



Fakulta elektrotechnická  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Radarové měření vzdálenosti

Autor práce: Luděk Dudáček  
Vedoucí práce: Doc. Ing. Jiří Masopust, CSc.

Plzeň 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luděk DUDÁČEK**  
Osobní číslo: **E09B0260P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Radarové měření vzdálenosti**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte a popište principy radarového měření vzdálenosti.
2. Prostudujte a popište dostupná řešení radarových dálkoměrů.
3. Prostudujte a popište vlastnosti součástí vhodných pro radarové dálkoměry.
4. Navrhněte vlastní řešení radarového dálkoměru.
5. Podle možností realizujte důležité bloky navrženého dálkoměru (případně celý dálkoměr) a ověřte jejich vlastnosti.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Jiří Masopust, CSc.**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací  
Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Jiří Masopust, CSc.**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

# Abstrakt

V první části této práce je popsána základní teorie činnosti radaru spolu se strukturou radaru. Dále je v práci také stručný přehled hlavních typů radaru spolu s jejich principem funkce. Následně jsou popsány základní principy a metody měření vzdálenosti pomocí kontinuálních a pulsních radarů.

Obsahem druhé části je popis součástí obsahujících radarový přijímač a vysílač. S ohledem na to, že většina výrobců těchto součástí také nabízí pro svoje výrobky testovací zařízení, je v této části také stručně popsáno několik takových zařízení.

Třetí část se zabývá samotným návrhem radarového dálkoměru pracujícího na principu FMCW. Navrhované zařízení umožňuje získání dat z vysokofrekvenční části radarového dálkoměru pro následné číslicové zpracování.

## Klíčová slova

radarové měření vzdálenosti, dálkoměr, radar, FMCW

# Abstract

Dudáček, Luděk. *Radar Measurement of Distance* [*Radarové měření vzdálenosti*]. Pilsen, 2012. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Jiří Masopust

---

Fundamental theory of radar operations are described in the first section along with description of basic radar structure. Overview of various radar types and its functional principles is given here along with principles of radar distance measurements.

In the second section are presented monolithic devices for radar receivers and transmitters. Development kits with these components are presented here as well.

The third section is devoted to description of radar rangefinder based on the FMCW principle. The instrument is designed to gather data from the RF module and to transmit it to the computer for subsequent processing.

## Keywords

radar distance measurement, rangefinder, radar, FMCW

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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 závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 30. května 2012

Luděk Dudáček

.....

Podpis

# Obsah

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	vii
Seznam symbolů a zkratk	viii
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Základní teorie činnosti radarů</b>	<b>3</b>
2.1 Princip činnosti radaru . . . . .	3
2.1.1 Základní části radaru . . . . .	3
2.2 Frekvenční pásma . . . . .	4
2.3 Maximální dosah radaru (radarová rovnice) . . . . .	5
2.3.1 Výkon odraženého signálu na vstupu přijímače . . . . .	5
2.3.2 Odstup signál-šum . . . . .	6
2.4 Rozlišovací schopnosti radaru . . . . .	7
2.4.1 Vztah mezi velikostí cíle a vlnovou délkou . . . . .	7
2.4.2 Prostorové rozlišení . . . . .	7
2.5 Dopplerův posun . . . . .	8
2.6 Rozdělení radarů . . . . .	8
2.6.1 Dopplerovský kontinuální radar . . . . .	8
2.6.2 Frekvenčně modulovaný kontinuální radar . . . . .	9
2.6.3 Pulsní radary . . . . .	9
2.7 Princip radarového měření vzdálenosti . . . . .	9
2.7.1 Měření vzdálenosti FMCW radarem . . . . .	9
2.7.2 Měření vzdálenosti pulsním radarem . . . . .	12
2.7.3 Maximální jednoznačně změřitelná vzdálenost . . . . .	13
<b>3 Dostupná řešení radarových dálkoměrů</b>	<b>14</b>
3.1 Součástky pro radarová měření . . . . .	14
3.1.1 SiversIMA FMCW radar sensor RS3400K/00 . . . . .	14
3.1.2 RFbeam Microwave GmbH . . . . .	15
3.1.2.1 Obvody K-LC1a a K-LC2 . . . . .	15

3.1.2.2	Obvod K-MC1 . . . . .	17
3.1.3	Přehled ostatních výrobců . . . . .	19
3.2	Komplexní řešení radarových dálkoměrů . . . . .	19
3.2.1	Novelda development kit NVA R620 . . . . .	19
3.2.2	RFbeam Microwave GmbH ST200 Evaluation Kit . . . . .	20
3.2.3	SiversIMA Controller Board CO1000A/00 . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Návrh radarového FMCW dálkoměru</b>	<b>22</b>
4.1	Princip funkce navrženého řešení . . . . .	22
4.2	Analogová část . . . . .	23
4.2.1	Řídicí signály pro obvod K-MC1 . . . . .	23
4.3	Zpracování signálu z analogové části . . . . .	26
4.3.1	Princip funkce zpracování analogového signálu . . . . .	26
4.3.2	Požadavky na obvody provádějící zpracování analogového signálu . . . . .	27
4.4	Komunikace s PC . . . . .	28
4.5	Napájení . . . . .	28
4.6	Průběh měření a zpracování dat . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>31</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>32</b>



