kg a udával jej do pohybu člověk.

Následující měření popisuje obdobnou situaci, ale pro pohyb od radaru. Veškeré nastavení a postupy jsou totožné s tím pro pohyb k radaru. **Obrázek 4.24** dokládá výsledky měření v grafické podobě. Poté následuje totožný výpočet jako pro pohyb k radaru. Z **Obrázek 4.24** lze zjistit, že pro rozdílové frekvence platí $|f_{\text{Beat1}}| > |f_{\text{Beat2}}|$ což je naopak než pro směr k radaru. Tato skutečnost dokazuje, že se jednalo opravdu o pohyb opačným směrem.



Obrázek 4.24 - Postupně shora: Modulační signál, Časové průběhy složek I₂/Q₂, Spektrum 1.segmentu, Spektrum 2.segmentu

Výpočet vzdálenosti a rychlosti ze zjištěných rozdílových frekvencí:

$$f_{\text{Beat1}} = 11,68 \text{ kHz} / f_{\text{Beat2}} = -11,22 \text{ kHz:}$$

(výchozí rovnice jsou stejné jako v předchozích případech, změna nastává až při zadávání rozdílových kmitočtů)

$$\begin{aligned}
 f_{B1} &\cong 2133R - 161v_r \rightarrow +11,68\text{kHz} = 2133R - 161v_r && \text{Sčítací metoda} \\
 f_{B2} &\cong -2133R - 161v_r \rightarrow -11,22\text{kHz} = -2133R - 161v_r \\
 +460\text{Hz} &= -322v_r \rightarrow v_r \cong -1,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cong -5,14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}
 \end{aligned}$$

Zpětný výpočet vzdálenosti

$$+11,68\text{kHz} = 2133R - 161v_r \rightarrow R = \frac{f_{B1} + 161v_r}{2133} = \frac{+11,68\text{kHz} - 161 \cdot 1,43\text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{2133}$$

$$R \cong 5,4 \text{ m}$$

Změřená vzdálenost je přibližně stejná jako v předchozím příkladu, protože pohyb začínal v menší vzdálenosti než 5,4 m kde byl dán povel k záznamu signálů na osciloskopu Rychlost je záporná což značí pohyb opačným směrem a velikostně je o více než o 50 % menší.

5 ZÁVĚR

Hlavní náplní této bakalářské práce bylo provést průzkum různých technik a postupů využívaných pro měření rychlosti, vzdálenosti a tím detekce automobilů v dopravě pomocí mikrovlnných radarových čidel. Dalším zásadním krokem byl výběr optimálního komerčně dostupného čidla, které bude vyhovovat požadavkům. Těmito požadavky bylo pracovní pásmo K, pokrytí až čtyřproudé vozovky a jednoznačná detekce vozidel pohybujících se po ní v obou směrech. Po výběru vhodného sensoru byly provedeny základní simulace v interaktivním prostředí MATLAB R2015a uvažující i vliv mnohacestného šíření nebo dešťových srážek na výsledný signál. Prioritně byly simulovány základní typy modulačních signálů (MS). Také byla provedena simulace CW režimu. Po výběru vhodného tvaru MS byl tento signál navržen tak, aby s ním mohl výsledný systém pracovat ve zvolených podmínkách. Jako další bylo vytvořeno uživatelské prostředí shrnující doposud zjištěné teoretické podklady a simulující proces měření v jednotlivých krocích pro vybrané čidlo s vybraným MS, a z důvodu nejen časové náročnosti výslednou detekci pro dva vozy. Ovšem jedná se o základ, na kterém je možné stavět simulátor až čtyř vozů. Nakonec byla provedena i praktická měření.

Režim, ve kterém bude čidlo pracovat byl zvolen na režim FMCW z důvodu celkové detekce vozu. Z velkého množství komerčně dostupných čidel byl zvolen trackovací sensor K-MC4. Důvodem výběru je vybavení dvěma přijímacími anténami pro korekci kosinového efektu, režimem CW i FMCW, vysokou citlivostí -116 dBm a vysílaným výkonem 18 dBm. Také směrovost antény byla pro pokrytí čtyřproudé vozovky vhodná. Ze směrovosti vysílací antény lze simulovat pokrytí vozovky při různých umístěních radaru od vozovky. Pro výchozí 1 m od krajnice a výšku 1,9 m je to 18 m kdy je pokryt 1. pruh až po 60 m, kdy jsou pokryty všechny 4 pruhy, a i tak jsou zajištěny dostatečné odrazy od vozů s malou RCS. Při simulacích vhodného tvaru MS byly testovány tři tvary. Tvar obdélníkový, pilovitý a trojúhelníkový.

První zmíněný způsob modulace nebyl zvolen, protože potřebná vzdálenost detekce pro čtyři pruhy činí minimálně 60 m, přičemž jako maximum bylo zvoleno 80 m čemuž odpovídá frekvenční krok pouze 1,875 MHz a změny napětí VCO s rozsahem 1-10 V pouze ± 104 mV. Nelze také detekovat statické cíle, protože při nulové Dopplerově frekvenci nelze zjistit její fázový posuv. Pilovitý MS nebyl zvolen z důvodu zisku pouze jedné rozdílové frekvence během pracovní periody MS, přičemž tato frekvence nese informaci o rychlosti i vzdálenosti, ale dvě neznámé z jedné rovnice nelze získat. Výše uvedené problémy řeší tvar trojúhelníkový, který během periody obsahuje dvě rozdílové frekvence, které jsou zásadní pro celkovou detekci. Další výhodou je možnost změny hloubky modulace v jednotlivých subperiodách tohoto signálu a schopnost od sebe vozy rozlišovat. Počet subperiod v celkové vysílací periodě je totiž roven počtu rozlišitelných vozů. Ovšem s více vozy klesá vzájemná rozlišitelnost v prostoru.

