



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE**

CW radarový senzor 11GHz pro měření rychlosti automobilů

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Bezdrátové komunikace

Vedoucí práce: doc. Ing. Přemysl Hudec, CSc.

Rostislav Matoušek

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Rostislav Matoušek**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Bezdrátové komunikace

Název tématu: **CW radarový senzor 11GHz pro měření rychlosti motorových vozidel**

Pokyny pro vypracování:


Prostudujte problematiku týkající se CW radarů a radarů pro měření rychlosti automobilů. Pro pásmo 11 GHz navrhnete radarový senzor schopný měřit rychlost automobilů na vzdálenost cca 50 m a s rozsahem od 20 do 200 km/hod. Radar realizujte, jako řídicí a vyhodnocovací jednotku použijte notebook. Sestavte řídicí a vyhodnocovací programové vybavení, proveďte praktická měření.

Seznam odborné literatury:

1. Chang Kai: RF and Microwave Wireless Systems, John Wiley & Sons 2000.
2. Teppati V., Ferrero A., Sayed M.: Modern RF and Microwave Measurement Techniques, Cambridge University Press 2013.
3. Chi-Hsi Li R.: RF Circuit Design., John Wiley & Sons 2009.

Vedoucí: doc. Ing. Přemysl Hudec, CSc.

Platnost zadání: LS 2015/2016


prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 23. 1. 2015

Anotace

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí CW radaru pro měření rychlosti pohybujících se objektů, především automobilů, na základě Dopplerova jevu. Radar je sestaven z jednotlivých bloků. Práce dále zahrnuje celkový návrh softwarového zpracování dat v osobním počítači s grafickým rozhraním v programu MATLAB. Data můžeme vyhodnocovat v reálném čase, nebo je nejprve zaznamenat a potom analyzovat.

Klíčová slova

CW radar, Dopplerův jev, měření rychlosti automobilů, policejní radar, kvadrurní směšovač, zpracování dat MATLAB.

Annotation

This thesis describes the design and construction of CW radar for measuring the speed of moving objects, primarily cars, based on the Doppler effect. Radar is assembled from individual components. The work includes the proposal software of data processing on a personal computer with graphical user interface in MATLAB for both the recorded signals and real time measurements.

Key words

CW radarm, Doppler effect, vehicle speed measurement, police radar, quadrature mixer, MATLAB data processing.

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 11. května 2015

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Přemyslu Hudcovi, CSc za odbornou pomoc a cenné rady při vedení mé diplomové práce.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Základní princip CW radaru.....	2
2.1 Dopplerův jev.....	2
2.2 CW radary	4
2.3 Radarová rovnice	7
3. Policejní měřiče rychlosti.....	8
3.1 Mikrovlnné radary.....	8
3.1.1 RAMER AD a RAMER 7M	8
3.1.2 RAMER 10	8
3.1.3 Inteligentní radary s OCR	9
3.1.4 Informační panely	10
3.3 Ostatní druhy měřičů.....	10
3.2.1 Úsekové měřiče.....	10
3.2.2 Laserové měřiče	10
4. Návrh radaru	11
4.1 Jednotlivé bloky radaru.....	12
4.1.1 Popis bloků.....	13
4.1.2 Návrh filtru dolní propustí	18
4.1.3 Antény.....	21
4.1.4 Napájecí zdroj	22
4.2 Výpočty radarová rovnice	23
5. Zpracování přijatých dat	26
5.1 Převodník NI USB-6009	26
5.2 Analýza přijatého signálu.....	27
5.3 Program GUI – MATLAB	28
5.4 Změřené dopravní situace	32
5.4.1 Měření - Evropská ulice, Praha 6.....	33
5.4.2 Měření Strahov, Praha.....	38
5.4.3 Záznam z živého měření	42
6. Závěr	43
7. Literatura.....	44

Seznam obrázků

Obr. 1	Přepoččet radiální rychlosti	3
Obr. 2	Závislost radiální rychlosti na úhlu φ	3
Obr. 3	Princip CW radaru	5
Obr. 4	CW radar s jednou anténou.....	6
Obr. 5	Radar typu RAMER 10 (zdroj: ramet.as)	9
Obr. 6	Radar firmy Eltodo ve zkušebním provozu (zdroj: idnes.cz)	10
Obr. 7	Principiální schéma navrženého radaru	11
Obr. 8	Rozmístění bloků na základnové desce	12
Obr. 9	Výkonový návrh	12
Obr. 10	Změřené moduly s-parametrů PA	13
Obr. 11	Wilkinsonův dělič 1:1	14
Obr. 12	Změřené parametry Wilkinsonova děliče V – P1	14
Obr. 13	Změřené s-parametry LNA	15
Obr. 14	Struktura IQ směřovače	16
Obr. 15	Signál z kvadraturního směřovače.....	16
Obr. 16	Použitý kvadraturní směřovač	17
Obr. 17	Přenos filtru VLFX - 105.....	17
Obr. 18	Schéma LFA	18
Obr. 19	Nízkofrekvenční nízkošumový zesilovač	18
Obr. 20	Návrh dolní propusti a) schéma zapojení, b) strana součástek, c) plošný spoj (1:1)	19
Obr. 21	Frekvenční spektrum dolní propusti a) simulované, b) změřené	20
Obr. 22	Realizovaná dolní propust.....	20
Obr. 23	Vyzařovací diagram 16-ti prvkové anténní řady.....	21
Obr. 24	Možné způsoby přimontování antén a) horizontální, b) vertikální	22
Obr. 25	Napájecí zdroj	22
Obr. 26	Realizace radaru.....	23
Obr. 27	Podrobné schéma navrženého radaru.....	23
Obr. 28	Šumové 2-brany přijímače	24
Obr. 29	a) převodník NI-USB 6009, b) zapojení vývodů	26
Obr. 30	Přijatý signál v časové oblasti.....	27
Obr. 31	Signál v IQ rovině a) přijatý, b) upravený	28
Obr. 32	Vývojové diagramy programu a) živé měření, b) zaznamenaná data	28
Obr. 33	Příklad spektrogramu	29
Obr. 34	GUI program zpracování dat	31
Obr. 35	Praktické měření v terénu	32
Obr. 36	Mapa měření Evropská, Praha 6	32
Obr. 37	Auta v jednom směru	33
Obr. 38	Auta v jednom směru II	34
Obr. 39	Auta opačný směr	35
Obr. 40	Auta oba směry najednou.....	36

Obr. 41 Auta, tramvaj oba směry postupně.....	37
Obr. 42 Maximální detekční vzdálenost	38
Obr. 43 Motocykl.....	39
Obr. 44 Autobus jedoucí ze zastávky.....	40
Obr. 45 Zájezdový autobus	41
Obr. 46 Mapa měření Strahov, Praha 6.....	41
Obr. 47 Záznam z reálného měření	42

Seznam tabulek

Tab. 1 Některá frekvenční pásma přidělená radarové službě [1]	1
Tab. 2 Parametry PA na návrhové frekvenci	13
Tab. 3 Parametry děliče na návrhové frekvenci.....	14
Tab. 4 Parametry LNA na frekvenci 11 GHz.....	15
Tab. 5 Seznam součástek dolní propusti	19

Seznam zkratek

A/D	Analog – digital (analogově - digitální)
CW	Continual wave (kontinuální vlna)
DRO	Dielektrický rezonanční obvod
GUI	Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní)
HP	High-pass filter (filtr horní propusti)
LFA	Low-frequency amplifier (nízkofrekvenční zesilovač)
LNA	Low-noise amplifier (nízkošumový zesilovač)
LO	Local oscilator (lokální oscilátor)
LP, DP	Low-pass filter (filtr dolní propusti)
MIX	Mixer (směšovač)
PA	Power ampilfier (výkonový zesilovač)
PLL	Phase Locked Loop (smyčka fázového závěsu)
RA	Recieve antenna (přijímací anténa)
RADAR	RADio Detection And Ranging (radiová detekce a měření vzdálenosti)
RCS	Radar Cross Section (efektivní odrazná plocha)
RF, VF	Radio Frequency (vysokofrekvenční)
SPZ	Státní poznávací značka
TA	Transmit antenna (vysílací anténa)
WILK	Wilkinsonův dělič výkonu

1. Úvod

Slovo radar pochází z anglického RADio Detection And Ranging, což v překladu znamená radiová detekce a určení vzdálenosti. Princip radaru byl již znám před druhou světovou válkou, v ní však došel k velkému rozvoji a praktickému používání. Na jeho vývoji se podílelo mnoho vynálezců, nelze tedy říci, kdo ho kdy vynalezl. Základní princip je takový, že radar vyšle signál (pulzní nebo s kontinuální vlnou) do prostoru, a ten se odrazí od různých překážek zpět k radaru, kde ho přijímací anténa přijme. Tento radar se nazývá primární. Signál se odrazí od všech překážek. Od pohyblivých překážek se vlna také odrazí, a to s frekvenčním posuvem, tzv. Dopplerovým posuvem. Druhým typem je sekundární radar. Ten na rozdíl od primárního nepřijímá odražené signály, ale signály vyslané odpovídačem. Je to tedy systém, kde radar vyšle signál, a pokud ho zachytí transpondér (odpovídač), vyšle mu zpět informaci, například o své poloze. My se ale budeme zabývat pouze primárním radarem. Radary se používají v mnoha odvětvích, především ve vojenských aplikacích, meteorologických aplikacích. Některá používaná pásma radarů a jejich možné aplikace jsou zobrazeny v Tab. 1.

Pomocí radarů lze měřit i rychlost pohybujících se vozidel. Na našich silnicích je spousta řidičů, kteří překračují maximální povolené limity rychlosti. Právě na tyto řidiče má Policie ČR několik typů radarů, které jejich rychlost změří a v případě jejich překročení potrestá. Jen si uvědomme, kolik dopravních nehod se stane nepřiměřenou rychlostí. V této práci se věnujeme prostudování problematiky radarů měřících rychlost vozidel a z těchto poznatků je navržen a zkonstruován CW radar schopný měřit tuto rychlost. Součástí návrhu je programové vybavení ve formě skriptu v programu MATLAB. Návrh je postaven na základě vhodného výběru a propojení již fungujících VF komponentů. Pro začátek je podrobně popsán základní princip a funkce CW radarů.

Označení pásma	Nominální rozsah frekvencí pásma	Některé pásma přidělená radarové službě (v regionu 1 - Evropě)	Příklad aplikace
VHF	30 MHz- 300 MHz		Přehledové vojenské radary
UHF	300 MHz - 1000 MHz		
L	1 GHz 2 GHz	1625 – 1635 MHz	Sekundární radary
S	2 GHz 4 GHz	2,3 – 2,5 GHz; 2,7 – 3,6 GHz	Přehledové radary
C	4 GHz 8 GHz	5,25 – 5,85 GHz	Zbraňové systémy
X	8 GHz 12 GHz	8,5 – 10,68 GHz	Přistávací radary
Ku	12 GHz 18 GHz	13,4 – 14,0 GHz; 15,7 – 17,7 GHz	Bojišťové radary
K	18 GHz 27 GHz	24,05 – 24,25 GHz	Protikolizní automobilové radary
Ka	27 GHz 40 GHz	33,4 – 36 GHz	Policejní radary
V	40 GHz 75 GHz	59 – 64 GHz	
W	75 GHz 110 GHz	76 – 81 GHz; 92 – 95 GHz	Protikolizní automobilové radary

Tab. 1 Některá frekvenční pásma přidělená radarové službě [1]

2. Základní princip CW radaru

Radary s kontinuálním provozem (CW radary) současně vysílají harmonický signál a přijímají odražený signál od pohyblivých cílů. Na rozdíl od impulzních radarů, kdy se pravidelně střídá vysílání a přijímání, mají malý maximální dosah. Zato jsou však celkově jednodušší hardwarové obvody a také obvody pro zpracování Dopplerovy frekvence. Maximální dosah CW radaru je několik desítek až stovek metrů, nad 1 km se prakticky nepoužívají.

2.1 Dopplerův jev

Radary s kontinuálním provozem využívají Dopplerova jevu. Tento jev popisuje kmitočtový rozdíl mezi vyslanou a přijatou vlnou při pohybu vysílače a přijímače (1). Z fyziky je známý příklad se sirénou na pohybuujícím se vozidle. Když se blíží k nám, kmitočet slyšíme vyšší, než když se od nás vozidlo vzdaluje. V roce 1842 toto popsal Christian Doppler (2).

$$f_{dopp} = f_{prij} - f_{vys} \quad [Hz] \quad (1)$$

$$f_{prij} = f_{vys} \cdot \left(\frac{v_{pr} + v_{prij}}{v_{pr} + v_{vys}} \right) \quad [Hz, m \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

kde	f_{prij}	frekvence v místě příjmu
	f_{vys}	vysílaná frekvence ze zdroje
	v_{pr}	rychlost vlny v určitém prostředí
	v_{prij}	rychlost přijímače *
	v_{vys}	rychlost pohybu zdroje *

V našem případě je rychlost šířící se prostředím rychlost světla $c = 3 \cdot 10^8$ [m·s⁻¹], rychlost vysílače je nulová (radar je na statickém místě). Rychlost přijímače za normálních okolností odpovídá rychlosti měřeného objektu. V případě radaru je však přijímána odražená vlna od pohybuujícího se objektu v místě vysílače, vlna tak musí urazit dvojnásobnou vzdálenost. Úpravami se pak dospěje ke vztahu pro výpočet Dopplerovy frekvence pro CW radar (4). Ta je přímo úměrná radiální rychlosti pohybuujícího se objektu.

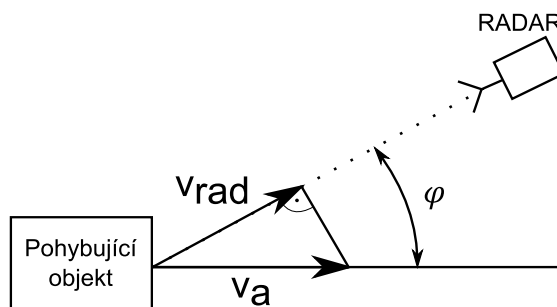
$$f_{prij} = f_{vys} \cdot \left(\frac{c + 2v_{rad}}{c} \right) = f_{vys} + \frac{2v_{rad}f_{vys}}{c} \quad (3)$$

$$f_{dopp} = \left(\frac{2 \cdot v_{prij} \cdot f_{vys}}{c} \right) \quad [Hz, m \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

$$v_{rad} = v_a \cos \varphi \quad (5)$$

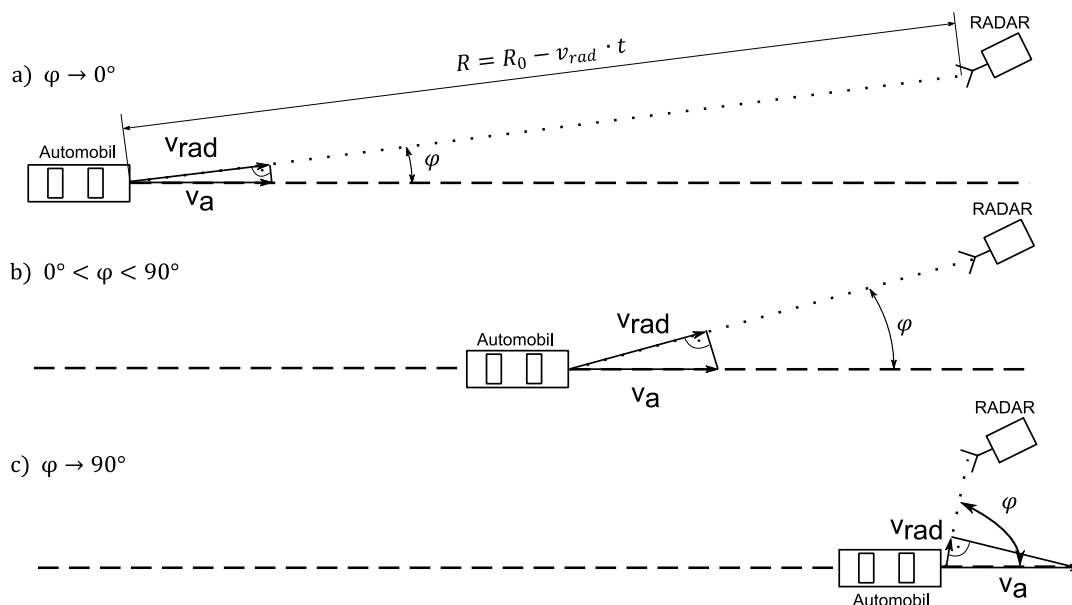
* tyto dvě rychlosti uvažujeme s vzájemně opačným směrem

Radiální rychlost je složka rychlosti objektu v přímé ose radaru a měřeného objektu (Obr. 1). Pokud je znám úhel φ , lze radiální složku rychlosti dopočítat podle vztahu (5).



Obr. 1 Přepočet radiální rychlosti

Při různých vzdálenostech mezi automobilem a radarem mohou nastat následující situace. Pokud je vozidlo ve velké vzdálenosti od radaru, úhel φ se blíží nule, $\cos\varphi$ se blíží jedničce a radiální rychlost je téměř srovnatelná s rychlostí vozidla (Obr. 2 a)). Pokud se vozidlo k radaru přibližuje, úhel roste, $\cos\varphi$ se zmenšuje a radiální rychlost je nižší než skutečná rychlost vozidla (Obr. 2 b)). Jestliže vozidlo míjí radar, úhel φ je téměř 90° , $\cos\varphi$ se přibližuje nule, a proto i radiální rychlost klesá k nule (Obr. 2 c)).