# Seznam obrázků

2.1	Princip činnosti radaru. . . . .	3
2.2	Základní blokové schéma radaru se společnou anténou pro vysílání i příjem. . . . .	4
2.3	Blokové schéma FMCW radaru. . . . .	10
2.4	Stanovení vzdálenosti pomocí rozdílové frekvence FMCW radaru. . . . .	11
2.5	Vliv Dopplerova posunu na rozdílovou frekvenci FMCW radaru. . . . .	11
2.6	Časový rozvrh činnosti pulsního radaru. . . . .	12
2.7	Rozdělení přijatého signálu do políček. . . . .	12
2.8	Nejednoznačné určení vzdálenosti při příliš krátké PRT. . . . .	13
3.1	Nákres obvodu SiversIMA RS3400K/00  Převzato z [4]  . . . . .	15
3.2	Blokové schéma obvodů RFbeam K-LC1a a K-LC2 . . . . .	16
3.3	Vyzařovací charakteristiky antén obvodů RFbeam K-LC1a a K-LC2. . . . .	17
3.4	Blokové schéma obvodu RFbeam K-MC1. . . . .	18
3.5	Vyzařovací charakteristika antén obvodu K-MC1  Převzato z [7]  . . . . .	18
3.6	Blokové schéma NVA R620. . . . .	19
3.7	Blokové schéma ST200  Převzato z [8]  . . . . .	20
3.8	Blokové schéma CO1000A/00 . . . . .	21
4.1	Blokové schéma navrhovaného radarového dálkoměru . . . . .	22
4.2	Rozložení veličin pro výpočet $\Delta f$ a T. . . . .	24
4.3	Blokové schéma zdroje řídicích signálů . . . . .	25
4.4	Blokové schéma zpracování analogového signálu . . . . .	27
4.5	Blokové schéma komunikace s PC . . . . .	28

# Seznam tabulek

2.1	Frekvenční pásma používaná pro činnost radarů . . . . .	5
3.1	Shrnutí parametrů obvodu SiversIMA RS3400K/00 . . . . .	15
3.2	Porovnání obvodů RFbeam K-LC1a a K-LC2 . . . . .	16
3.3	Některé parametry obvodu RFbeam K-MC1 . . . . .	17
4.1	Napájecí napětí jednotlivých obvodů . . . . .	29

# Seznam symbolů a zkratek

<i>A</i> .....	Efektivní plocha přijímací antény. [ $m^2$ ].
<i>ADC</i> .....	Analog to Digital Converter. Analogově digitální převodník.
<i>B</i> .....	Šířka pásma přijímače. [ $HZ$ ].
<i>c</i> .....	Rychlost šíření světla ve vakuu ( $c = 3 \cdot 10^8 ms^{-1}$ ).
<i>CW</i> .....	Continous Wave Radar. Kontinuální radar.
<i>DAC</i> .....	Digital to Analog Converter. Digitálně analogový převodník.
<i>DMA</i> .....	Direct Memory Access. Přímý přístup do paměti.
<i>F</i> .....	Šumové číslo. [-].
<i>f</i> .....	Frekvence [ $HZ$ ]
<i>FMCW</i> .....	Frequency Modulated Continous Wave Radar. Kontinuální radar s frekvenční modulací.
<i>f<sub>D</sub></i> .....	Dopplerův posun. [ $HZ$ ].
<i>f<sub>RX</sub></i> .....	Přijatý kmitočet. [ $HZ$ ].
<i>f<sub>S</sub></i> .....	Vzorkovací kmitočet
<i>f<sub>TX</sub></i> .....	Vysílaný kmitočet. [ $HZ$ ].
<i>G<sub>R</sub></i> .....	Zisk přijímací antény. [-].
<i>G<sub>T</sub></i> .....	Zisk vysílací antény. [-].
<i>IF</i> .....	Intermediate Frequency. Mezifrekvenční kmitočet. [ $HZ$ ].
<i>k</i> .....	Boltzmannova konstanta ( $k = 1,380662 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$ ).
<i>L</i> .....	Ztráty. [-].
<i>MEM</i> .....	Memory. Paměť.
<i>MUX</i> .....	Multiplexer.
<i>N</i> .....	Teplotní šum. [-].
<i>PC</i> .....	Personal Computer. Osobní počítač.
<i>P<sub>R</sub></i> .....	Výkon odražený od cíle. [ $W$ ].
<i>PRF</i> .....	Pulse Repetition Frequenci. Kmitočet opakování pulsů. [ $HZ$ ].
<i>PRT</i> .....	Pulse Repetition Period. Periode opakování pulsů. [ $s$ ].
<i>P<sub>RX</sub></i> .....	Přijatý výkon. [ $W$ ].
<i>P<sub>TX</sub></i> .....	Výkon vyzářený vysílačem. [ $W$ ].
<i>R</i> .....	Vzdálenost cíle. [ $m$ ].
<i>RCS</i> .....	Radar Cross Section. Efektivní odrazivá plocha.
<i>Rx</i> .....	Přijímač, přijímací část