Rozhraní naprogramované v MATLAB uvažuje veškeré vlastnosti K-MC4 a na základě vstupních dat simuluje situace, které mohou nastat při detekci dvou vozů a upozorňuje uživatele na nesprávné parametry, respektive nemožnost detekce nimi v reálu. Při vkládání dat je třeba přizpůsobit kód žádanému zpracování, ale struktura je dána. Praktická stránka byla ovlivněna technickými problémy se senzorem. Čidlo bylo i reklamováno. Nakonec se nové čidlo podařilo oživit, ověřit režim CW pomocí navrženého koutové odražeče a stejně tak režim FMCW v EMC komoře v RAMET. Naměřené výsledky, i přesto že se jedná o základní měření, potvrzují uvedenou teorii. Do budoucna je hlavní perspektivou provést reálnější měření a ověřit to, co už bylo ověřeno v ideálních podmínkách, i v těch reálných. Dále pak navrhnout obvody pro digitalizaci výstupních dat, jejich signálové zpracování a interpretaci, ať už ve smyslu bezdrátového přenosu do dopravního střediska nebo pouze úsekového varovného měření.

LITERATURA

- [1] Z historie radaru. KUSALA, Jaroslav. *Radarová encyklopedie* [online]. Ministerstvo obrany ČR, 2008 [cit.2017-12-07].
Dostupné z: http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/radar.html
- [2] Historie a vývoj radaru. *Martas bloguje* [online]. 2013 [cit. 2017-12-07].
Dostupné z: <http://martasw.cz/veda-a-technika/radary>
- [3] RADAR. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-12-08].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Radar>
- [4] WOLFF, Christian. *Radar Basics* [online]. 1998 [cit. 2017-12-07].
Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/index.en.html>
- [5] *Police Radar Information Center* [online]. 1999 [cit. 2017-12-07].
Dostupné z: <http://copradar.com/index.html>
- [6] *SkyRadar* [online]. 2008 [cit. 2017-12-07].
Dostupné z: <https://www.skyradar.com/>
- [7] BEZOUŠEK, Pavel a Pavel ŠEDIVÝ. *Radarová technika: 1.* 2004. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03036-9.
- [8] *FACULTY OF ENGINEERING: RADAR and Satellite Communication* [online]. [cit. 2017-12-08].
Dostupné z: [http://mmust.elimu.net/BSC\(ELEC_COMM\)/Year_5/Year_5_Home.htm](http://mmust.elimu.net/BSC(ELEC_COMM)/Year_5/Year_5_Home.htm)
- [9] Rohde & Schwarz webinar. *YouTube: Analysis of FMCW radar signals in automotive applications* [online]. 2014 [cit. 2017-12-08].
Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=8qaCSQ83ZyU>
- [10] VON URS LÜBBERT. *Target position estimation with a continuous wave radar network.* Göttingen: Cuvillier, 2005. ISBN 9783865375469.
- [11] *FSK-FMCW Principle* [online]. 2016 [cit. 2017-12-11].
Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FSK-FMCW_Principle.png
- [12] *RFbeam Microwave GmbH: Products* [online]. Switzerland [cit. 2017-12-09].
Dostupné z: <https://www.rfbeam.ch/>
- [13] *CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU: Výzkum* [online]. Brno [cit. 2017-12-09]. Dostupné z: <https://www.cdv.cz/>
- [14] *Ceskedalnice.cz: kategorie komunikací* [online]. [cit. 2018-05-03].
Dostupné z: <http://www.ceskedalnice.cz/odborne-info/kategorie-komunikaci/>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

BFSK	Binary Frequency Shift Keying
cos	cosine function (goniometrická funkce kosinus)
CW	continuous waves (spojitý režim vysílání)
dB	decibel
dBm	decibel-miliwatts (decibel nad miliwattem)
f_b	beat frequency (rozdílový kmitočet vlny vyslané a přijaté)
f_D	Doppler frequency (Dopplerova frekvence)
f_{dev}	maximal transmitted frequency (maximální vysílaná frekvence)
T_{CPI}	coherent processing interval (doba nárůstu/poklesu vysílané frekvence)
FMCW	frequency modulated continuous waves (režim frekvenční modulace)
Hz	Hertz
km/h	kilometer per hour (kilometr za hodinu)
LNA	Low Noise Amplifier (nízkošumový zesilovač)
m	meter (metr)
m/s	meter per second (metr za sekundu)
mA	miliAmpér
MHz/V	Megahertz na Volt
mV	miliVolt
NF	Low frequency (nízkofrekvenční)
S/N	Signal-Noise ratio (poměr užitečného signálu k šumu)
tan	tangens function (goniometrická funkce tangens)
V	Volt
VCO	Voltage Controlled Oscillator (napětím řízený oscilátor)
VF	High frequency (vysokofrekvenční)
GUI	Graphical User Interface (Grafické Uživatelské Rozhraní)
FFT	Fast Fourier Transform (rychlá Fourierova transformace)
RCS	Radar Cross Section (efektivní odrazní plocha)
MS	Modulation signal (modulační signál)
EMC	Electromagnetic compatibility (Elektromagnetická kompatibilita)
LAN	Local Area Network (lokální/místní síť)

PŘÍLOHY

Obsahem CD jsou MATLAB soubory:

- FMCW_Radar_system_TRIANGLE.m
- FMCW_Radar_system_CHIRP.m
- FMCW_Radar_system_SQUARE.m
- GUI_Triangle_detection.m
- FFT_transform.m
- InterX.m

Návod pro nastavení analýzy

Bakalářská práce v elektronické podobě ve formátu pdf

Reklamační list čidla K-MC4 ve formátu pdf