Obr. 2 Závislost radiální rychlosti na úhlu φ

Jsou-li brány v úvahu všechny výše psané skutečnosti a je-li znám úhel φ , dostaneme vztah pro výpočet přesné rychlosti pohybujících se vozidel (6).

$$v_a = \frac{f_{dopp} \cdot c}{2 \cdot f_{vys} \cdot \cos\varphi} \cdot 3,6 \text{ [km} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (6)$$

2.2 CW radary

Princip radaru s kontinuálním provozem (Obr. 3) je vcelku jednoduchý. Základem je oscilátor v mikrovlnném pásmu, může to být například oscilátor s dielektrickým rezonátorem DRO, nebo se smyčkou fázového závěsu PLL. Signál z oscilátoru může být zesílen výkonovým zesilovačem a pokračuje do vysílací antény, která je namířená do prohledávaného prostoru. Úroveň vysílaného výkonu ovlivní vlastnosti radaru, především jeho maximální dosah, případně zlepši detekci malých cílů. Matematicky můžeme vyslaný signál popsat rovnicí (7).

$$s_V(t) = A_V \cdot \cos(2\pi f_V \cdot t + \Psi_V) \quad (7)$$

kde	A_V	amplituda vysílané vlny
	f_V	frekvence vysílané vlny
	Ψ_V	obecná fáze vysílané vlny

Přijatý signál je zeslabená a zpožděná replika vyslaného signálu. Zpoždění τ představuje časový úsek, za který vlna urazí vzdálenost od antén k vozidlu a zpět (8). R_0 představuje referenční vzdálenost.

$$\tau = \frac{2 \cdot (R_0 - v_{rad} \cdot t)}{c} \quad (8)$$

Přijatá vlna je popsána vztahem (9) a má navíc jinou fázi způsobenou odrazem od vozidla Ψ_{odr} .

$$s_P(t) = A_P \cdot \cos(2\pi \cdot f_V \cdot (t - \tau) + \Psi_V + \Psi_{odr}) \quad (9)$$

Z hlediska úrovně se jedná o velmi slabý signál, který musí být dostatečně zesílen. K tomu se používá nízkosumový zesilovač LNA, který má velký zisk a zároveň co nejnižší šumové číslo. Následuje mikrovlnný směšovač, který má dva vstupy. Do vstupu LO jde replika frekvence z oscilátoru s amplitudou A_{LO} a signál můžeme popsat rovnicí (11). Do druhého vstupu RF jde signál z LNA popsaný rovnicí (12). Pro přehlednost vztahů počítáme s úhlovou frekvencí (10).

$$\omega_V = 2\pi f_V \quad (10)$$

$$s_{LO}(t) = A_{LO} \cdot \cos(\omega_V \cdot t + \Psi_V) \quad (11)$$

$$s_{RF}(t) = A_P \cdot G_{LNA} \cdot \cos\left(\left(\omega_V + \frac{2 \cdot \omega_V v_{rad}}{c_0}\right)t - \frac{2 \cdot \omega_V R_0}{c_0} + \Psi_V + \Psi_{odr}\right) \quad (12)$$

Směšovač provede vynásobení těchto dvou signálů (13). Výsledkem jsou dvě složky, jedna s dvojnásobnou vysílací frekvencí $2\omega_v$ a druhá v NF pásmu (14).

$$s_{MIXout}(t) = G_{MIX} \cdot A_P G_{LNA} A_V \cos\left(\left(\omega_v + \frac{2 \omega_v v_{rad}}{c_0}\right)t - \frac{2 \omega_v R_0}{c_0} + \Psi_V + \Psi_{odr}\right) \cdot A_{LO} \cos(\omega_v t + \Psi_V) \quad (13)$$

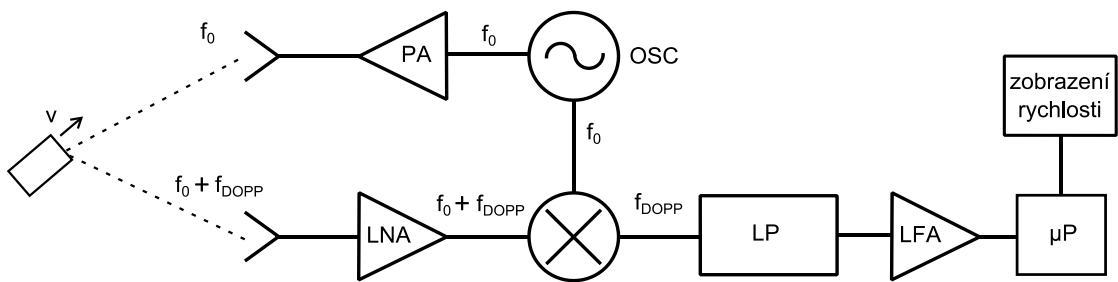
$$s_1(t) = \frac{1}{2} G_{MIX} A_P G_{LNA} A_V A_{LO} \left(\cos\left(2\omega_v t + \frac{2 \cdot \omega_v v_{rad}}{c_0} t - \frac{2 \cdot \omega_v R_0}{c_0} + 2 \Psi_V + \Psi_{odr}\right) + \cos\left(\frac{2 \omega_v v_{rad}}{c_0} t - \frac{2 \omega_v R_0}{c_0} + \Psi_{odr}\right) \right) \quad (14)$$

To je právě požadovaná rozdílová NF složka, která obsahuje Dopplerovu frekvenci. Filtrem DP vybereme jen požadovanou složku (15), úpravou vztahu dostaneme harmonický signál s amplitudou A_{NF} , Dopplerovou frekvencí f_{dopp} a obecnou nízkofrekvenční fází Ψ_{NF} (16).

$$s_{NF}(t) = \frac{1}{2} G_{MIX} A_P G_{LNA} A_V A_{LO} \cos\left(\frac{2 \omega_v v_{rad} t}{c_0} + \Psi_{NF}\right) \quad (15)$$

$$s_{NF}(t) = A_{NF} \cos(2\pi f_{dopp} t + \Psi_{NF}) \quad (16)$$

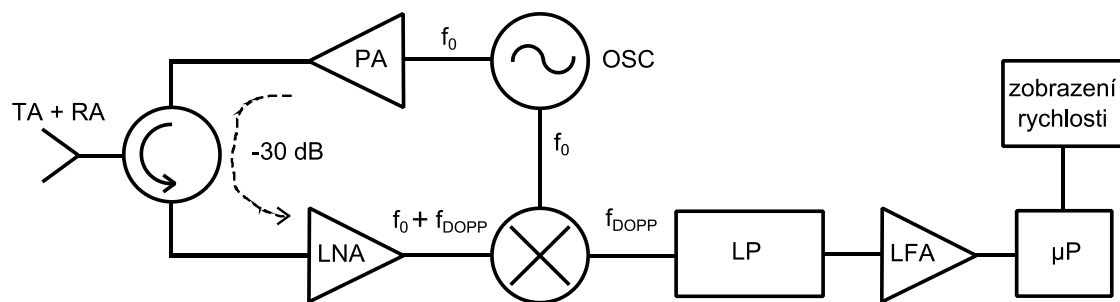
Směšovače mohou mít i více výstupů, tj. když se jedná o tzv. kvadrurní směšovač. Jsou to výstupy I a Q, mezi nimiž je fázový posuv $\pi/2$. Tímto směšovačem rozlišíme cíle, které se k nám přibližují, nebo naopak vzdalují.



Obr. 3 Princip CW radaru

Za směšovačem už následuje nízkofrekvenční zpracování signálu. Filtrem dolní propusti omezí spektrum signálu shora a nepropustí tak dále nežádoucí VF složky. Za touto propustí můžeme signál dále zesílit na požadovanou úroveň potřebnou pro správnou funkci A/D převodníku. Ten může být součástí mikropočítače, který Dopplerovu frekvenci přepočítá na rychlost objektu.

Pokud chceme používat jednu společnou anténu pro vysílání i příjem (Obr. 4), k úpravě zapojení se použije cirkulátor. Cirkulátor je VF obvod, který má obvykle 3 brány a propouští mezi nimi signál pouze jedním směrem. Nevýhodou zapojení s cirkulátorem by mohla být jeho konečná izolace mezi vstupní bránou z výkonového zesilovače a výstupní bránou do přijímací části. Tento útlum se řádově pohybuje maximálně kolem 30dB. Problémem ale bude spíše zpětný odraz RL na vstupu antény. U dobře navržených antén může být větší než 20 dB. Pokud ale bude mít hodnotu nižší, kolem 10dB, může nastat přebuzení vstupu LNA a zhorší se tak detekce přijatého signálu z antény. Proto se s jednou anténou používají spíše radary v pulzním režimu, kde v určité době pouze vysíláme a jinou dobu přijímáme. V našem návrhu používáme první zapojení (Obr. 3) se dvěma totožnými anténami bez cirkulátoru. Zde může dojít k přeslechům mezi anténami, pokud se ale vhodně umístí s určitým rozestupem, velké přeslechy nehrozí.



Obr. 4 CW radar s jednou anténou

2.3 Radarová rovnice

Radarová rovnice udává vztah mezi vyslaným a přijatým výkonem. Tuto výkonovou bilanci ovlivňuje několik jevů. Jedním z nich je pokles hustoty výkonu při šíření volným prostorem podle vztahu (17). Tato hustota je závislá především na vzdálenosti R a na vlastnostech vysílací antény. Vlna má ve vzdálenosti R charakter kulové vlny a její hustota výkonu klesá úměrně $1/(4\pi R^2)$.

$$S_1 = P_V \frac{G_V f_V^2(\varphi, \vartheta)}{4\pi R^2} \quad (17)$$

kde	P_V	vysílaný výkon
	G_V	zisk vysílací antény
	f_V	vyzařovací charakteristika vysílací antény
	R	vzdálenost objektu od radaru

Po dopadu vlny na objekt se vlna rozptýlí a část odrazí zpět k radaru. Hustota výkonu odražené vlny je pak dána vztahem (18)

$$S_2 = S_1 \cdot \frac{RCS}{4\pi R^2} \quad (18)$$

kde RCS je efektivní odrazná plocha objektu v m^2 , na něž vlna dopadne. Odražená vlna dorazí na přijímací anténu radaru. Přijatý výkon závisí na efektivní ploše antény podle vztahu (19).

$$P_P = A_{effP} \cdot f_P \cdot S_2 = \frac{G_P \lambda^2}{4\pi} f_P \cdot S_2 \quad (19)$$

kde	P_P	přijímaný výkon
	A_{effP}	efektivní plocha přijímací antény
	G_P	zisk přijímací antény
	f_P	vyzařovací charakteristika přijímací antény
	λ	vlnová délka nosné vlny

Celkový vztah pro výpočet přijatého výkonu pak je (20). Z něj dokážeme vypočítat maximální dosah radaru [1].

$$P_P = P_V \frac{G_V G_P f_V^2(\varphi, \vartheta) f_P^2(\varphi, \vartheta) \lambda^2 RCS}{(4\pi)^3 R^4} \quad (20)$$

3. Policejní měřiče rychlosti

Policie ČR má pravomoc měřit rychlost vozidel a v případě jejího překročení nad povolený limit pokutovat řidiče. K měření rychlosti se používá několik typů radarů. Všechny tyto měřiče musí být schváleny Českým metrologickým institutem. V této kapitole si nejpoužívanější typy představíme.

3.1 Mikrovlnné radary

Nejrozšířenější technologií u nás jsou mikrovlnné radary RAMER od firmy Ramet a.s. která sídlí v Kunovicích ve zlínském kraji. Tyto radary mají i ve srovnání s ostatními světovými výrobci prvotřídní technické parametry.

Fungují na principu CW radaru, měří se Dopplerova frekvence signálu odraženého od vozidel a následně se zpracovává. Elektromagnetická VF vlna vysílaná malou parabolickou anténou se odrazí od karoserie vozidla zpět k anténě radaru a je dále zpracována a elektronickými obvody je vypočtena rychlost vozidla s určitou tolerancí. Při rychlosti do 100 km/h je to ± 3 km/h, nad 100 km/h se udává chyba 3%. S těmito radary se obvykle měří rychlost pod úhlem $\varphi = 22^\circ$.

3.1.1 RAMER AD a RAMER 7M

Policie má v provozu přibližně 400 radarů této značky. Pracují v pásmu Ka na frekvencích 34 GHz a 34,3 GHz. Vysílaný signál je úzce směrový, šířka svazku je 5° . Typ 7M má velmi nízký vysílací výkon, řádově to jsou jednotky miliwatů a i přes nízký výkon je jeho maximální dosah okolo šedesáti metrů. Obvykle se ale rychlost měří přibližně na 35 metrů. Při překročení rychlosti je videokamerou pořízen snímek rychle jedoucího vozidla a přenesen do PC.

Radary typu 7M jsou montovány i do civilních neoznačených automobilů. Radarovou hlavu, tzv. „bradavici“, mají zabudovanou v přední masce, v interiéru automobilu před spolujezdcem pak řídící panel s počítačem. Tyto radary se také montují do statických kovových skříní podél některých silnic. Ty jsou po většinu času prázdné, radar se umístí jen do některých z nich a lze jej přenášet. Radar lze také umístit na stativ, jako „trojnožku“ [2].

3.1.2 RAMER 10

Tato verze radarového měřiče rychlosti pracuje také na principu Dopplerovy frekvence. Pracuje na kmitočtech 34 GHz, 34.3 GHz nebo 24.125 GHz. Při měření pokryje až 4 jízdní pruhy, při přestupku pořídí digitální fotografii o vysokém rozlišení (až 16 megapixelů). Umí komunikace prostřednictvím standardních rozhraní VGA, síť LAN, WiFi, USB. Jeho součástí je i modul GPS pro lokalizaci místa měření.

S radary tohoto typu se můžeme díky modulární konstrukci setkat v různých modifikacích. Prvním je radarový měřič na stativu, tzv. „trojnožka“, označená jako RAMER 10 T. Lze i jednoduše použít ve vozidle na speciálním platu v zavazadlovém prostoru, kde umožní měření ze stojícího vozidla při otevřeném zavazadlovém prostoru a odpadá tak nutnost složité zástavby do přední masky automobilu. Měřicí blok radaru RAMER 10 T lze snadno umístit

do skříně na sloupu - verze RAMER 10 P. Poslední modifikací je montáž radaru do přední části automobilu, označené jako RAMER 10 C, které se montují do automobilů Škoda Superb nebo Škoda Octavia. [3].



Obr. 5 Radar typu RAMER 10 (zdroj: ramet.as)

3.1.3 Inteligentní radary s OCR

Na podzim roku 2014 byly představeny nové typy radarů, které nejenže zaznamenají rychlost vozidla, ale také dokáží zobrazit SPZ jedoucího vozidla a záznam odeslat provozovateli. Tento systém vyvinula společnost ELTODO ve spolupráci s Ředitelstvím silnic a dálnic. Tyto radary změří aktuální rychlost a pomocí funkce optického rozpoznávání znaků OCR[†] zobrazí oba údaje na zobrazovacím zařízení. Tento systém se již testoval na dálnici D1. Dokáže měřit rychlost až do 200 km/h s odchylkou tří procent a dokáže rozpoznat nejméně 85 % SPZ z více než dvaceti evropských zemí. Systém umí naměřené hodnoty rovněž uchovat a provozovatel si je následně může dálkově stáhnout přes webové rozhraní [4]. Ve druhém čtvrtletí roku 2015 navrhlo ministerstvo dopravy další nákup těchto inteligentních radarů v hodnotě několika miliard, aby se s jejich pomocí zlepšilo dosavadní chaotické plánování uzavírek na našich silnicích a předcházelo se tak nepříjemným kolonám. Do budoucna by to mělo fungovat tak, že Národní dopravní informační centrum bude nepřetržitě kontrolovat všechny informace o dopravních situacích z našich dálnic a pomocí superpočítačů vše rychle vyhodnocovat a posílat řidičům informace a pokyny rovnou do digitálních tabulí podél dálnic. Všichni tak budou aktuálně vědět, co se kde děje [5].

[†] Optical Character Recognition - pomocí kamery umožňuje digitalizaci textu na SPZ, s nímž pak lze pracovat jako s normálním počítačovým textem



Obr. 6 Radar firmy Eltodo ve zkušebním provozu (zdroj: idnes.cz)

3.1.4 Informační panely

Dalším typem měřičů jsou informační panely pro měření rychlosti. Pracují opět na principu CW radaru a měření Dopplerovské frekvence. Ty používají především Magistráty měst. Tyto panely slouží pouze jako prevence proti překračování maximální povolené rychlosti. Součástí některých panelů je i kamera, jedná se však většinou o imitaci. Tyto radary nemají žádné záznamové zařízení k detekci přestupků. Mohou pořizovat pouze statistické záznamy. Dodává je především firma RAMET a.s. a NWK TECHNOLOGY s.r.o.

3.3 Ostatní druhy měřičů

3.2.1 Úsekové měřiče

Kromě mikrovlnných radarů jsou využívány i radary na jiných principech. Jedním z nich jsou úsekové měřiče. Tímto typem je měřena průměrná rychlost daného úseku. Jedná se o pasivní formu měření rychlosti. Kamery nad vozovkou zaznamenají vjezd a výjezd vozidla z měřeného úseku, zaznamenají SPZ vozidla při obou průjezdech a na základě známé vzdálenosti úseku a času průjezdu vypočítají průměrnou rychlost v tomto úseku. Zařízení se nedá oklamat ani změnou jízdního pruhu, protože kamery monitorují všechny jízdní pruhy a data jsou vyhodnocována jedním zařízením.

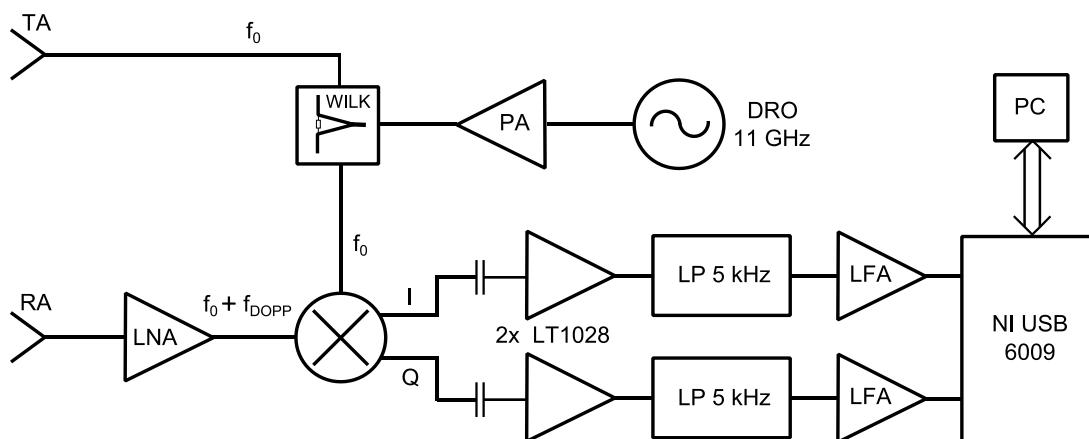
Podobným měřičem jsou tzv. miniúsekovky. Ve vozovce jsou zabudovány senzory – indukční smyčky, vzdálené 1 metr od sebe a nad nimi je kamera zaznamenávající SPZ vozidla. Pomocí počítače je vypočtena rychlost v tomto krátkém úseku.