$SNR$ .....	Signal to Noise Ratio. Odstup signál-šum. $[-]$ .
$SFCW$ .....	Stepped Frequency Continuous Wave Radar. Kontinuální radar se skokovou změnou kmitočtu.
$S_R$ .....	Plošná hustota odraženého výkonu. $[Wm^{-1}]$ .
$S_{TX}$ .....	Plošná hustota vyzářeného výkonu. $[Wm^{-1}]$ .
$T_0$ .....	Teplota přijímače. $[K]$ .
$T_x$ .....	Vysílač, Vysílací část
$UART$ .....	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. Universální asynchronní přijímač/vysílač.
$U_{DAx}$ .....	Výstupní napětí D/A převodníku.
$UHF$ .....	Ultra High Frequency. Ultra vysoká frekvence.
$USB$ .....	Universal Serial Bus. Universální sériová sběrnice.
$U_{VCO}$ .....	Řídicí napětí VCO.
$VCO$ .....	Voltage Controlled Oscillator. Napětím řízený oscilátor.
$V_{CC}$ .....	Napájecí napětí.
$VHF$ .....	Very High Frequency. Velmi vysoká frekvence.
$v_r$ .....	Relativní rychlost cíle vzhledem k radaru. $[ms^{-1}]$ .
$\lambda$ .....	Vlnová délka $[m]$
$\sigma$ .....	Radar Cross Section. Efektivní odrazivá plocha. $[m^2]$ .
$\Delta t$ .....	Čas mezi vysláním pulsu a zachycením echa. $[s]$ .
$\Delta f$ .....	Rozdílový kmitočet. $[Hz]$ .
$\mu P$ .....	Mikroprocesor.

# 1

## Úvod

Radar je zařízení sloužící k detekci objektů nacházejících se v jeho dosahu a měření vzdálenosti a rychlosti těchto objektů. Samotné slovo radar vzniklo spojením anglických slov *Radio Detection and Ranging*. Jak sám název napovídá, radar využívá pro zjišťování zmíněných informací o objektech v dosahu rádiových vln.

Historie zařízení nazývaného radar sahá až do počátku minulého století. V roce 1903 experimentoval německý inženýr Christian Hülsmeier s odrazem elektromagnetických vln od lodí. O rok později získal na svůj vynález patent. První radar schopný detekovat letadlo byl vyvinut v Naval Research Laboratory L. A. Hylandem v létě 1930. První skutečně použitelný radar pro detekci letadel sestrojil v roce 1935 skotský elektrotechnik Robert Watson-Watt.[2] Druhá světová válka znamenala pro radar velký skok kupředu. Na začátku války byly využívány rozměrné pozemní radarové stanice k detekci blížících se nepřátelských letadel. V průběhu války však byly výkony radaru natolik zlepšeny, že mohl být masivně nasazován pro detekci a navigaci letadel a lodí. Na konci války byl radar natolik zdokonalen, že bylo možné vybavit jím dokonce i menší letadla. Tento palubní radar byl využíván zejména k navigaci při nočních operacích. Po válce byl radar dále zdokonalován. Bylo vyvinuto množství metod a zařízení, které umožnili zpřesnění informací získaných z radaru. Důležitou roli ve vývoji radarů sehrál vznik počítače a s ním příchod možnosti číslicového zpracování signálu. Se začátkem kosmických letů začal být radar využíván i ve vesmíru. Při kosmických letech byl využíván pro určování přesné polohy kosmické lodi, pro navigaci při spojování kosmických lodí, pro měření výšky kosmických lodí nad povrchem vesmírných těles a pro mapování vesmírných těles.

Při současné hustotě letového a lodního provozu si nelze řízení těchto provozů bez použití radaru představit. Proto se stal radar nedílnou součástí většiny letišť, letadel a lodí. Jednou z velkých oblastí využívající v dnešní době radarová měření je také meteorologie. V meteorologii je radar zdrojem důležitých informací o profilu oblačnosti, srážek a rychlosti větru. Rozvoj jednočipových radarů v posledních letech umožnil použití těchto radarů v osobních automobilech v asistentech pro couvání, pro kontrolu slepých zón za vozidlem a kontrolu odstupů od ostatních vozidel. Další možností využití mikrovýkonových jednočipových radarů se nachází v lékařství. Je prováděno zkoumání možností nasazení těchto

radarů pro bezkontaktní monitorování dechu a činnosti srdce.

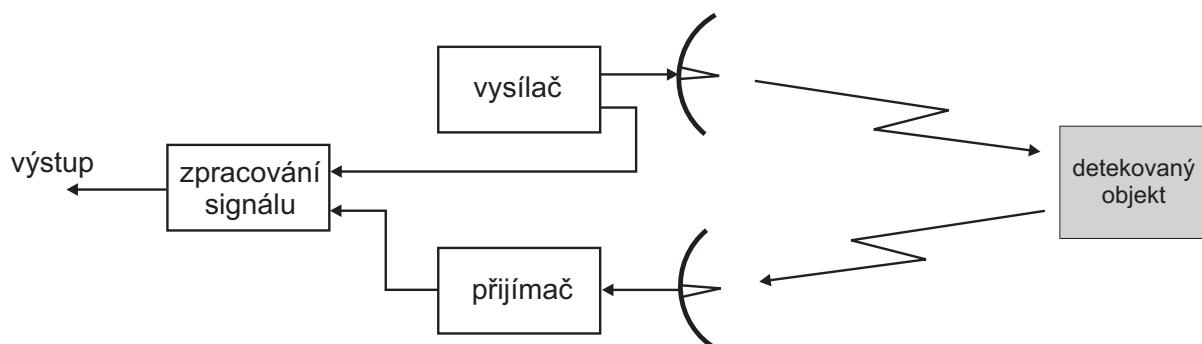
Měření vzdálenosti je základní funkce umožňující použití radaru pro určování polohy objektů v jeho dosahu. Většina metod používaných v radiolokaci a radionavigaci vychází právě z měření vzdálenosti. Cílem této práce je prostudovat a popsat principy měření vzdáleností pomocí radaru jako základ dalších radarových měření. Zvolit jednu z popsaných metod a navrhnout pro ni zařízení umožňující experimentální ověření zvolené metody měření vzdálenosti. Zároveň prostudovat a popsat základní principy funkce podobných zařízení vyráběných profesionálními výrobci. Pro navrhované zařízení bude použit vhodný profesionálně vyráběný obvod určený pro zvolený způsob radarového měření. Navržené zařízení by mělo umožňovat nastavení důležitých parametrů měření, provedení samotného měření a uložení výstupních dat. Naměřená data by mělo být možné předávat dalším systémům pro jejich zpracování a získání informace o vzdálenosti. Pokud to bude možné, tak navržené zařízení také otestovat.

## 2

# Základní teorie činnosti radarů

## 2.1 Princip činnosti radaru

Princip činnosti radaru spočívá ve vyslání elektromagnetické vlny vysílačem. Vyslaná vlna se šíří prostorem a odraží se od objektů, na které dopadne. Odražená vlna, která je někdy nazývána echo, je poté přijímána přijímačem. Přijatý signál je pak dále vyhodnocován za účelem získání informací o objektu, od kterého se vlna odrazila. Tímto způsobem je možné získat informace o poloze, vzdálenosti a relativní rychlosti objektu vzhledem k radaru, který objekt detekoval. Na obrázku 2.1 je znázorněn princip činnosti radaru.



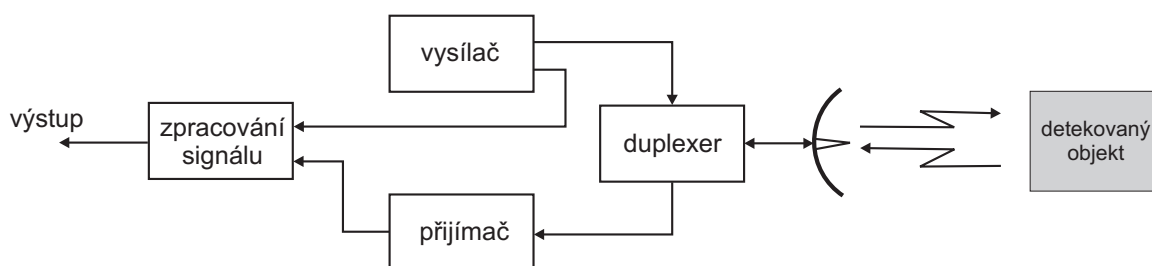
Obr. 2.1: Princip činnosti radaru.

### 2.1.1 Základní části radaru

Z principu činnosti vyplývají čtyři základní bloky radaru:

- **Vysílač** - Úkolem vysílače je vhodné vytvarování elektromagnetické vlny a její následné vyslání s dostatečným výkonem.
- **Anténa** - Na kvalitě antény závisí dosah, citlivost a směrové rozlišení radaru. Pro radary jsou používány zpravidla vysoce směrové antény. Z nastavení antény se určuje směr a výška detekovaného cíle. Často bývá používána jediná anténa pro vysílání i příjem.