3.2.2 Laserové měřiče

Měření rychlosti lze provádět i pomocí neviditelných světelných paprsků (infračervené spektrum). Tyto měřiče jsou spíše označovány jako LIDAR (LIght Detection And Ranging). Místo antén se jako vysílač používá laser (bezpečnostní třída 1) a jako přijímač optický fotodetektor. Maximální odchylka měření je o něco menší než u mikrovlnných radarů, a to ± 2 km/h. Tyto měřiče jsou cenově výhodnější než radarová zařízení. Většinou mají v sobě i funkci měření vzdáleností (přesnost ± 10 cm), což se může hodit nejen při dokumentaci dopravních nehod.

4. Návrh radaru

Z předešlých poznatků bylo možné dát dohromady blokové schéma radaru, který realizujeme. Toto schéma je zobrazené na obrázku (Obr. 7). Navržený radar pracuje v pásmu X na frekvenci 11 GHz.



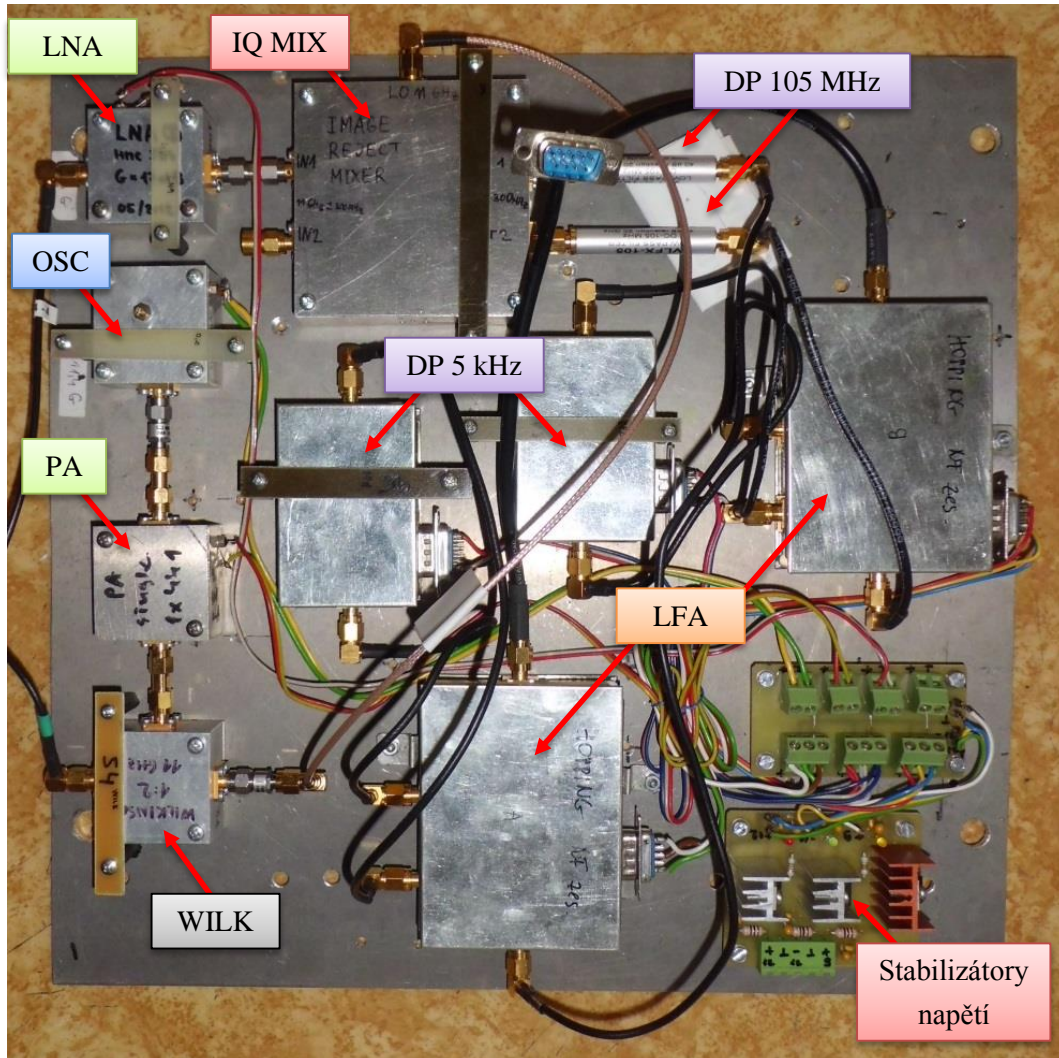
Obr. 7 Principiální schéma navrženého radaru

Jako zdroj VF signálu je vybrán oscilátor s dielektrickým rezonančním obvodem s výstupním výkonem okolo 10dBm. Za oscilátorem je výkonový zesilovač. Následuje mikrovlnný dělič výkonu, používáme Wilkinsonův dělič. Z jedné jeho větve je signál posílán do vysílací antény. Z druhé větve do směšovače na vstup lokálního oscilátoru. Odražený signál z prostoru přijímáme přijímací anténou, která má totožné parametry s anténou vysílací. Přijatý signál je zesílen v nízkošumovém zesilovači. Dále následuje kvadrurní směšovač se dvěma výstupy. Za ním je nízkofrekvenční zpracování signálu. Nejprve se odfiltruje stejnosměrná složka, pak se signál zesílí nízkošumovým nízkofrekvenčním zesilovačem. Následuje filtr dolní propusti, který omezí frekvenční spektrum signálu shora. Za ním je signál zesílen na vhodnou úroveň a poslán na vstup A/D převodníku, který komunikuje s osobním počítačem.

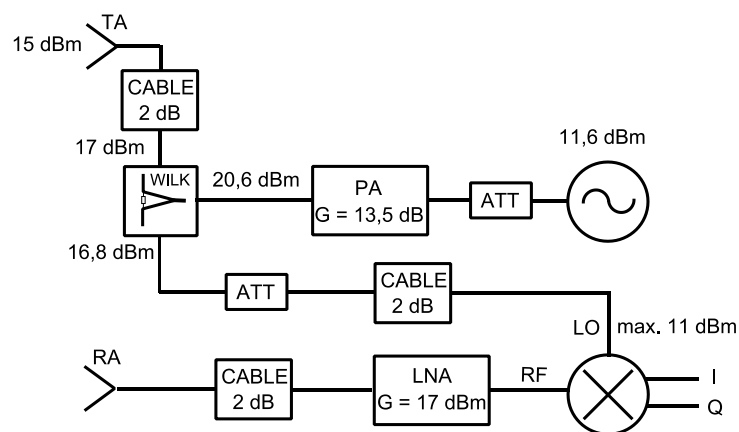
Podle zadání musí radar měřit rychlosti od 20km/h do 200km/h. Těmto rychlostem podle rovnice (4) odpovídá Dopplerova frekvence od 407,4 Hz do 4074 Hz. Aby byla nějaká rezerva, omezí se signál shora na 5 kHz. Spodní oříznutí kmitočtu se provede až softwarově.

4.1 Jednotlivé bloky radaru

V této kapitole jsou jednotlivě představeny bloky, ze kterých je celý radar sestaven. Pro názornost je zde Obr. 8, kde je naznačeno rozmístění bloků na základní desce.



Obr. 8 Rozmístění bloků na základnové desce



Obr. 9 Výkonový návrh

4.1.1 Popis bloků

Oscilátor

Generátorem vysoké frekvence je tranzistorový oscilátor s dielektrickým rezonátorem na frekvenci 10,9706 GHz a s výstupním výkonem 11,6 dBm.

Výkonový zesilovač

Za oscilátorem je v našem zapojení použit výkonový zesilovač firmy Hittite, konkrétní typ HMC 441. Na jeho vstupu je zařazen dvoudecibellový atenuátor, aby bylo eliminováno ovlivnění oscilátoru způsobené možnými odrazy na vstupu zesilovače a také aby se zbytečně nepřebudil jeho vstup velkým výkonem. Katalogový zisk zesilovače je $G = 15,5$ dB a maximální výkon na výstupu $P_{MAX} = 22$ dB. Měřením jeho parametrů se zjistily trochu jiné hodnoty. Skutečný zisk je $G = 13,5$ dB a do saturace se dostane při výstupním výkonu $P_{MAX} = 20,6$ dBm. Pokud je od výkonu oscilátoru odečten útlum atenuátoru a přičten zisk zesilovače, výstupní výkon je $P = 23,1$ dBm, což je více než zesilovač dokáže dát, pracuje tak v saturačním režimu.



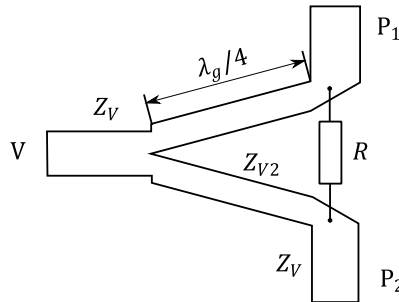
Obr. 10 Změřené moduly s-parametrů PA

PA	
dB S11 (RL _{in})	-10,7 dB
dB S12	-35,5 dB
dB S21 (G)	13,4 dB
dB S22 (RL _{out})	-12,8 dB

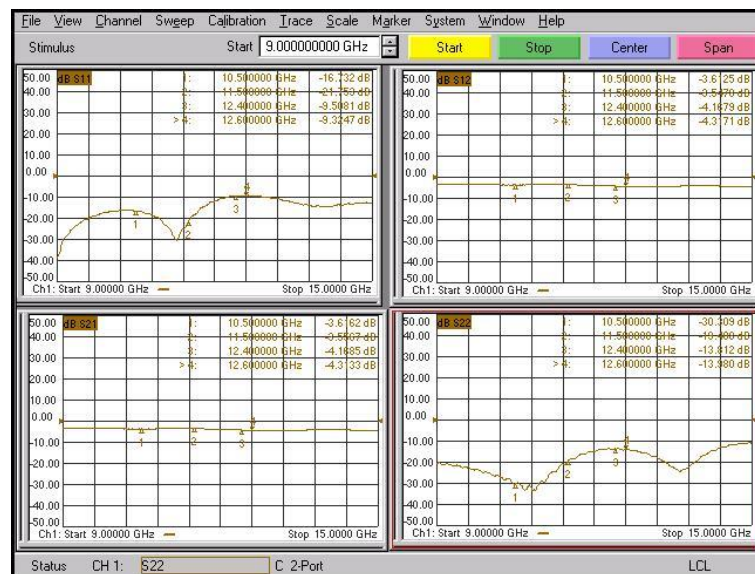
Tab. 2 Parametry PA na návrhové frekvenci

Wilkinsonův dělič výkonu

Wilkinsonův dělič rozdělí VF výkon z jednoho vstupu V na dva výstupy P₁ a P₂. Ty mají stejnou fázi, stejnou impedanci vedení jako vstup. Obr. 11 ukazuje planární strukturu děliče 3 dB [6]. Na jeho vstup je poslán výkon 20,6 dBm (Obr. 9). Měřením se zjistilo, že jeho dělicí poměr je mírně nesymetrický. Na bránu P₁ jde výkon utlumený o 3,6 dB, na P₂ o 3,8 dB. Vyšší výkon pak posíláme na vysílací anténu kabelem s útlumem 2 dB. Na anténu jde vysílací výkon P_V = 15 dBm. Druhý výstup děliče je připojen přes atenuátor na vstup LO směšovače. V Tab. 3 vidíme změřené moduly s-parametrů děliče na frekvenci 11 GHz.



Obr. 11 Wilkinsonův dělič 1:1



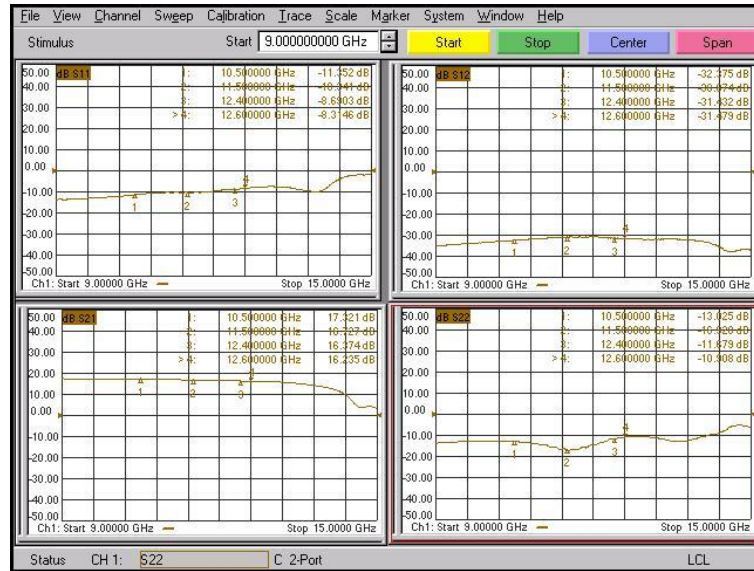
Obr. 12 Změřené parametry Wilkinsonova děliče V – P1

WILK			
	V-P1	V-P2	P1-P2
dB S ₁₁ (R _L _{in})	-21 dB	-21 dB	-30 dB
dB S ₁₂ = S ₂₁	-3,6 dB	-3,8 dB	-20 dB
dB S ₂₂ (R _L _{out})	-30 dB	-25 dB	-25 dB

Tab. 3 Parametry děliče na návrhové frekvenci

Nízkošumový zesilovač

Za přijímací anténou je nízkošumový zesilovač HMC 564 také od firmy Hittite. Jeho katalogový zisk se shoduje s měřeným, $G = 17$ dB. Dále disponuje velmi příznivým šumovým číslem $F = 1,8$ dB. Moduly jeho s-parametrů jsou změřené na Obr. 13. a hodnoty na návrhové frekvenci v Tab. 4.



Obr. 13 Změřené parametry LNA

LNA	
dB S11 (RL _{in})	-10,9 dB
dB S12	-31,6 dB
dB S21 (G)	17 dB
dB S22 (RL _{out})	-15 dB

Tab. 4 Parametry LNA na frekvenci 11 GHz

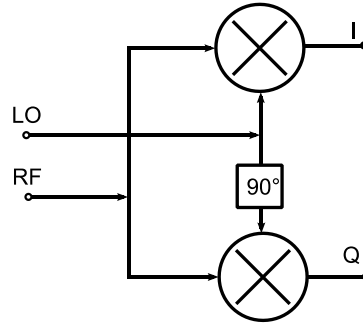
Kvadrurní směšovač

U směšovačů je využíváno nelinearit 2. řádu. V našem případě je používán směšovač jako downconverter, to znamená rozdíl dvou vysokofrekvenčních signálů, který má frekvenci mnohem nižší, než vstupní signály. U směšovačů nás zajímají především konverzní ztráty $L_{konverz}$. Vypočítají se podle vztahu (21) a jsou závislé především na výkonu vstupu lokálního oscilátoru P_{LO} [7], [8].

$$L_{konverz} = P_{RF} - P_{out} \text{ [dB]} \quad (21)$$

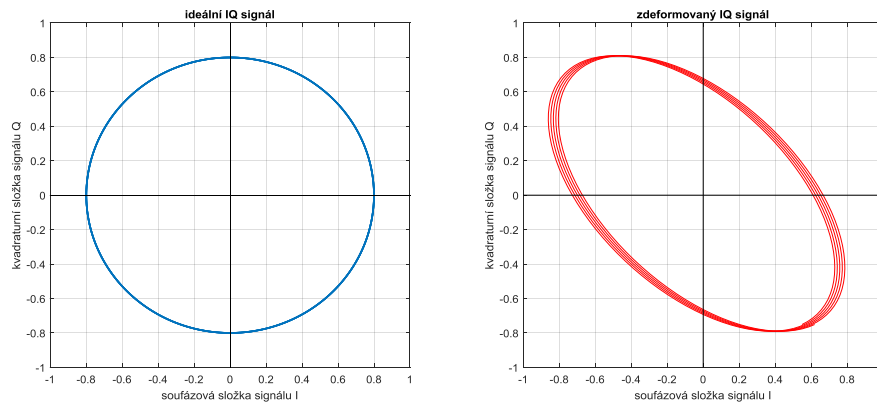
kde P_{RF} vstupní VF výkon
 P_{out} výstupní výkon ze směšovače

Pro správnou funkci směšovače je vstupní výkon P_{RF} řádově menší než výkon P_{LO} .



Obr. 14 Struktura IQ směšovače

Princip kvadrurního směšovače je znázorněn na Obr. 14. Vstupní RF signál je rozdělen děličem na vstupy dvou směšovačů. Druhý vstupní signál LO je také rozdělen, ale do jednoho směšovače je veden přes fázový posouvač. Na výstupech potom jsou dva signály s rozdílnou fází. Ta by měla být přesně 90°. V praxi je u těchto směšovačů nesymetrie těchto výstupů. Pokud je RF signál odražený od pohybujícího se objektu, měl by se I a Q signál v komplexním zobrazení znázorňovat jako kruh. Nedokonalým fázovým posouvačem může být zobrazený signál různě zdeformován a vypadat například jako elipsa (Obr. 15).