- **Přijímač** - Úkolem přijímače je zachytit odražený signál a zesílit jej na dostatečnou úroveň, aby mohl být dále zpracován. Síla zachyceného signálu závisí zejména na vzdálenosti cíle. Při zachycení echa od blízkého cíle může být signál poměrně silný, naopak signály odražené od vzdálenějších cílů budou velmi slabé. Přijímač proto musí být schopný zpracovávat signály s velkým dynamickým rozsahem. Vzhledem ke zpracování velmi slabých signálů je od obvodů přijímače požadován malý šum.
- **Blok zpracování signálu** - V bloku zpracování signálu je prováděno vyhodnocování přijatého signálu. Výpočet vzdálenosti detekovaného cíle, vyhodnocení jeho rychlosti a popřípadě potlačení nežádoucích odrazů (clutter) například z postranních laloků antény nebo od okolního terénu.
- **Duplexer** - V případě, že radar používá pro vysílání a příjem jednu anténu je nezbytnou součástí duplexer. Úkolem duplexeru je zabránit vysílanému signálu v pronikání na vstup přijímače a přijatému signálu pronikání do vysílače. Blokové schéma radaru se společnou anténou pro vysílání i příjem je znázorněno na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Základní blokové schéma radaru se společnou anténou pro vysílání i příjem.

## 2.2 Frekvenční pásma

Radary využívají pro svoji činnost kmitočty od stovek kHz až do 110GHz. Toto frekvenční spektrum je rozděleno do několika pásem. Jednotlivá pásma jsou značena písmeny. Označení jednotlivých pásem s příslušnými kmitočty a jim odpovídajícími vlnovými délkami jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Radary pracující s kmitočty v nižších pásmech než UHF se využívají pro speciální aplikace například v meteorologii pro měření profilu oblačnosti.

Frekvenční pásma UHF a L jsou využívána pro radary dlouhého dosahu. Velký dosah těchto radarů je umožněn relativně malým útlumem signálu při šíření atmosférou. Radary v těchto pásmech jsou schopné pracovat do vzdáleností několika set kilometrů.

Ve frekvenčních pásmech S a C pracují zejména přehledové radary středního dosahu. Pásma X až Ka jsou používány pro radary se středním až malým dosahem. Pro tyto kmitočty se začíná výrazněji projevovat atmosférický útlum, který má za následek zkrácení dosahu na stovky metrů až desítky kilometrů.



V pásmu V a W se do velké míry projevuje velký útlum elektromagnetické vlny v atmosféře. Radary v tomto pásmu se vyznačují velmi krátkým dosahem řádově jednotek až desítek metrů.

frekvenční pásmo	frekvence f [GHz]	vlnová délka $\lambda$ [cm]
VHF a nižší	menší než 0,3	větší než 100
UHF	0,3 až 1	100 až 30
L	1 až 2	30 až 15
S	2 až 4	15 až 7,5
C	4 až 8	7,5 až 3,75
X	8 až 12,5	3,75 až 2,4
Ku	12,5 až 18	2,4 až 1,7
K	18 až 26,5	1,7 až 1,1
Ka	26,5 až 40	1,1 až 0,75
V	40 až 75	0,75 až 0,4
W	75 až 110	0,4 až 0,27

**Tab. 2.1:** Frekvenční pásma používaná pro činnost radarů

## 2.3 Maximální dosah radaru (radarová rovnice)

Maximální dosah radaru je dán výkonem přijímaného signálu odraženého od detekovatelného objektu. Tento signál musí mít dostatečný výkon, aby mohl být přijímačem dále zpracován.

### 2.3.1 Výkon odraženého signálu na vstupu přijímače

Pro stanovení přijatého výkonu použijeme následující odvození. Plošná hustota vyzářeného výkonu je dána vztahem 2.1:

$$S_{TX} = \frac{P_{TX} \cdot G_T}{4\pi R^2} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right], \quad (2.1)$$

kde je:  $S_{TX}$  plošná hustota vyzářeného výkonu směrové antény,  
 $P_{TX}$  výkon vyzářený vysílačem,  
 $G_T$  zisk antény,  
 $4\pi R^2$  kulová plocha o poloměru R.

Tímto výkonem je ve vzdálenosti R ozářen objekt, od kterého se část výkonu odrazí zpět. Odražená energie bude závislá na velikosti objektu a jeho odrazivosti. Tyto vlastnosti

jsou shrnuty v parametru  $\sigma$ . Tento parametr je nazýván ekvivalentní odrazivá plocha (RCS - radar cross section) s jednotkou  $m^2$ . Pro doražený výkon pak bude platit vztah 2.2:

$$P_R = \frac{P_{TX} G_T \sigma}{4\pi R^2} \quad [W]. \quad (2.2)$$

Pro plošnou hustotu výkonu pak můžeme psát:

$$S_R = \frac{P_{TX} G_T \sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.3)$$

Výkon přijatý přijímačem je závislý na zisku přijímací antény. Pro zisk přijímací antény v závislosti na její efektivní ploše  $A$  platí následující vztah:

$$G_R = \frac{4\pi}{\lambda^2} A \quad [-]. \quad (2.4)$$

Pro přijatý výkon pak můžeme psát vztah 2.5 respektive 2.6.