Obr. 15 Signál z kvadrurního směšovače

Na vstupu směšovače RF je signál daný vztahem (12) z kapitoly (2.2). Signál LO se ve směšovači rozdělí na dvě části, jedna bez změn (22), druhá s fázovým posuvem $\pi/2$ (23). Směšovač tyto signály vynásobí a na výstupech pak podle úprav v kapitole (2.2) vyjdou po filtraci DP složky I a Q, popsané vztahy (24),(25). Je mezi nimi také fázový posuv $\pi/2$. Toho je využito především při rozpoznávání směru pohybu měřeného vozidla.

$$s_{LO1}(t) = A_{LO1} \cdot \cos(2\pi \cdot f_V \cdot t + \Psi_V) \quad (22)$$

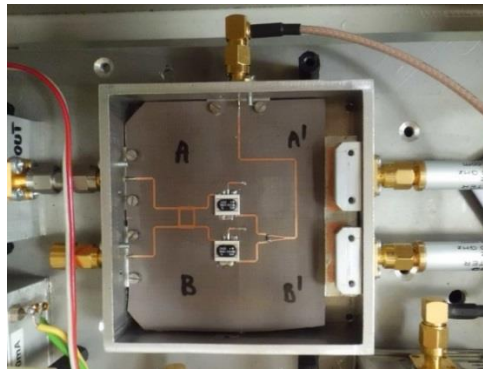
$$s_{LO2}(t) = A_{LO2} \cdot \cos(2\pi \cdot f_V \cdot t + \Psi_V - \frac{\pi}{2}) \quad (23)$$

$$s_{NFI}(t) = s_{LO1}(t) \cdot s_{RF}(t) = A_{NFI} \cos(2\pi f_{dopp} t + \Psi') \quad (24)$$

$$s_{NFQ}(t) = s_{LO2}(t) \cdot s_{RF}(t) = A_{NFQ} \cos\left(2\pi f_{dopp} t + \Psi' - \frac{\pi}{2}\right) \quad (25)$$

Do radaru byl použit postavený směšovač s dvěma prvky MCA1-12GL (Obr. 16). Signál na vstupu LO se uvnitř rozdělí Wilkinsonovým děličem mezi dva směšovače. Na každý je dodán výkon $P_{LO} = 6$ dBm. Postavený kvadrurní směšovač má dva vstupy. Na jeden je přiveden RF signál z LNA (brána označená na Obr. 16 písmenem A), druhá brána B je bezodrazově zakončena. Uvnitř je zapojen vazební člen (Branch Line Couplers) [6], který má na výstupech RF signál bez fázového posuvu a signál s fázovým posuvem 90° . Ty dále vedou do směšovačů. NF výstupy směšovačů jsou v Obr. 16 označeny A' a B'.

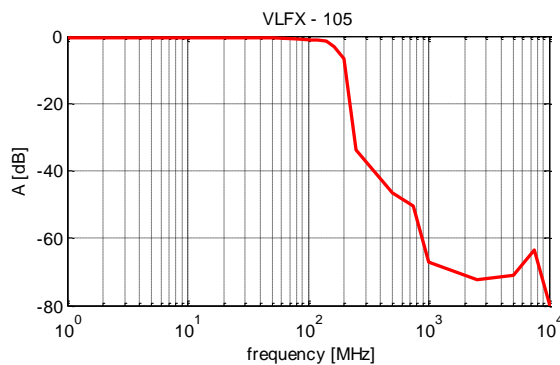
Na vstup LO kvadrurního směšovače je dodáván signál z děliče přes vhodně zvolený attenuátor. Maximální možný výkon na tomto vstupu je $P_{LOmax} = 11$ dBm. Z děliče vychází výkon 16,8 dBm, útlum kabelu je 2 dB, attenuátor je zvolen s útlumem 5 dB a na vstup LO jde signál s úrovní $P_{LO} = 9,8$ dBm. Konverzní ztráty jednoho směšovače jsou podle katalogu v tomto pracovním bodě 6 dB, k celkovým ztrátám přičteme ještě útlum signálu na vazebním členu uvnitř kvadrurního směšovače, $L_{MIX} = 6$ dB + 3 dB = 9 dB.



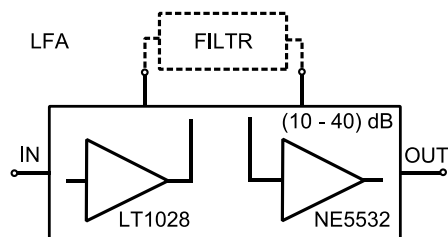
Obr. 16 Použitý kvadrurní směšovač

Nízkofrekvenční část zpracování signálu

Na výstupech směšovačů jsou nejprve filtry DP firmy Minicircuit VLFX-105 propouštějící frekvence 0 až 105 MHz. Jsou zde proto, aby zabránily průniku nežádoucích složek signálu vzniklých na směšovači, které by mohly přebudit vstup NF zesilovače. Na Obr. 17 je znázorněna jeho charakteristika, do 105MHz má vnitřní útlum menší než 1 dB, nad 350 MHz utlumí frekvence o více než 40 dB a nepropustné pásmo je zaručeno do více než 20GHz. Za nimi je zapojena soustava zesilovačů s dalšími filtry a volitelným ziskem na výstupu.

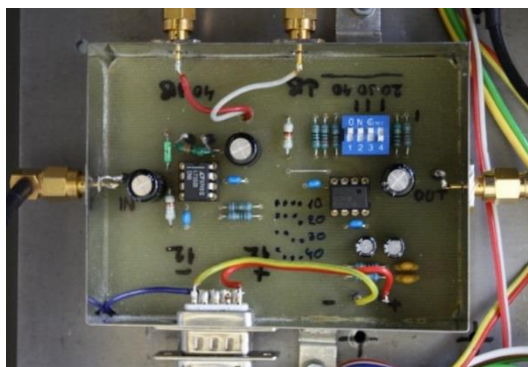


Obr. 17 Přenos filtru VLFX - 105



Obr. 18 Schéma LFA

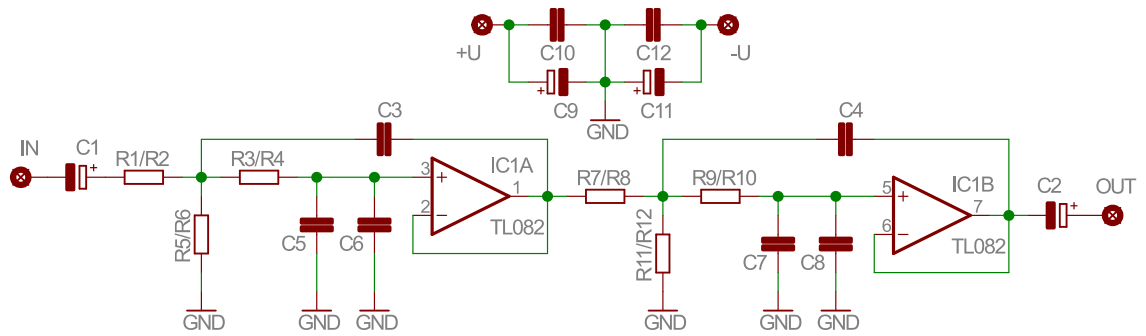
Prvním v kaskádě je nízkošumový nízkofrekvenční zesilovač s obvodem LT1028 v neinvertujícím zapojení. Za ním následuje zesilovač s nastavitelným ziskem výstupního signálu. Je to neinvertující zapojení obvodu NE5532 a zisk volíme v rozsahu 10 až 40 dB s krokem 10 dB pomocí čtveřice přepínačů. Mezi zesilovači jsou SMA konektory pro možnost připojení filtru. Na tyto konektory připojíme filtr dolní propusti.



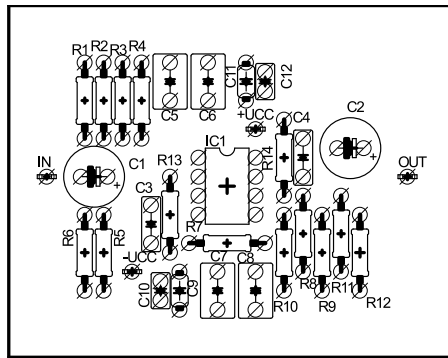
Obr. 19 Nízkofrekvenční nízkošumový zesilovač

4.1.2 Návrh filtru dolní propusti

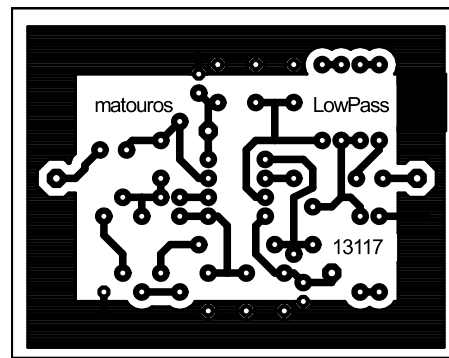
Aby byly NF signály dobře zpracovány, je třeba omezit šířku pásma před vstupem do převodníku. K tomu se použije filtr dolní propusti. Horní mezní kmitočet je stanoven na frekvenci 5 kHz. Návrh tohoto filtru je vytvořen pomocí programu SYNT FIL (<http://syntfil.feld.cvut.cz/>). Do programu byl zadán požadovaný typ filtru, vhodně nastavená aproximační úloha. Výstupem programu je schéma s operačními zesilovači a R, C součástkami. Hodnoty těchto součástek obvykle nesedí do hodnotových E-řad. Proto je u rezistorů použita vhodná sériová kombinace, aby se co nejvíce přiblížila požadované hodnotě odporu. U kondenzátorů je dosaženo požadované kapacity paralelním spojením, jejich hodnoty se pak také sčítají. Seznam součástek je v Tab. 5. V programu EAGLE byl navržen plošný spoj (Obr. 20), který byl poté realizován a osazen ve dvou kusech (Obr. 22). Frekvenční charakteristika filtru je na Obr. 21. Měřením bylo zjištěno, že útlum na polovině vzorkovací frekvence převodníku 12 kHz je -39 dB.



a)



b)

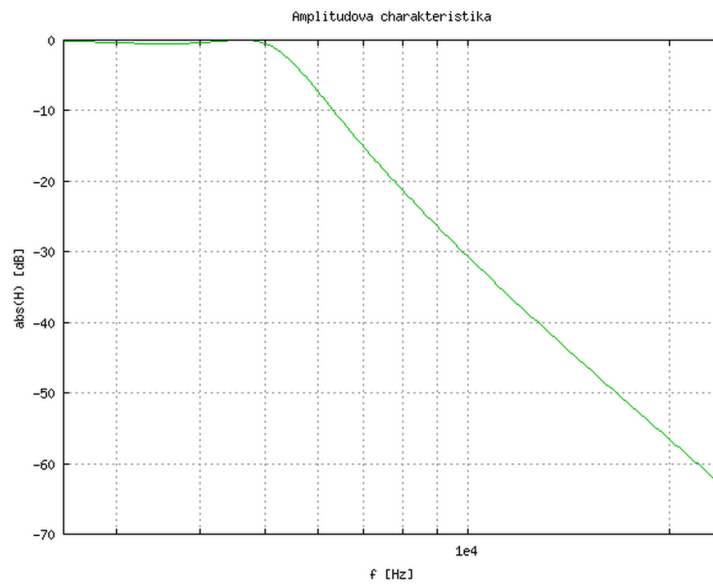


c)

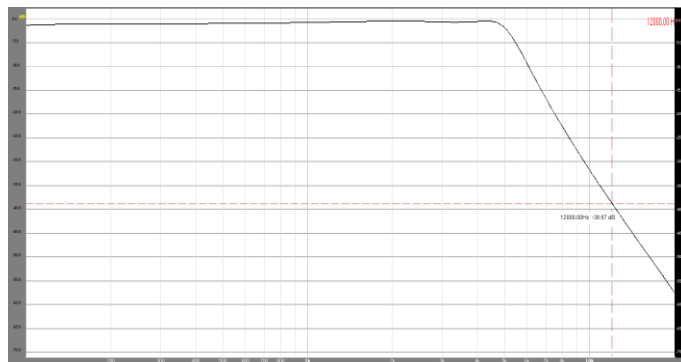
Obr. 20 Návrh dolní propusti a) schéma zapojení, b) strana součástek, c) plošný spoj (1:1)

označení	hodnota [F]	označení	hodnota [Ω]
C1	33 u	R1	18 k
C2	33 u	R2	680
C3	10 n	R3	18 k
C4	10 n	R4	150
C5	150 p	R5	560 k
C6	150 p	R6	82 k
C7	4,7 n	R7	6,8 k
C8	330 p	R8	1 k
C9	2,2 u	R9	6,8 k
C10	100 n	R10	680
C11	2,2 u	R11	220 k
C12	100 n	R12	47 k
IC1	TL082		

Tab. 5 Seznam součástek dolní propusti

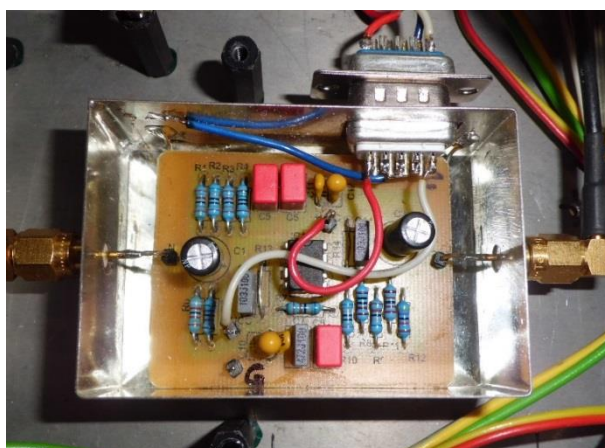


a)



b)

Obr. 21 Frekvenční spektrum dolní propusti a) simulované, b) změřené



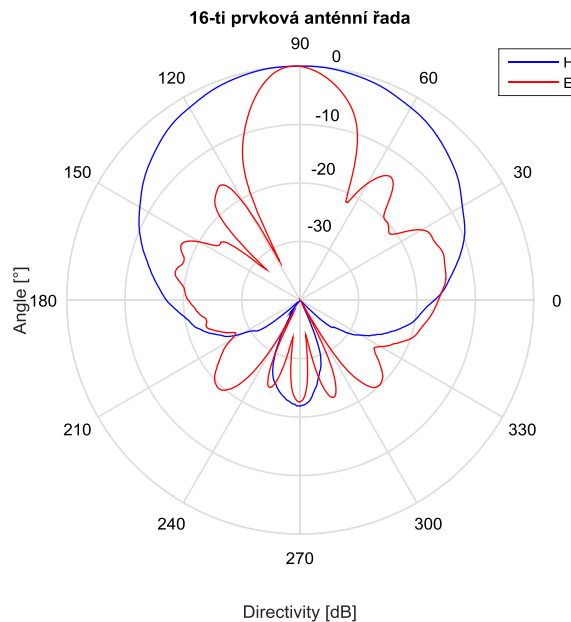
Obr. 22 Realizovaná dolní propust

4.1.3 Antény

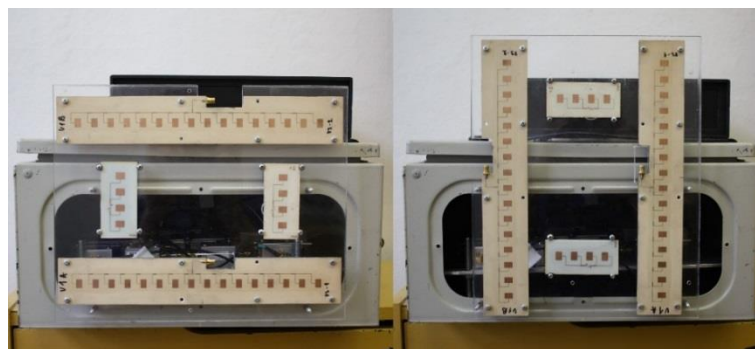
K radaru je třeba dvojice antén s totožnými parametry. K dispozici jsou dvě dvojice patchových anténních řad. Jsou to dvě 16-prvkové řady a dvě 4-prvkové řady. Všechny pracují na frekvenci v okolí 11GHz a RL mají větší než 10 dB. Jde o antény s užším vyzářovacím svazkem v E rovině (Obr. 23). Všechny antény byly přimontovány na základnu z plexiskla v univerzálním uspořádání. Dvojice anténních řad musí mít mezi sebou určitý rozestup, kvůli možným přeslechům G_{AA} . Při rozestupu 15 cm mezi každou dvojicí je méně než $G_{AA} < -50$ dB. 16-prvková anténní řada má při uspořádání na Obr. 24 a) úzký svazek v horizontální rovině, široký svazek ve vertikální rovině. Čtyřprvková řada podle téhož obrázku má široký svazek v horizontální rovině a úzký svazek ve vertikální rovině. Pokud jsou antény přimontovány jako na Obr. 24 b), jsou všechny charakteristiky naopak. Je možno si tak vybrat, jakou dvojicí chceme v jaké rovině vysílat/přijímat. Měřené charakteristiky 16-prvkové anténní řady v obou rovinách jsou na Obr. 23. Ze směrových diagramů anténních řad můžeme přibližně vypočítat jejich směrovost a zisk podle vztahu (26). Pokud jsou předpokládáné anténní ztráty 1 dB, dosazením do vztahu dostaneme zisk šestnácti prvkové řady $G_{16p} = 13$ dB, čtyř prvkové o něco nižší $G_{4p} = 8$ dB.

$$G = D \cdot \eta \cong \frac{41\,253}{\theta_E \theta_H} \cdot \eta \quad (26)$$

kde	G	zisk antény
	D	směrovost antény
	η	účinnost antény
	Θ_E	šířka svazku pro pokles o 3 dB v rovině E
	Θ_H	šířka svazku pro pokles o 3 dB v rovině H



Obr. 23 Vyzářovací diagram 16-ti prvkové anténní řady



a)

b)

Obr. 24 Možné způsoby přimontování antén a) horizontální, b) vertikální

4.1.4 Napájecí zdroj

Pro napájení všech aktivních bloků uvnitř radaru slouží zdroj umístěný v černé plastové skříňce mimo plechovou krabici radaru (Obr. 25). Jedná se o síťové transformátory s můstkovými usměrňovači a jednoduchými filtry. Na jejich výstupu je jedno symetrické a jedno nesymetrické nestabilizované stejnosměrné napětí. Stabilizátory jsou umístěny až uvnitř plechové krabice radaru, aby byly co nejbližší zátěži. Aktivní bloky požadují buď symetrické napětí ± 12 V, nebo nesymetrické +9 V.