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_T \sigma G_R}{(4\pi)^2 R^4} \quad [W], \quad (2.5)$$

resp.:

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_T \sigma \lambda^2 A}{(4\pi)^3 R^4} \quad [W]. \quad (2.6)$$

Dále je nutné uvažovat ještě ztráty v atmosféře a ztráty způsobené nedokonalostí celého systému. Všechny tyto ztráty jsou shrnuty do jednoho parametru  $L$ . Přijatý výkon ovlivní následujícím způsobem:

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_T \sigma \lambda^2 A}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad [W]. \quad (2.7)$$

### 2.3.2 Odstup signál-šum

Z rovnice pro přijímaný výkon je zřejmé, že výkon přijímaného signálu klesá se čtvrtou mocninou vzdálenosti detekovaného objektu. Na vstupu přijímače proto bude velmi slabý signál. K tomuto užitečnému signálu se dále přičítá signál rušivý. Zdrojem rušivého signálu je kromě rušivých signálů přijímaných z okolí také samotný přijímač, jehož součástky vlivem ohřívání vytvářejí šum. Pro takto vzniklý šum platí vztah 2.8

$$N = (F - 1)kT_0B \quad [-], \quad (2.8)$$

kde je:  $N$  teplotní šum přijímače,  
 $F$  šumové číslo přijímače,  
 $k$  Boltzmannova konstanta,  
 $T_0$  teplota přijímače,  
 $B$  šířka pásma přijímače.

Odstup signál-šum je dán poměrem výkonu užitečného signálu a výkonu šumu:

$$SNR = \frac{P_{TX} G_T \sigma \lambda^2 A}{(F - 1)kT_0B(4\pi)^3 R^4 L} \quad [-]. \quad (2.9)$$

Maximální teoreticky možný dosah radaru je dán požadovaným odstupem signál-šum a vyslaným výkonem. Pro maximální dosah radaru pak můžeme psát vztah 2.10.

$$R_{MAX} = \sqrt[4]{\frac{P_{TX} G_T \sigma \lambda^2 A}{(F-1) k T_0 B (4\pi)^3 SNR \cdot L}} \quad [m]. \quad (2.10)$$

## 2.4 Rozlišovací schopnosti radaru

### 2.4.1 Vztah mezi velikostí cíle a vlnovou délkou

Jak již bylo zmíněno v popisu základní teorie činnosti radaru, je pro činnost radaru využíváno odrazů elektromagnetických vln od určitých objektů. Z teorie šíření elektromagnetických vln je známé, že se elektromagnetické vlny odrážejí od objektů srovnatelně velkých s vlnovou délkou nebo větších. Objekty menších rozměrů budou odrážet jen malou část energie (výrazně začne klesat RCS). Z této skutečnosti vyplývá, že rozlišovací schopnost radaru je závislá na vlnové délce, se kterou daný radar pracuje. Pro vlnovou délku platí následující vztah:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m], \quad (2.11)$$

kde je:  $f$  pracovní frekvence radaru,  
 $c$  rychlost šíření světla ve vakuu,  
 $\lambda$  vlnová délka.

### 2.4.2 Prostorové rozlišení

Nachází-li se dva cíle blízko sebe, může být problémem rozpoznat z přijatého signálu, zda se jedná o dva cíle nacházející se blízko sebe nebo jestli se jedná o jediný objekt. Schopnost toto rozpoznat je dána zejména podobou vyslaného pulsu. Platí, že čím kratší je vyslaný puls, tím blíž u sebe mohou být objekty aby byly rozlišeny jako dva a ne jako jeden. Teoretická hodnota prostorového rozlišení je dána vztahem 2.12:

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad [m] \quad (2.12)$$

kde je:  $\Delta R$  vzdálenost mezi dvěma cíli  
 $c$  rychlost šíření elektromagnetické vlny  
 $\tau$  šířka vyslaného pulsu

Zkracování vyslaného pulsu s sebou však přináší problémy spojené s energií přijatého signálu, který je pak obtížnější rozpoznat v šumu. Použitím vhodné modulace vyslaného pulsu je možné dosáhnout velké rozlišovací schopnosti a současně přijmu signálu s dostatečnou energií.

## 2.5 Dopplerův posun

Pokud se detekovaný objekt pohybuje určitou nenulovou rychlostí směrem k radaru nebo od radaru, dochází při odrazu signálu k Dopplerovu posunu. Dopplerův posun je jev, který způsobuje změnu kmitočtu odraženého signálu vůči vyslanému signálu. Tuto změnu kmitočtu lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$f_D = \frac{2v_r}{\lambda} \quad [Hz], \quad (2.13)$$

kde je:  $f_D$  dopplerův posun,  
 $v_r$  výkon vyzářený vysílačem,  
 $\lambda$  vlnová délka.

Z uvedeného vztahu je patrné, že při pohybu sledovaného objektu směrem k radaru je kmitočet odraženého signálu vyšší než kmitočet vyslaný radarem. Pohybuje-li se sledovaný objekt směrem od radaru bude kmitočet odraženého signálu nižší než vysílaný kmitočet.

Tohoto jevu se využívá pro určení relativní rychlosti sledovaného objektu vzhledem k radaru.