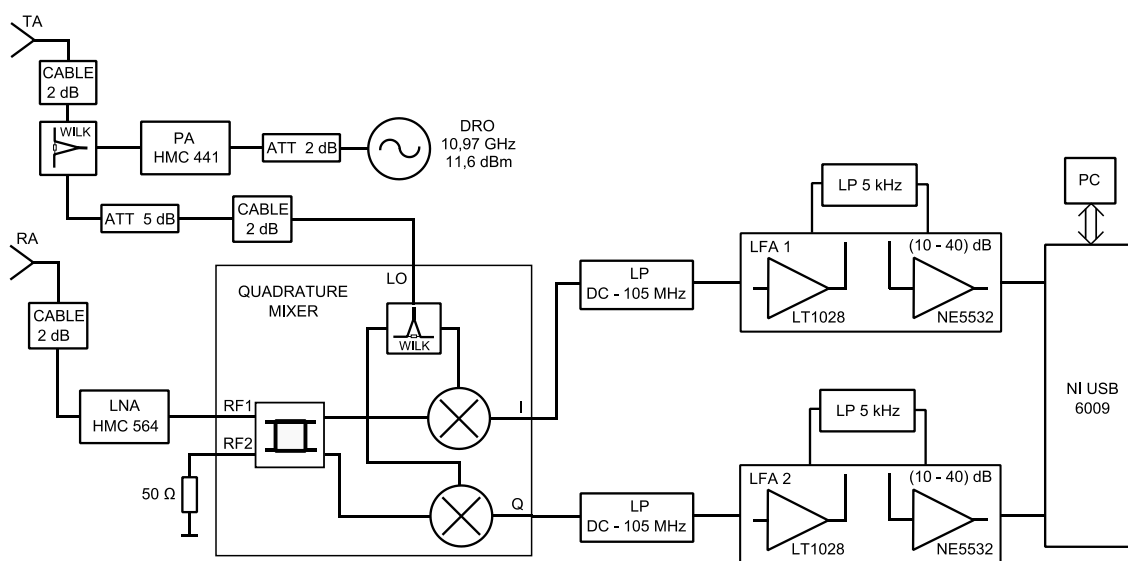
V terénu není snadný přístup k síti 230 V, proto si pomůžeme DC/AC převodníkem z 12 V zdroje na síťové napětí 230 V. Radar odebírá výkon přibližně 13 W. K dispozici jsme měli olověný akumulátor s kapacitou 1,3 Ah, který dokázal napájet radar více než půl hodiny, což bylo pro naše měření dostačující.



Obr. 25 Napájecí zdroj



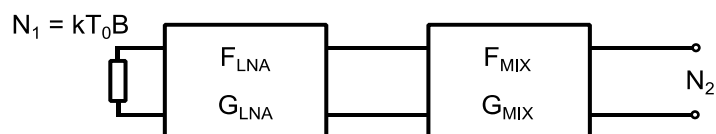
Obr. 26 Realizace radaru



Obr. 27 Podrobné schéma navrženého radaru.

4.2 Výpočty radarová rovnice

Aby byl vypočítán dosah radaru, je třeba znát mnoho dalších parametrů přijímače. Nejprve je vypočteno jeho šumového číslo. Jako přijímač je brán LNA a směšovač (Obr. 28). NF část do přijímače není uvažována, neboť se předpokládá, že její přidání šum bude zanedbatelný. Pro výpočet je použit Friisův vztah (27).



Obr. 28 Šumové 2-brany přijímače

$$F_P = F_{LNA} + \frac{F_{MIX} - 1}{G_{LNA}} \quad (27)$$

$F_{LNA} = 1,8 \text{ dB}$	$= 1,5$	šumové číslo nízkošumového zesilovače
$G_{LNA} = 17 \text{ dB}$	$= 50$	zisk nízkošumového zesilovače
$F_{MIX} = 10 \text{ dB}$	$= 10$	šumové číslo směšovače

Šumové číslo přijímače pak vychází $F_p = 1,68 = 2,25 \text{ dB}$. Dále je vypočtena ekvivalentní šumová teplota přijímače T_E podle vztahu (28), kde T_0 je fyzická teplota bezodrazové koncovky, její definiční teplota je $T_0 = 290 \text{ K}$.

$$T_E = T_0(F_P - 1) \quad (28)$$

Nyní je možné vypočítat výslednou teplotu systému T_S . Její velikost je ovlivněna teplotou T_E , dále ztrátami na anténě L_A a ztrátami na vedení k anténě L_V . T_0 je teplota, kterou sleduje anténa. To je převážně silnice a karoserie vozidel. Tato předpokládaná teplota je $T_A = 300 \text{ K}$. Použité vztahy jsou z [9].

$$T_S = \frac{T_A - T_0}{L_A \cdot L_V} + T_0 + T_E \quad (29)$$

$$T_E = 198 \text{ K}$$

$$T_S = 493 \text{ K}$$

Dále je vypočten minimální přijatý výkon, který musí dopadnout na přijímací anténu radaru, za podmínky, že je požadován určitý poměr signálu k šumu. Jeho hodnoty jsou obvykle v rozsahu 10 až 20 dB. Pro spolehlivou detekci je zvoleno $SNR = 15 \text{ dB}$. Šířka pásma je $B = 5 \text{ kHz}$ a Boltzmanova konstanta $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

$$P_{Pmin} = kT_S B \cdot SNR \quad (30)$$

Po dosazení vyjde výkon $P_{Pmin} = -119,7 \text{ dBm}$. Vyjádřením vzdálenosti jako neznámé ze vztahu (20) se vypočítá maximální detekovatelná vzdálenost, za předpokladu, že jsou použity 4-prvkové řady antén se ziskem $G_v = G_p = 8 \text{ dB}$, vyzářovací charakteristiky se berou v hlavním směru vyzářování $f_v = f_p = 0 \text{ dB}$, RCS vozidla se uvažuje 1 m^2 a do vysílací antény je dodán výkon 15 dBm . Vlnová délka na frekvenci 11 GHz je něco přes $2,7 \text{ cm}$.

$$R_{max} = \left(\frac{P_V G_V G_P \lambda^2 RCS}{(4\pi)^3 k T_s B \cdot SNR} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (31)$$

Vzdálenost vychází $R_{max} = 145$ metrů. To je mnohem více než vzdálenost požadovaná v zadání. Ve skutečnosti je o něco menší, protože není brán v úvahu šum přidaný v obvodech NF zpracování. Použitím 16-prvkové anténní řady se ziskem $G = 13$ dB se maximální detekovaná vzdálenost zvýší na 250 metrů.

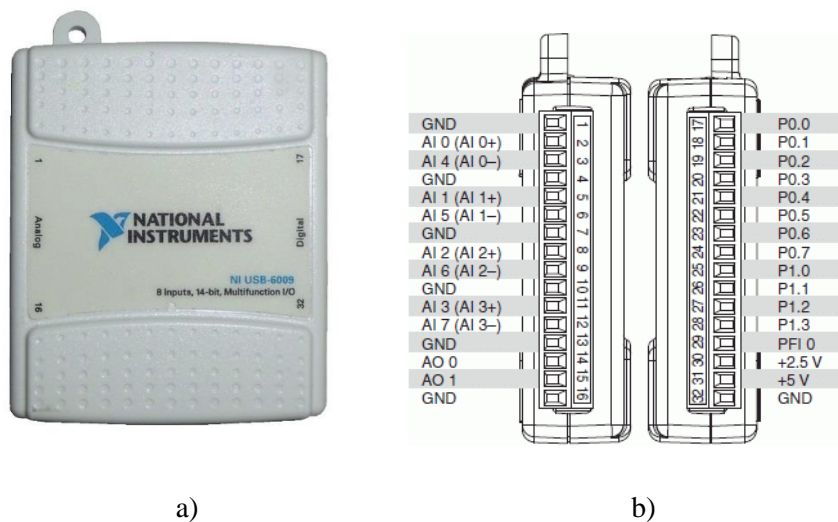
5. Zpracování přijatých dat

Vyhodnocení signálu z radaru je prováděno na osobním počítači v programu MATLAB. K propojení radaru s počítačem je použit A/D převodník od firmy National Instrument, konkrétně typ IN USB-6009. V MATLABu pak je nainstalovaný Data Acquisition Toolbox, který umožní s převodníky od National Instrument pracovat.

5.1 Převodník NI USB-6009

Tento převodník je napájen z USB portu osobního počítače, nepotřebuje tedy žádný externí zdroj napětí. Převodník disponuje mnoha funkcemi. Může pracovat jako analogově digitální, nebo naopak. Má 8 analogových nesymetrických vstupů, ty mohou být zapojeny jako 4 symetrické analogové vstupy. Dále obsahuje 12 digitálních portů. Na dvou pinech je možno odebírat konstantní výstupní napětí +5 V a +2,5 V. Další funkcí jsou dva analogové výstupy (nebo jeden symetrický). Převodník umí za sekundu zpracovat 48 tisíc vzorků na jednom vstupu, tj. 48 kSa. Při zapojení více analogových vstupů se však toto číslo rozdělí mezi použité vstupy. Při použití dvou vstupů je pak rychlost každého z nich poloviční, tedy 24 kSa a při použití třech vstupů je rychlost 3x 16 kSa.

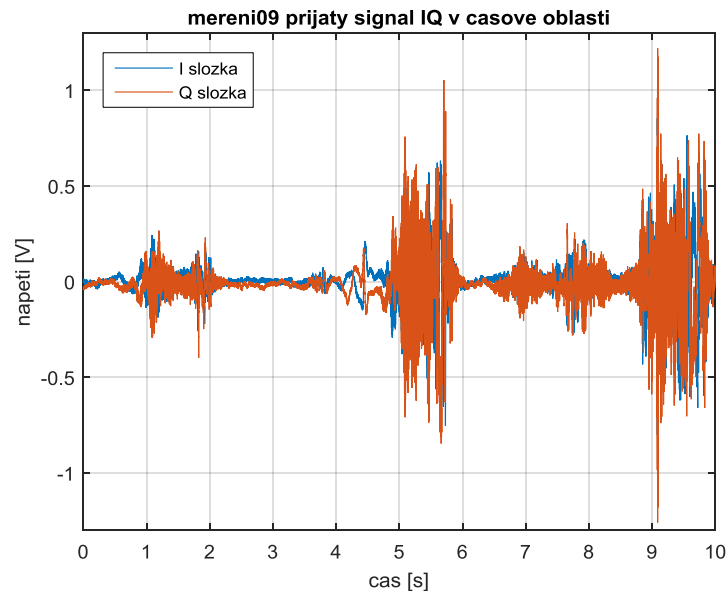
V našem případě jsou připojeny dva analogové vstupy, protože je použit kvadrurní směšovač s výstupy I a Q. Rozmezí vstupujících signálů proti GND je od -10 V do +10 V. Vzorkovací frekvence je 24 kHz pro každý kanál. Maximální vstupující Dopplerova frekvence je 5 kHz a vzorkovací podmínka je s rezervou splněna.



Obr. 29 a) převodník NI-USB 6009, b) zapojení vývodů

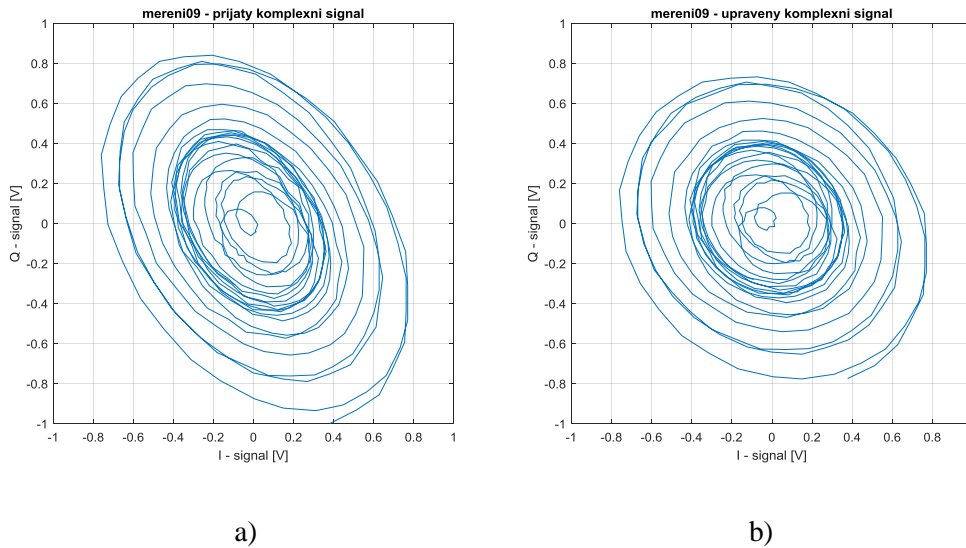
5.2 Analýza přijatého signálu

Přijatý signál v časové oblasti může vypadat například jako na Obr. 30. Z prvního kanálu vystupuje soufázová I složka, z druhého kanálu fázově posunutá kvadrurní složka Q. Tyto dva vektory signálu se sečtou do jednoho komplexního vektoru. Ten se pak lépe zpracovává.



Obr. 30 Přijatý signál v časové oblasti

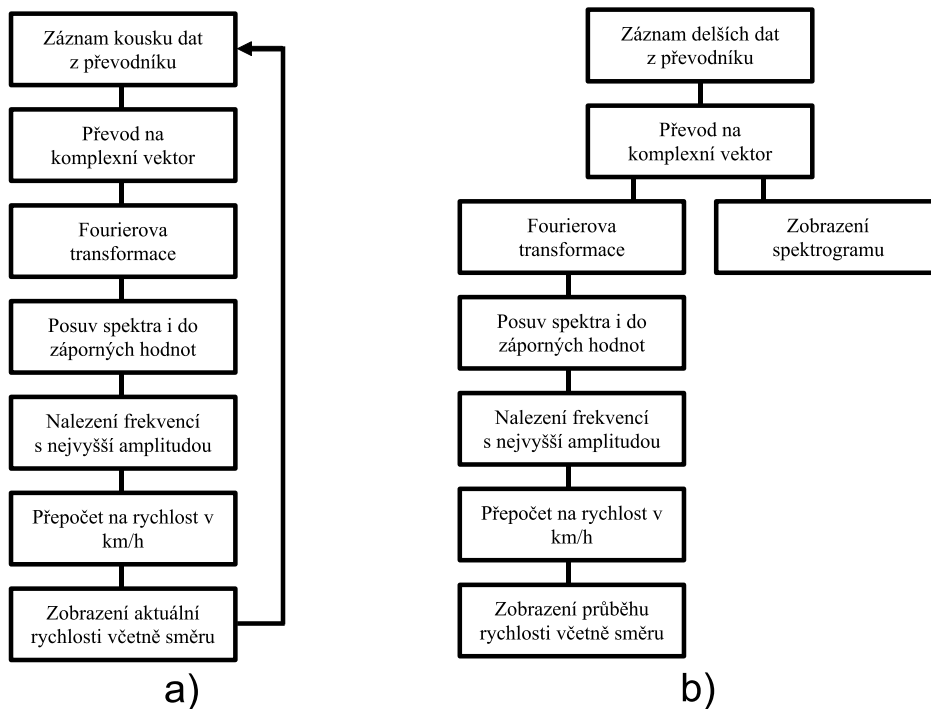
Komplexní signál se může zobrazit v komplexní rovině pro lepší názornost jeho vlastností (Obr. 31 a). To, že se signál „točí“, představuje pohyb předmětu před anténami. Smysl otáčení určí směr pohybu. Zdeformování smyčky komplexního signálu je způsobeno několika faktory. Jedním z nich je způsob záznamu převodníku při záznamu dat ze dvou vstupů. Vzorky z nich nebere ve stejný časový okamžik, ale s rozdílem času Δt . Ten odpovídá převrácené hodnotě dvojnásobku vzorkovací frekvence na jeden kanál. Programově se může jednoduše posunout celý druhý kanál v matici o jeden řádek. Rozdíl času Δt potom odpovídá převrácené hodnotě vzorkovací frekvence na jeden kanál. Je to sice dvojnásobek předešlého Δt , ale smyčka se i tak celkem vyrovná. Tato úprava koriguje eliptickou deformaci smyčky. Posunem o dva řádky v matici je smyčka ještě vyrovnanější, nejspíš se tím koriguje samotná nesymetrie výstupů kvadrurního směšovače, mezi nimiž není přesný fázový rozdíl 90° . Dalším faktorem je nesymetrie výstupních úrovní z NF zesilovačů, měřením se zjistilo, že druhý kanál má o 18% vyšší výstupní napětí než první kanál. Amplituda druhého kanálu se musí zmenšit. Tímto se koriguje osová symetrie I a Q kanálu. Dalším nepříznivým vlivem je stejnosměrná složka na výstupu NF zesilovačů. U prvního kanálu je zanedbatelná (2 ± 3) mV. U druhého kanálu je výrazně vyšší, a to (-19 ± 3) mV. Tyto hodnoty jsou změřené převodníkem z radaru bez připojených antén a průměrováním signálů za delší časový úsek. Pokud jsou brány v úvahu tyto nepříznivé vlivy a provede se softwarová úprava signálu, smyčka komplexního signálu (Obr. 31 b) je mnohem hezčí a lépe se tak určí směr.



Obr. 31 Signál v IQ rovině a) přijatý, b) upravený

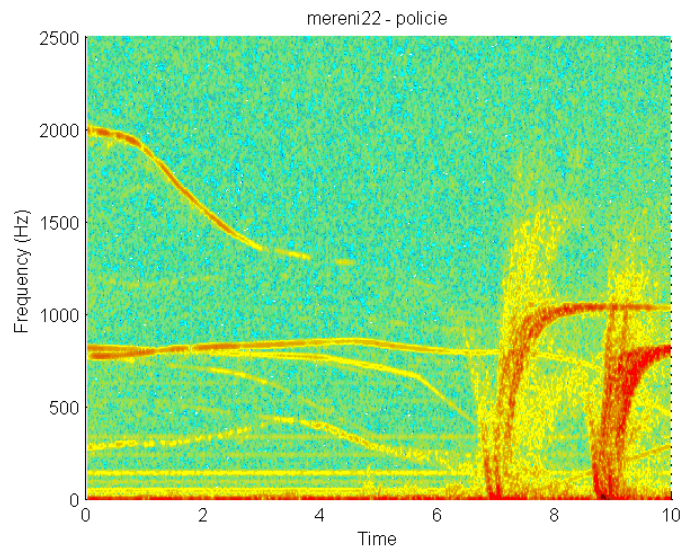
5.3 Program GUI – MATLAB

Pro zpracování signálu se nejprve zaznamenají data. K tomu slouží program „zaznam.m“, do kterého se zadá čas záznamu a vzorkovací frekvence na jeden kanál. Jak je výše uvedeno, jsou používány dva kanály a vzorkovací frekvence 24 kHz. K propojení převodníku s Matlabem je nainstalován toolbox „Data Acquisition Toolbox.“ Ke komunikaci převodníku s programem je používána funkce „převodnik2.m.“ Program pak uloží I a Q data do matice s , dále časový vektor t v sekundách, vzorkovací kmitočet fs a celkovou délku záznamu top v sekundách.



Obr. 32 Vývojové diagramy programu a) živé měření, b) zaznamenaná data

Uložený záznam je vyhodnocován programem spektrogramIQ.m.“ Ten zobrazí spektrogram zaznamenaného signálu, avšak jen absolutní hodnoty frekvencí, bez rozlišení směru pohybu cílů. Program si nejprve načte uložený soubor. Pak vezme přijatý signál z jednoho kanálu a ten zpracovává. K zobrazení pak slouží příkaz spectrogram, jemuž zadáme různé parametry zpracování, jako například typ okna pro FFT a jeho šířku (v tomto případě je 5 kHz). V základu je používáno Hammingovo okno. Ukázka spektrogramu je na obrázku (Obr. 33). Na vodorovné ose je čas v sekundách a na svislé je změřená Dopplerova frekvence, kterou lze jednoduše přepočítat na rychlost podle vztahu (6). Jednotlivé oranžové křivky znázorňují pohyby vozidel (konkrétním situacím a popisu spektrogramů se věnuje kapitola 5.4).



Obr. 33 Příklad spektrogramu

Dalším programem pro zpracování je „play_livemeasIQ.m.“ Ten načte uložený signál stejným způsobem jako předem popsany program. IQ data z matice s si převede na komplexní vektor k , kde pak jeden kanál reprezentuje reálnou složku signálu a druhý imaginární složku. Potom se vektor k zpracovává po úsecích dlouhých t_{op} . Vhodným zvolením této doby se určí frekvenční rozlišovací krok Fourierovy transformace, to znamená i krok rozlišení rychlosti. Ten je požadován menší než 1 km/h. Tomu podle vztahu (32) odpovídá při nulovém úhlu sevření φ frekvence přibližně 20 Hz a převrácená hodnota odpovídá době t_{op} , která by měla být delší než 50 ms. Delším t_{op} se dosáhne lepšího rozlišení, avšak zpracovává se pak delší čas a nerozeznají se tak rychlé změny rychlosti. Tento parametr lze v GUI rozhraní (Obr. 34) měnit posuvníkem v dolní části.

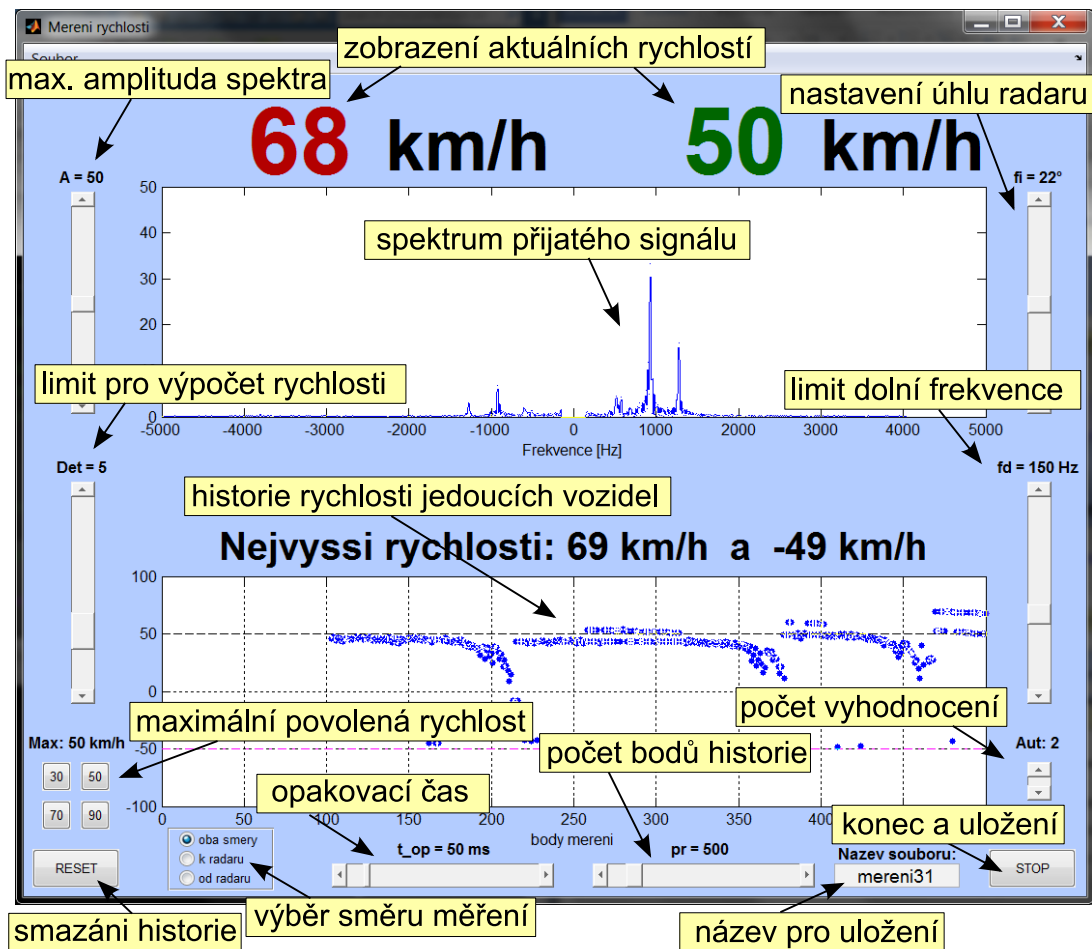
$$f_{dopp0} = \frac{2 \cdot v \cdot f_c}{c \cdot 3,6} = \frac{2 \cdot 1 \frac{km}{h} \cdot 11 GHz}{3 \cdot 10^8 \cdot 3,6} = 20,4 Hz \quad (32)$$

Z Fourierovy transformace komplexního signálu k se dopočítá jak kladné, tak i záporné frekvenční spektrum. Převažuje-li spektrální čára s kladnou frekvencí, vozidlo se k nám přibližuje a naopak se zápornou frekvencí se vzdaluje. V GUI zabírá spektrogram převážnou část horního

prostoru. Posuvníkem nalevo od něj se může nastavit limit maximální zobrazené amplitudy. Program dá při oddalování vozidla před zobrazenou změřenou rychlost záporné znaménko. V dolní části GUI je na výběr, zdali se mají brát vozidla v našem směru, protisměru, nebo obou směrech zároveň. Dále je ve zpracování zařazen laditelný filtr horní propusti, který odstraní pomalé rychlosti. Ty mohou být způsobeny různými otřesy, vlivem rychlého průjezdu vozidla v blízkosti radaru a podobně. Podle zadání je dolní mezní rychlost 20 km/h, což odpovídá meznímu kmitočtu asi 400 Hz. Je však dobré měřit i pomalejší vozidla a tak je filtr laditelný posuvníkem v pravé části GUI.

Ve frekvenčním spektru jsou nalezeny hodnoty frekvencí s nejvyššími amplitudami, pokud jsou větší než nastavitelný detekční limit „Det“ s posuvníkem v levé části GUI, seřadí se podle velikosti amplitudy a vyberou se dvě největší. Posuvníkem počtu detekovaných aut se může nastavit jiný počet nejsilnějších amplitud, pro toto GUI je ideální zobrazit rychlost pouze ze dvou největších amplitud. Ty se pak přepočtou na okamžitou rychlost a zobrazí v horní části GUI. Napravo od spektrogramu se volí úhel sevření osy vozidla a osy radaru φ , na kterém závisí správný přepočet rychlosti. V levé spodní části je možno zvolit limit maximální povolené rychlosti měřeného úseku. Při překročení tohoto limitu zčervená zobrazená rychlost. Pokud je rychlost v normě, je barva zelená a pokud se vozidlo pohybuje směrem od nás, je barva černá. Toho je docíleno podmíněným formátováním textu.

Ve spodní části GUI je pohyblivý graf historie rychlostí, jehož počet bodů se může také nastavit posuvníkem pod grafem. Nad grafem je zobrazena historie maximálních rychlostí, kladných i záporných. Vlevo dole je tlačítko RESET, které celou historii smaže. Program vypíše i název zpracovávaného souboru. Vlevo dole se nachází tlačítko STOP, které program ukončí. Ten se ukončí i sám pokud dojede na konec zaznamenaných dat. Po uzavření GUI se zobrazí graf historie rychlostí. Na následujícím obrázku (Obr. 34) je ukázka grafického rozhraní:



Obr. 34 GUI program zpracování dat

Pro měření v reálném čase je předchozí program mírně upraven a nazván „livemeas.m“. Hlavní změna je v tom, že načítá nová data dlouhá t_{op} přímo z převodníku a rovnou je zpracovává stejným způsobem jako předešlý program. Všechny možnosti funkce zpracování zůstanou stejné. Změnou je, že po stisknutí tlačítka STOP se soubor s daty uloží pod názvem, který se napíše do editačního okna „Název souboru.“

Nevýhodou tohoto záznamu je, že načtení signálu z převodníku trvá delší dobu, než je t_{op} . Další čas zabere samotné zpracování, a tím pak uložený signál není poskládan z časových úseků navazujících za sebe, ale s určitou nezanedbatelnou mezerou, řádově to je 4–6ti násobek doby t_{op} . Při reálném měření to tolik nevadí. S opakovací dobou 50 ms průměrně trvá načtení a zpracování 250 ms, a to jsou 4 zpracování za sekundu, což je dostačující.

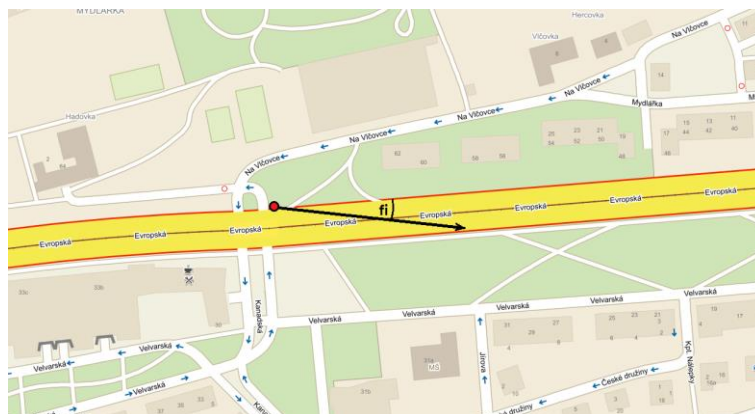
Celý napsaný MATLAB kód představuje přibližně 500 řádků ve dvou modifikacích. Velkou část zabírá grafické rozhraní GUI. V příloze je uvedena část kódu s principy zpracování a výpočtu měřené rychlosti.

5.4 Změřené dopravní situace

V následující podkapitole jsou popsány a znázorněny různé naměřené dopravní situace. Každé situaci náleží čtveřice obrázků. Na prvním obrázku a) je print screen GUI programu v jednom zajímavém časovém okamžiku. Na druhém obrázku b) je pořízená fotografie této situace. Na c) obrázku je spektrogram celého záznamu situace a na d) obrázku je vyhodnocená rychlost vozidel včetně směru.



Obr. 35 Praktické měření v terénu

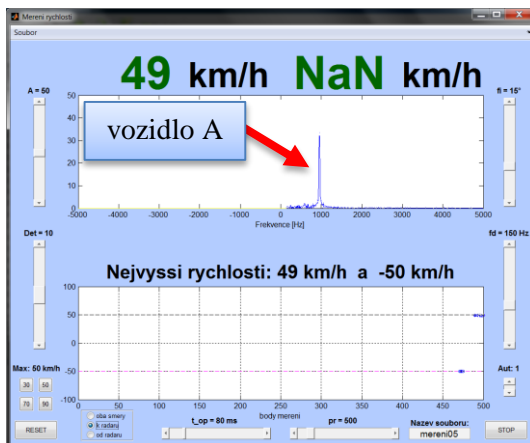


Obr. 36 Mapa měření Evropská, Praha 6

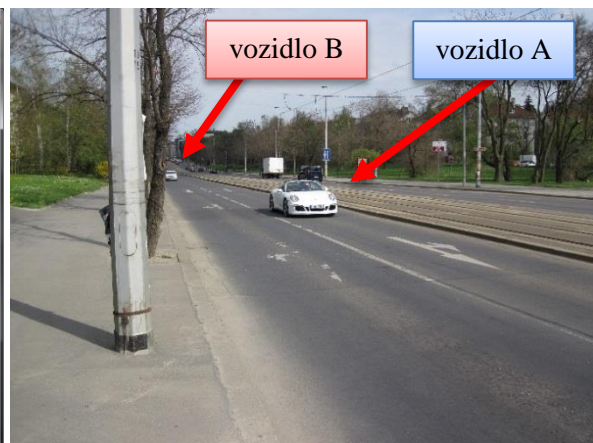
5.4.1 Měření - Evropská ulice, Praha 6

Auta za sebou jedním směrem

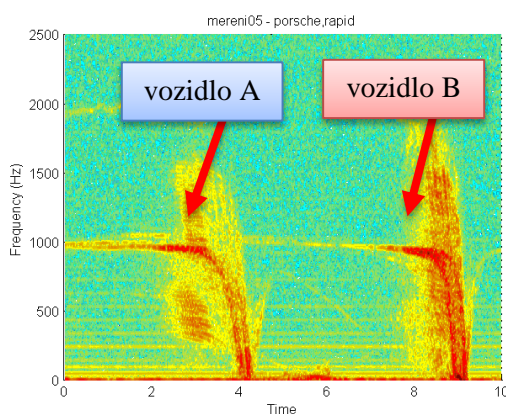
Prvních pět situací je změřeno v Evropské ulici poblíž kancelářského komplexu Hadovka, souřadnice GPS: N 50°5.99', E 14°22.74' (Obr. 36). Při měření na tomto místě byl zisk nízkofrekvenčního zesilovače nastaven na 20 dB. Základní dopravní situací je jedno vozidlo přibližující se k radaru, v našem případě pod úhlem $\varphi = 15^\circ$. Program jeho rychlost snadno určí ze spektrogramu, kde vezme Dopplerovu frekvenci s maximální amplitudou a přepočte s korekcí úhlu φ na rychlost v kilometrech za hodinu podle vztahu (6). Dále je ze spektrogramu vidět, že po průjezdu prvního vozidla A projelo druhé vozidlo B podobnou rychlostí. Když se auto z dálky přibližuje, ve spektrogramu se pomalu v čase zvětšuje amplituda Dopplerovy frekvence, po těsném průjezdu kolem radaru frekvence rychle klesne k nule, to je způsobeno tím, že radiální složka rychlosti klesá k nule (popsáno v kapitole 2.1). K tomuto měření byla použita dvojice 16 - prvkové anténní řady v horizontálním smyslu umístění (Obr. 24 a).



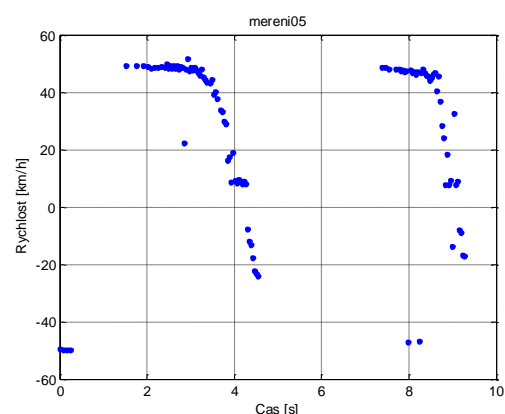
a)



b)



c)



d)

Obr. 37 Auto v jednom směru

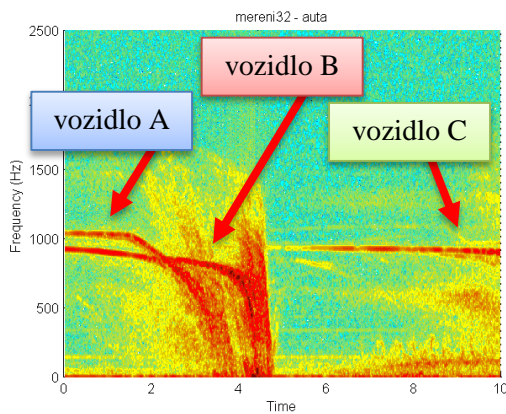
Dvě auta jedoucí podobnou rychlostí vedle sebe

Zajímavá dopravní situace je v následujícím příkladu. Stejným směrem s podobnou rychlostí se k radaru přibližují dvě vozidla. Názorně je to vidět na průběhu spektra, kde má každé vozidlo jinou spektrální čáru a program je dokáže rozlišit. Vozidlo A jelo větší rychlostí, ale pak začalo brzdit a následně odbočovalo, vozidlo B mírně zpomalovalo, než projelo kolem radaru. Po průjezdu těchto dvou aut jelo ještě třetí vozidlo C přibližně konstantní rychlostí (na obrázku není znázorněno). Toto měření bylo pořízeno dvojicí 4-prvkových anténních řad s vertikálním umístěním (Obr. 24 a). Úhel mezi osou radaru a silnicí byl 5° .