## 2.6 Rozdělení radarů

Z pohledu konstrukčního provedení rozlišujeme radary monostatické a radary bistatické. Monostatické radary mají vysílač i přijímač na jednom místě. Vysílače a přijímače monostatického radaru často používají společnou anténu, která je střídavě přepínána pro vysílání a příjem. Přijímač a vysílač bistatického radaru jsou vzájemně odděleny a mohou dokonce být umístěny na rozdílných místech. Další rozdělení radarů je dáno podobou signálu se kterým radary pracují. Podle tohoto kritéria rozlišujeme radary na pulsní a kontinuální. Kontinuální radary dále můžeme rozlišovat na radary dopplerovské a radary s modulovaným signálem.

### 2.6.1 Dopplerovský kontinuální radar

Dopplerovský radar patří do skupiny kontinuálních radarů. Kontinuální radary jsou označovány zkratkou CW (Continuous Wave radar). Vysílač dopplerovského radaru vysílá souvislý harmonický signál s konstantním kmitočtem. Tento signál se odráží od okolních objektů a následně je zachycen přijímačem. Pokud se však některý z objektů způsobujících odraz signálu pohybuje určitou nenulovou rychlostí vzhledem k radaru, dochází k Dopplerovu posunu. U přijatého signálu je zjišťována velikost tohoto posunu a z ní následně stanovena rychlost daného objektu.

Z principu činnosti dopplerovského radaru je zřejmé, že tato technologie umožňuje zjištění pouze pohybujících se cílů. U detekovaných objektů však není možné stanovit

jejich vzdálenost. Důvodem této skutečnosti je to, že nelze změřit čas mezi vysláním signálu a následným příjmem echa.

Za účelem stanovení vzdálenosti zjištěného objektu jsou kontinuální radary doplňovány frekvenční nebo fázovou modulací.

### 2.6.2 Frekvenčně modulovaný kontinuální radar

Pro získání informace o vzdálenosti sledovaného objektu je zapotřebí upravit průběh vysílaného signálu tak, aby bylo možné určit zpoždění mezi vysláním signálu a následným zachycením echa. Jednou z možností úpravy vysílaného signálu je frekvenční modulace. Radary využívající frekvenčně modulovaný souvislý signál jsou označovány jako FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave Radar) radary. Vysílaný signál je zpravidla modulován pilovým průběhem, který umožňuje snadné stanovení zjišťovaného zpoždění. Této technologii je často využíváno v radarových výškoměrech.

### 2.6.3 Pulsní radary

Pulsní radary se od kontinuálních radarů liší tím, že nevysílají a nepřijímají soustavně, ale vysílají velmi krátký elektromagnetický puls o relativně velkém výkonu. Poté co je vyslán puls, je aktivován přijímač, který se snaží zachytit odražený signál. Po uplynutí určitého časového intervalu je vypnut přijímač a vyslán další puls. Z časového odstupů mezi vyslaným a přijatým signálem je opět možné určit vzdálenost sledovaného objektu. Do této skupiny spadají také radary používající pulsní kompresi.

## 2.7 Princip radarového měření vzdálenosti

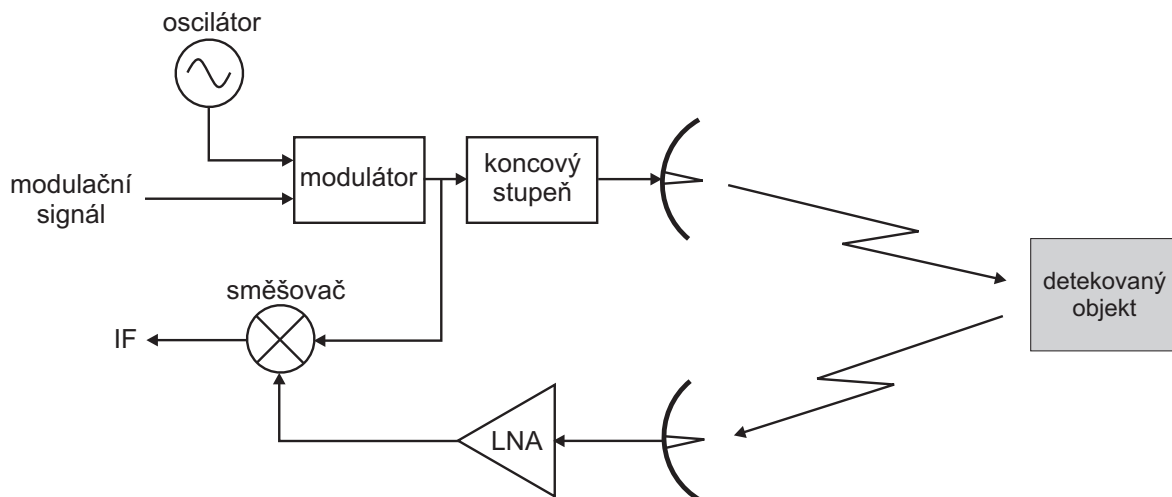
Základním principem měření vzdálenosti pomocí radaru je zjištění doby, kterou potřebuje vyslaná elektromagnetická vlna na překonání vzdálenosti od antény k cíli a zpět. Z této doby a známé rychlosti šíření elektromagnetické vlny prostorem pak snadno můžeme spočítat vzdálenost cíle od antény podle vztahu 2.14:

$$R = \frac{c}{2} \cdot \Delta t \quad [m], \quad (2.14)$$

kde je:  $R$  vzdálenost mezi anténou a cílem,  
 $c$  rychlost šíření elektromagnetické vlny,  
 $\Delta t$  čas mezi vysláním vlny a zachycením echa.