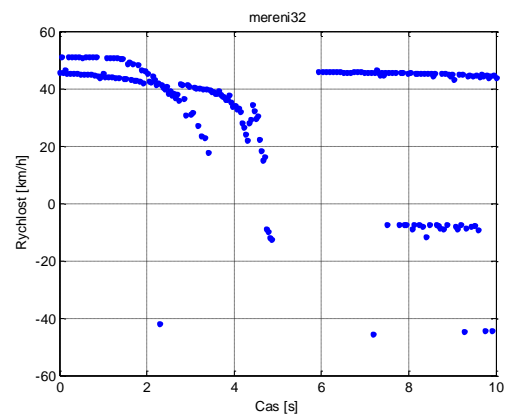


a)

b)



c)



d)

Obr. 38 Auta v jednom směru II

Rozlišení rychlostí dvou aut v jednom směru

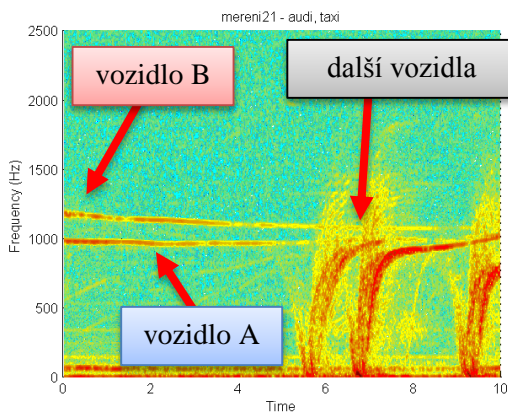
Zde jela dvě vozidla těsně za sebou směrem od radaru. Proto jsou rychlosti záporné. Vozidlo A jelo podle předpisů, vozidlo B překročilo maximální povolený limit přibližně o 5km/h. Radar byl od silnice natočen s úhlem 5°. Ze spektrogramu na obrázku c) lze rozpoznat dvě jedoucí auta, smysl pohybu aut však ze spektrogramu nezjistíme. Ten získáme z Fourierovy transformace přijatého komplexního signálu a dalším vhodným zpracováním. Detekovaná rychlost s vyhodnoceným směrem pohybu je na obrázku d). K měření byla použita dvojice 4-prvkových antén s vertikální polohou (Obr. 24 a).



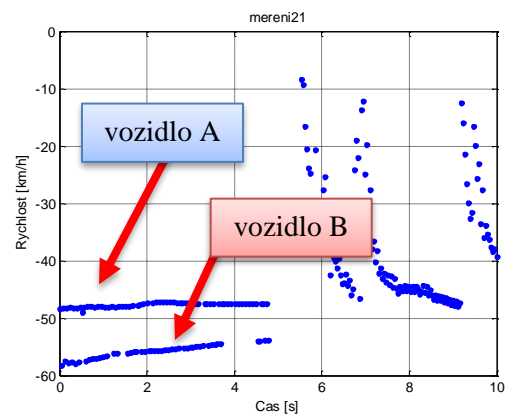
a)



b)



c)

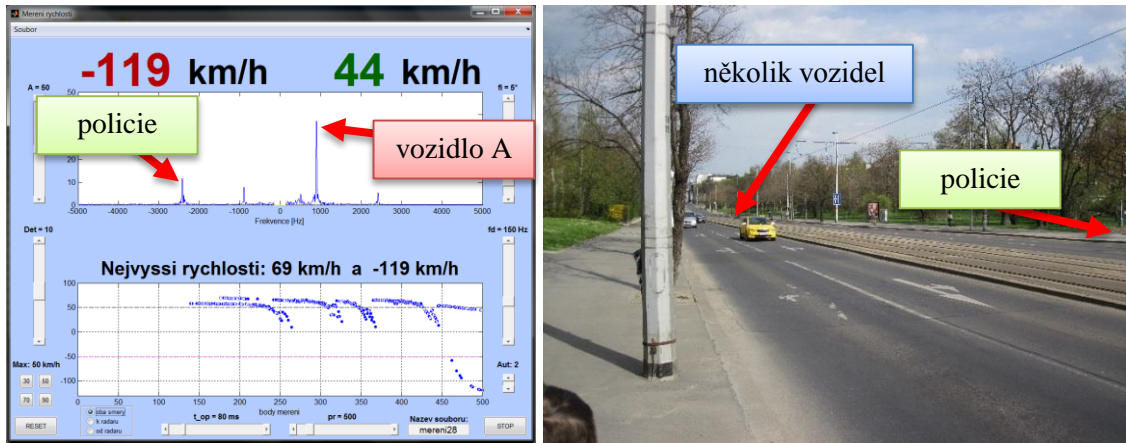


d)

Obr. 39 Auta opačný směr

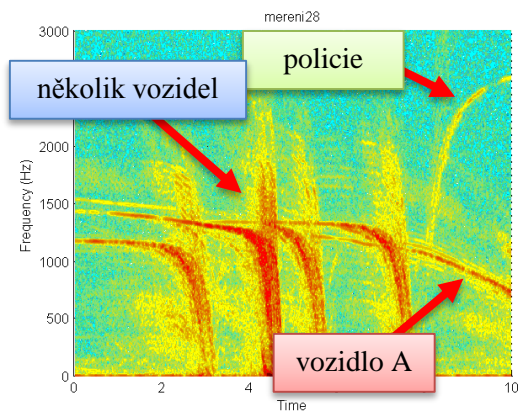
Rozlišení dvou aut v opačných směrech

V této situaci je vidět, že program dokáže rozlišit auta s různou rychlostí a dokonce i různým směrem. Na spektrogramu rozlišíme celkem 6 aut. Prvních 5 vozidel jelo směrem k nám, poslední z nich si označíme jako vozidlo A, to se míjelo s protijedoucím vozidlem s velkou rychlostí. Jednalo se o policejní automobil se zapnutými výstražnými majáky. Na obrázku jsou zachycena pouze první jedoucí auta a naznačen směr protijedoucího vozidla. Úhel natočení radaru od silnice byl opět 5° a použité 4-prvkové anténní řady ve vertikální rovině.

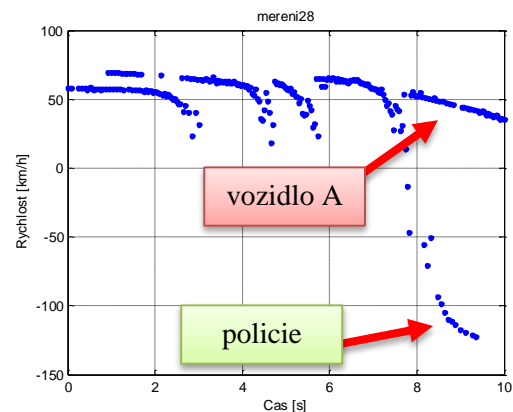


a)

b)



c)

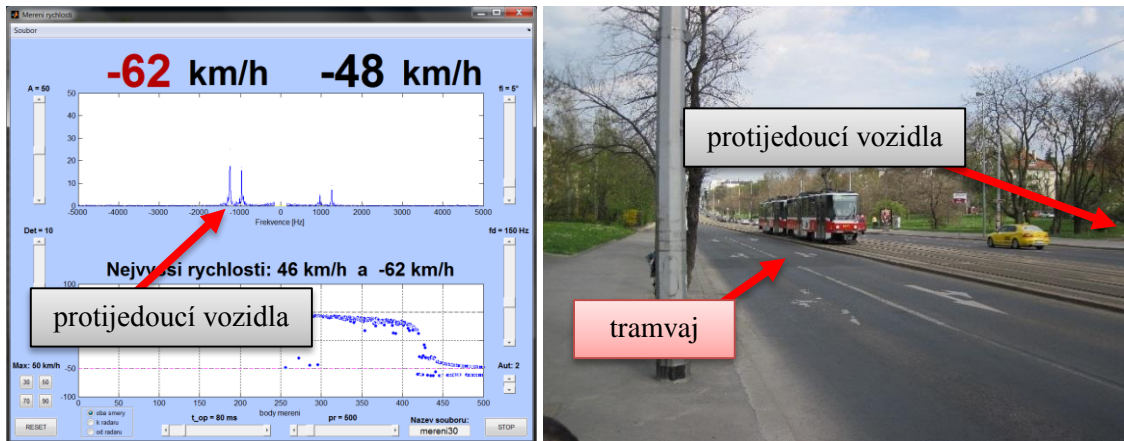


d)

Obr. 40 Auta oba směry najednou

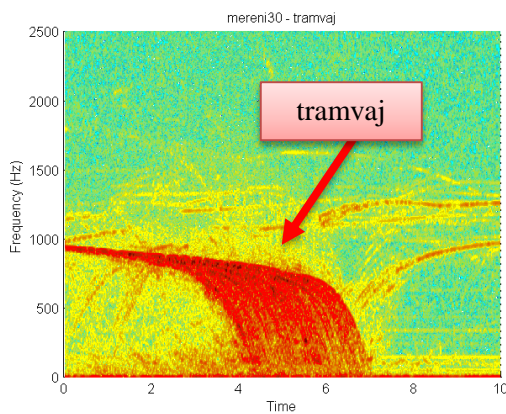
Tramvaj a dvě auta opačným směrem

V této situaci je možno vidět tramvaj a dvě protijedoucí auta po jejím průjezdu. Tím jak je tramvaj dlouhá, její bok má velkou plochu a ve spektrogramu vypadá zajímavě. Ze spektrogramu poznáme, že tramvaj postupně zpomalovala, protože přijížděla do zastávky. Po jejím přejezdu za detekční prostor radaru se nám vynoří dvě protijedoucí vozidla, na fotografii je znázorněn směr jejich příjezdu. Použity byly 4-prvkové anténní řady ve vertikální pozici a úhel $\varphi = 5^\circ$.

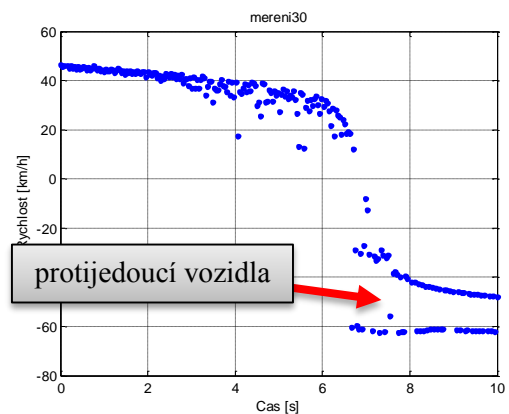


a)

b)



c)



d)

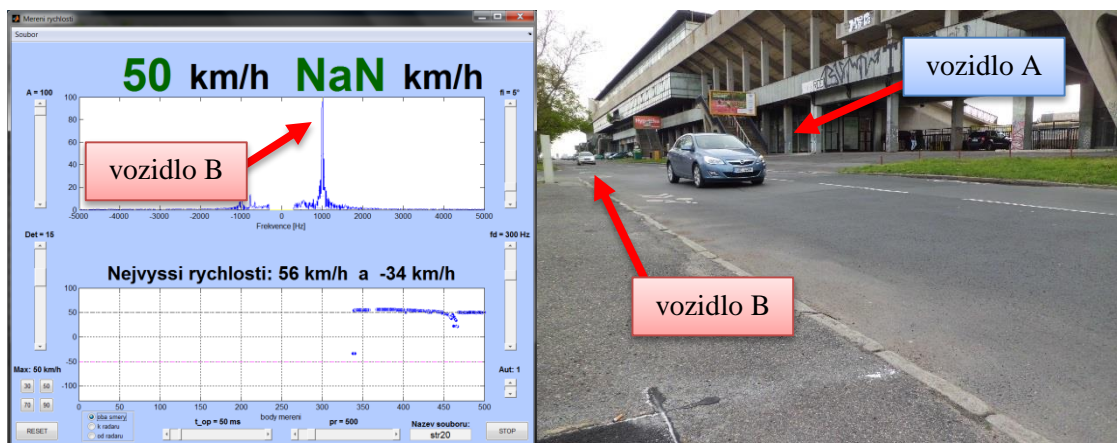
Obr. 41 Auto, tramvaj oba směry postupně

5.4.2 Měření Strahov, Praha

Druhým místem měření byla rovná silnice podél strahovského stadionu (Obr. 46) se souřadnicemi GPS: N 50°4.91', E 14°23.4'. Na tomto místě bylo možné změřit dosah radaru. Teoreticky by podle radarové rovnice měla být kolem 145 metrů. Zisk NF zesilovačů byl při tomto měření navýšen na 30 dB. Úhle měření φ je ve všech případech 5°.

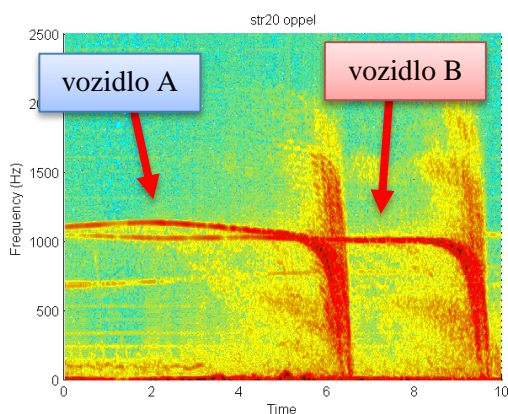
Detekční vzdálenost

V této situaci jela dvě auta v jednom směru s mírným rozestupem. Vozidlo A nejprve zrychlovalo, pak zpomalovalo. Vozidlo B jelo téměř konstantní rychlostí 50 km/h. Jeho rychlost se začla vyhodnocovat v čase $t_1 = 1,5$ s a kolem radaru projelo v čase $t_2 = 9$ s. Z toho můžeme dopočítat maximální detekční vzdálenost, ta v tomto případě vychází 104 m. Na detekční vzdálenosti však závisí především RCS měřeného vozidla. Proto například autobus s velkým RCS bude detekovatelný v mnohem větší vzdálenosti, než osobní automobil s menším RCS. Použity byly 4-prvkové řady antén podle Obr. 24 a).

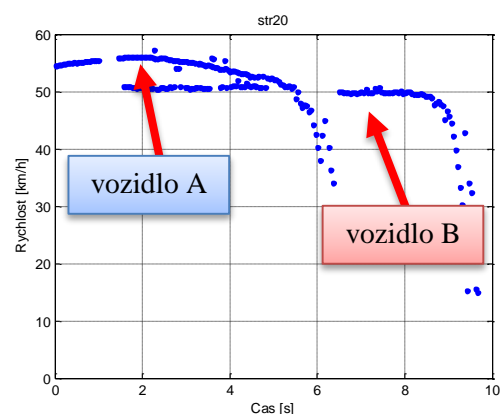


a)

b)



c)

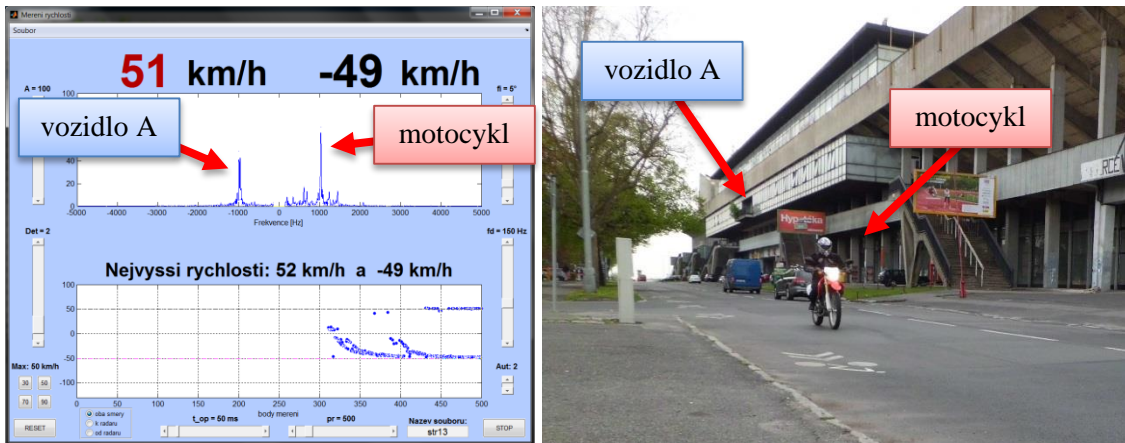


d)

Obr. 42 Maximální detekční vzdálenost

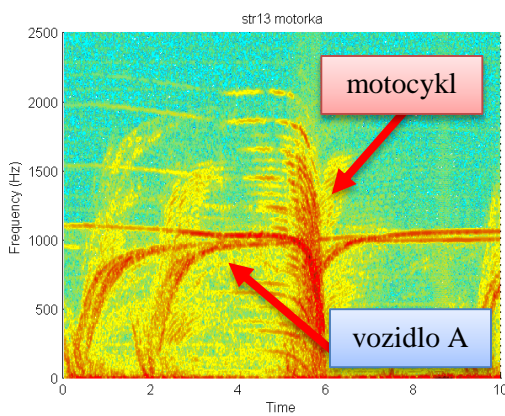
Motocykl

Zajímavý spektrogram je ze záznamu motocyklu. Při průjezdu kolem radaru produkuje celkem dost různých frekvencí v okolí Dopplerovy frekvence. Nejspíš je to způsobeno otáčejícími se koly. V programu je ale i přesto dobře rozpoznatelný od protijedoucích vozidel. Motocykl se přibližoval k radaru, vozidlo A jelo směrem od radaru. Na spektrogramu můžeme rozpoznat ještě další vozidla, těmi se ale zabývat nebudeme. K měření jsme použili 4-prvkovou anténní řadu podle Obr. 24 a).

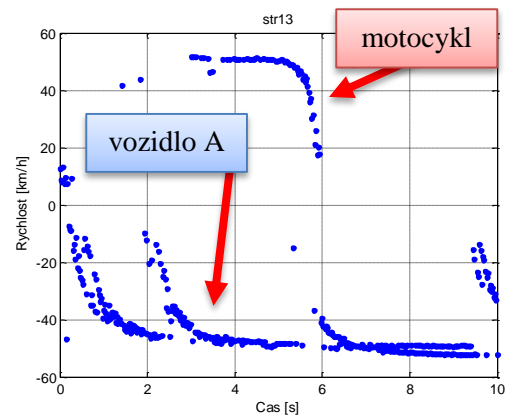


a)

b)



c)

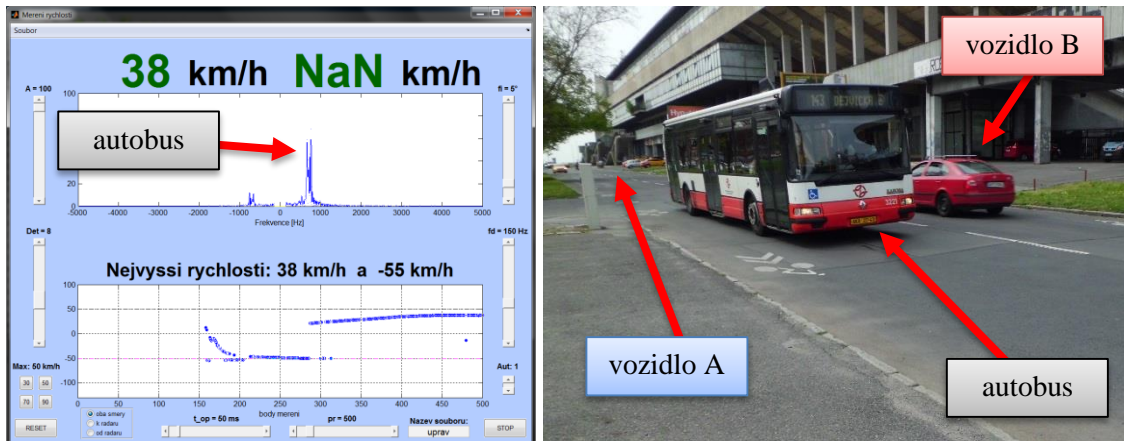


d)

Obr. 43 Motocykl

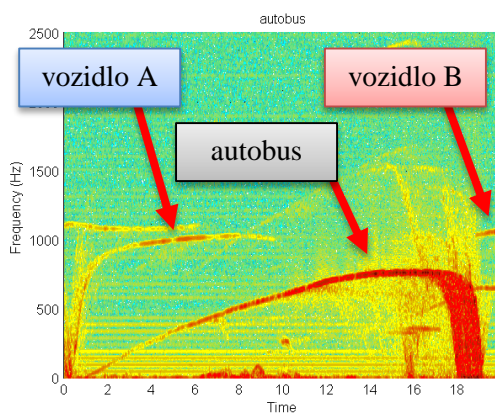
Autobus MHD

Zde byla měřena rychlost autobusu vyjíždějícího ze zastávky. Ta je od místa měření vzdálená 130 metrů. Je vidět, že radar detekuje autobus už z rozjezdu, detekční vzdálenost tak bude ještě vyšší. Je to ale způsobeno tím, že má předek autobusu velikou efektivní odraznou plochu RCS. Osobní automobily budou mít maximální detekční vzdálenost zpravidla menší. Použita byla 16-prvková dvojice anténních řad podle Obr. 24 a).

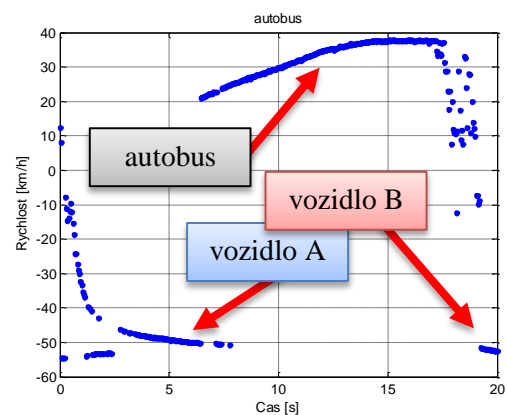


a)

b)



c)

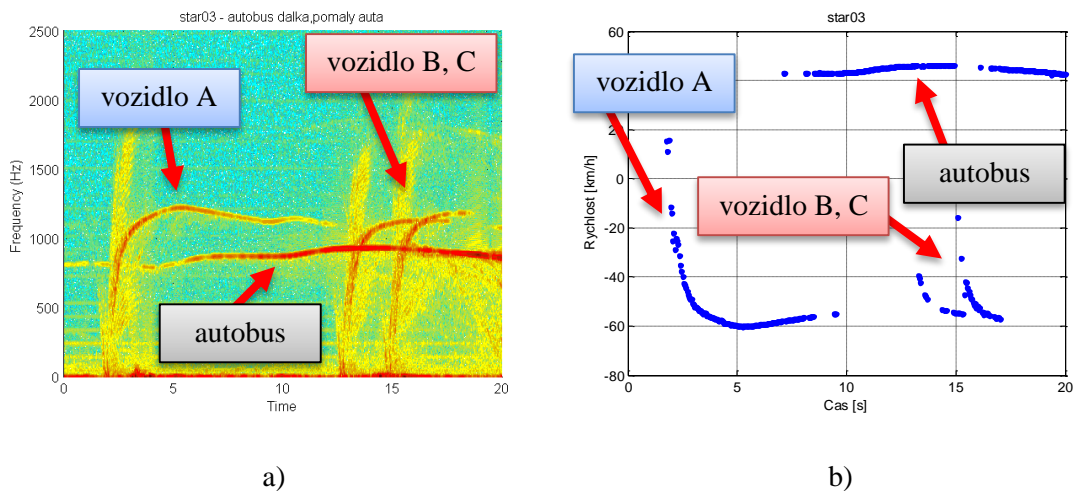


d)

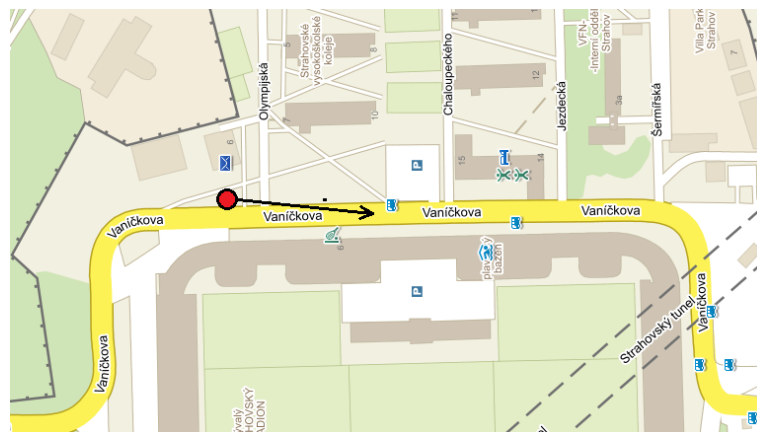
Obr. 44 Autobus jedoucí ze zastávky

Zájezdový autobus

Dalším podobným měřením ze Strahova je zájezdový autobus, který jel ve směru k nám téměř konstantní rychlostí. Ve spektrogramu je viditelný už od začátku záznamu. Amplituda jeho spektra je oproti ostatním automobilům vyšší, kvůli velkému RCS. Vozidlo A se pohybovalo směrem od nás a vozidla B a C také směrem od nás. K tomuto měření bohužel není k dispozici fotografie. Z grafu zpracování rychlosti můžeme odečíst přibližnou detekční zónu. Záznam však skončil dřív, než autobus projel kolem radaru, ale kolem 20 sekundy začíná být na spektru znát, že je autobus už blízko. Maximální detekční zóna bude více než 150 metrů. Použity byly 4 - prvkové anténní řady podle Obr. 24 a).



Obr. 45 Zájezdový autobus



Obr. 46 Mapa měření Strahov, Praha 6

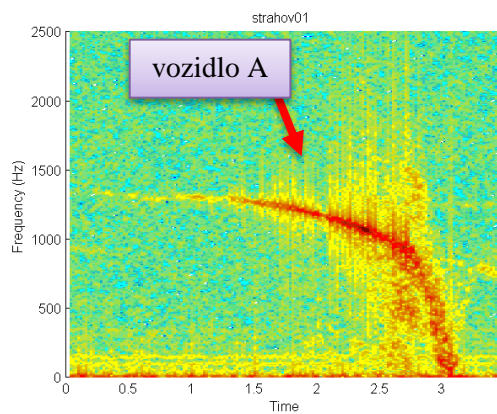
5.4.3 Záznam z živého měření

Program pro měření v reálném čase má výhody i nevýhody. Výhodou je, že je okamžitě vidět, kolik měřené vozidlo jede, případně jakou rychlostí jede současně i další vozidlo v detekční zóně. Při záznamu signálu se ale přichází o jeho značnou část, během které trvá vyhodnocení dat. Dejme tomu, že se berou data dlouhá $t_{op} = 50$ ms a uloží se. Dalších přibližně 250 ms však trvá zpracování signálu a teprve po této době zaznamenaná převodník další kousek dat. Uložená data tak na sebe přímo nenavazují a spektrogramy nejsou tak čitelné jako při záznamu v kuse. Rozpoznat z nich rychlost však programu nedělá nějaké větší potíže. Zde byly použity 16-prvkové řady antén s vertikální polohou podle Obr. 24 b).

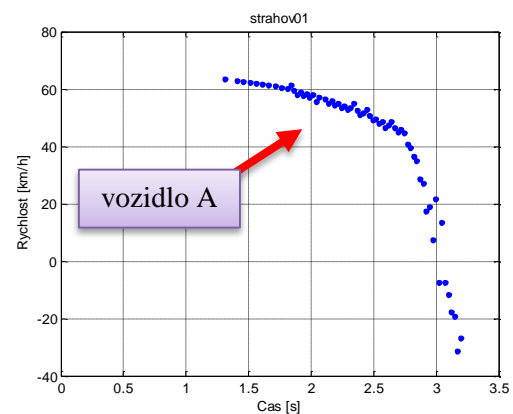


a)

b)



a)



b)

Obr. 47 Záznam z reálného měření

6. Závěr

V této práci jsme se seznámili s problematikou CW radarů a měření rychlosti vozidel policejními radary. Na jejich základě byl navržen radar na podobném principu, jako jsou Dopplerovské radary typu RAMER.

Radar je celkem mobilní a dá se lehce přenášet. Nevýhodou je potřeba zásuvky 230V. Pokud ale máme k dispozici DC/AC převodník ze stejnosměrných 12V na síťové napětí jako v našem případě, můžeme radar napájet z automobilové zásuvky, nebo oloveného akumulátoru. Sestavený radar fungoval na první zapojení, při jeho ožívování nebyly žádné komplikace, všechny měřené úrovně výkonu odpovídají návrhu podle datových listů jednotlivých komponentů.

Na tomto radaru by mohlo být několik vylepšení. Například lepším kvadraturním směšovačem by se zlepšilo detekování směru. Fáze komplexního signálu ze směšovače není dokonale kruhová. Softwarovou úpravou je kruhu docela přiblíženo a dostupný směšovač je tak pro vyzkoušení principu postačující. Detekce pohybu by se také zlepšila kvalitnějšími NF zesilovači na výstupech ze směšovače. Na vstup převodníku na jednom kanálu vstupuje mírná stejnosměrná složka okolo 20mV. To však není nijak kritické a vyhodnocování funguje správně i přes tento problém. Převodník je mírně rušen i síťovou frekvencí 50 Hz, která je ale softwarově odfiltrována. Při testech radaru v laboratoři s rozsvícenými zářivkami bylo detekováno silné rušení na 100 Hz a jeho vyšších harmonických složkách. V terénu však tento problém s velkou pravděpodobností nenastane.

Dalším problémem by mohlo být měření z kufru stojícího automobilu. Zde stačí malý pohyb vozidla a anténa přijímá odrazy od země, protože anténa radaru se vůči zemi mírně třese a signál se dost zašumí na nižších kmitočtech. Toto však lze eliminovat filtrem horní propusti.

V MATLABu byl napsán program na zpracování kvadraturního signálu z radaru s GUI rozhraním. Tento program umí reálně vyhodnocovat signál a ukládat ho. Je tu však problém se zpožděním načítání signálu z převodníku a následným programovým zpracováním. Například převodníku trvá načtení 50 ms dlouhého signálu přibližně 150 ms a následné zpracování pak okolo 100ms. Proto byl napsán ještě druhý program, který dokáže přehrát zaznamenaný signál libovolně dlouhý. Je to ale na úkor toho, že při pořizování záznamu nemůžeme vyhodnotit okamžitou rychlost vozidel. Signál se ukládá do digitální podoby podle zadané délky záznamu a vzorkovací frekvence.

Měření v terénu pak byla ověřena celková funkce radaru. Maximální dosah radaru byl s použitím 4-prvkových anténních řad změřen okolo 100 metrů pro osobní automobil. U autobusů to bylo díky velkému RCS přes 130 metrů. Testována nebyla jen horní hranice měřené rychlosti, nejvyšší změřená rychlost byla 130 km/h u policejního vozu s výstražnými majáky. Principem změříme maximální Dopplerovu frekvenci s hodnotou 5 kHz, které odpovídá radiální rychlost 245 km/h.

7. Literatura

- [1] P. Bezoušek a P. Šedivý, Radarová technika, Vydavatelství ČVUT, 2004, ISBN: 8001030369.
- [2] Anti Radary, „AntiRadary.net,“ 14 Leden 2014. [Online]. Available: <http://www.antiradary.net/mereni-rychlosti-v-cr-ramer/>. [Přístup získán 28 Listopad 2014].
- [3] RAMET a.s., [Online]. Available: <http://www.ramet.as/policejni-radary>. [Přístup získán 2 Leden 2015].
- [4] ELTODO, a.s., [Online]. Available: <http://www.eltodo.cz/informacni-servis/aktuality/rok-2014/radar-vozik-na-d1.html>. [Přístup získán 3 Leden 2015].
- [5] P. Koděra, „Aktualně.cz,“ 14 duben 2015. [Online]. Available: <http://zpravy.aktualne.cz/domaci/jak-predejiti-nehodam-ridice-zkroti-chytre-znacky-za-miliard/r~3af60fdee2a411e4875c002590604f2e/>. [Přístup získán 1 květen 2015].
- [6] K. Hoffmann, Planární mikrovlnné obvody, Praha: Nakladatelství ČVUT, 2010, ISBN: 9788001037058.
- [7] P. Hudec, *Přednáška předmětu MOS, MMS*, 2014.
- [8] K. Hoffmann, P. Hudec a V. Sokol, Aktivní mikrovlnné obvody, Praha: Nakladatelství ČVUT, 2009, ISBN: 9788001042267.
- [9] P. Hudec, Bezpečnostní aplikace mikrovlnné techniky, Praha: Habilitační práce, 2009.
- [10] K. Chang, RF and Microwave Wireless Systems, John Wiley & Sons, 2002.
- [11] Policie ČR, „policie.cz,“ 9 Říjen 2009. [Online]. Available: <http://www.policie.cz/clanek/merici-zarizeni-zn-polcam-technicke-a-provozni-podminky-mereni-rychlosti-719132.aspx>. [Přístup získán 30 Listopad 2014].
- [12] LAVET s.r.o., [Online]. Available: <http://www.lavet.cz/prolaser/prolaser.php>. [Přístup získán 2 Leden 2015].
- [13] Laser Technology Inc., [Online]. Available: <http://www.lasertech.com/UltraLyte-Laser-Speed-Guns.aspx?s=1>. [Přístup získán 3 Leden 2015].
- [14] PolCam Systems Sp. z o.o., [Online]. Available: <http://polcam.eu/en/products-en/in-car-video-systems/polcam-pc2006-en>. [Přístup získán 3 Leden 2015].

Přílohy

A MATLAB skripty + naměřená data

Všechny použité skripty a funkce jsou na přiloženém CD. Dále jsou na něm některá naměřená data.

B Přiloženého CD

Diplomová práce v elektronické podobě – soubor „matousek_rostislav.pdf“

Matlab skripty pro zpracování dat – složka „MTB_program“

Naměřená data z terénu typu *.mat – složka „namerena_data“

C Část MATLAB skriptu

```
%% počáteční parametry a konstanty
fi = 0; % uhel nastaveni 22st.
A = 30; % amplituda grafu spektra
limA = 3; % limit pro zapis frekvence do h
smax = 50; % max rychlost
poc_m = 2; % maximalni pocet detekovanych aut
b1 = 0; % cislo poradi hlavniho cyklu
s = []; % vektor pro ukladani
pr = 1000 ; % pocet bodu historie

fs = 48e3/2; % vzorkovaci frekvence
fh = 5e3; % max frekvence ( 5e3)
fd = 150; % min frekvence ( 150)

f0 = 10970600e3; % nosná frekvence OSC
c = 299792458; % rychlost světla
top = 0.05; % opakovací perioda [20 Hz -> 0.05 s]

froz = 1/top; % rozlisovací frekvence

%% počáteční volání převodníku

devices = daq.getDevices; % připojený zařizení
ss = daq.createSession('ni');
ss.addAnalogInputChannel('Dev1', 0, 'Voltage'); % pin 2
ss.addAnalogInputChannel('Dev1', 1, 'Voltage'); % pin 5
ss.Rate = fs;
ss.DurationInSeconds = top;
data = ss.inputSingleScan;
[s0, t] = ss.startForeground;
%% HLAVNI CYKLUS PROGRAMU
while 1 % hlavni nekonecny cyklus

    b1 = b1 + 1; % poradi hlavniho cyklu

    % orezani frekvencniho pasma

    nas = [zeros(1,fs-fh) ones(1,fh-fd) zeros(1,fd)]; % vektor nasobeni frekvencniho spektra

    % nove nacteni dat z prevodniku
    [s0, t] = ss.startForeground; % data z prevodniku
    ss.DurationInSeconds = top; % kdyz je zmena top

    s = [s; s0]; % s vektor ukladani
    s1 = s0(:,1) + 1j*(s0(:,2)); % komplexni signal

    % Fourierova transformace komplexniho signalu a posuv na zaporne frekvence
    fft_s0 = fft(s1,fs);
    fft_s = nas .* abs(fft_s0); % orezani-filtr + absolutni hodnota
    fft_s1 = fftshift(fft_s); % posun na nulu uprostred
    zob = fft_s1(fs/2-fh:fs/2+fh); % zobrazeni spektra do grafu
    fft_s1(fft_s1<limA) = 0; % prahovani na limit lim2
    [fa, fb] = findpeaks(fft_s1); % fa - hodnota fourierovy transformace, fb = frekvence (fft shift)

    fb = fb - fs/2; % posun na opravdove frekvence (kvuli fftshift)

    % trideni na nejsilnejsi signaly

    [f_set ,f_por] = sort(fa,'descend'); % f_set - setridene poradí velikosti, f_por - poradí od největsiho
    fb1 = fb(f_por); % setridene frekvence podle největsi amplitudy
    fb1 = [fb1' zeros(1,poc_m)]; % doplneni nulama do konce
    fb1 = fb1(1:poc_m); % jen poc_m prvku ve vektoru
    % prevod na rychlost v km/h
    vb = fb1.*(c/(2*f0)*3.6/cos(fi*pi/180));

    if t1 == 1; % cyklus testovani STOP talcicka
        name = get(Sname,'String');
        close;
        break; % vyskocit z cyklu!
    end;
end % konec hlavniho cyklu
```