### 2.7.1 Měření vzdálenosti FMCW radarem

Pro měření vzdáleností pomocí kontinuálního radaru se využívá frekvenční modulace nosné. Jako modulační signál se nejčastěji používá pilový nebo trojúhelníkový průběh. V našem případě budeme uvažovat trojúhelníkový průběh znázorněný na obrázku 2.4.



Obr. 2.3: Blokové schéma FMCW radaru.

Princip činnosti FMCW radaru je znázorněn na obrázku 2.3. Vysílaný frekvenčně modulovaný signál se po odražení od cíle vrací k přijímači, kterým je zachycen a zesílen na požadovanou úroveň. Následně je přiveden do směšovače společně s právě vysílaným signálem. Na výstupu směšovače IF je pak přítomen signál s kmitočtem  $\Delta f$ , který odpovídá rozdílu kmitočtů signálu právě vysílaného  $\Delta f_{TX}$  (na obrázku 2.4 plnou čarou) a signálu přijatého  $\Delta f_{RX}$  (na obrázku 2.4 čárkovanou čarou). Pro kmitočet  $\Delta f$  je možné napsat vztah 2.15.

$$\Delta f = f_{TX} - f_{RX} \quad [Hz] \quad (2.15)$$

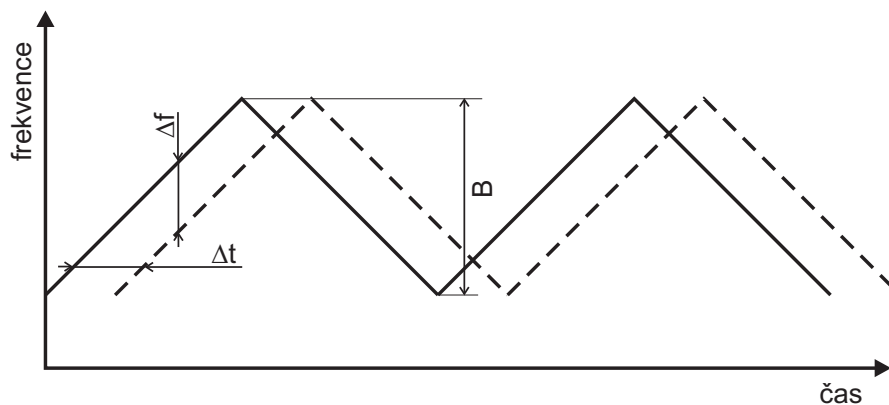
Pokud známe strmost, se kterou je měněn kmitočet vysílaného signálu, můžeme snadno vypočítat čas  $\Delta t$ , který odpovídá času potřebnému pro to aby elektromagnetická vlna překonala dvojnásobek měřené vzdálenosti (k cíli a zpět). Čas  $\Delta t$  můžeme vyjádřit rovnicí 2.16:

$$\Delta t = \frac{PRT}{2B} \cdot \Delta f \quad [Hz]. \quad (2.16)$$

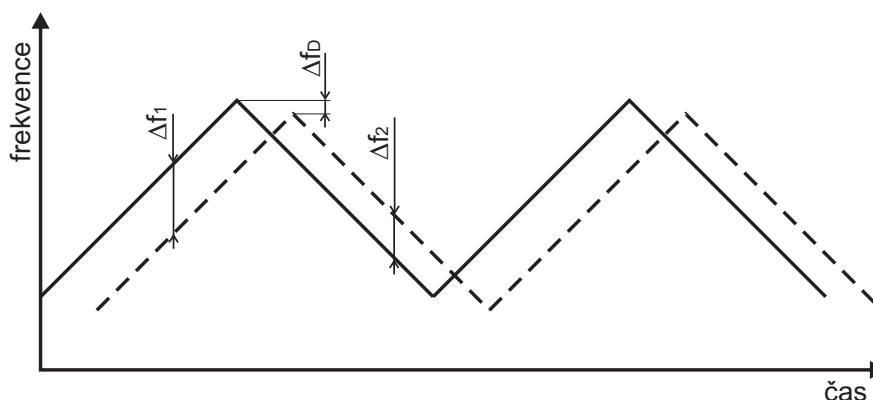
Dosadíme-li vztah pro  $\Delta t$  do rovnice 2.14, Dostaneme vztah pro vzdálenost mezi cílem a radarem (2.17) v závislosti na  $\Delta f$ :

$$R = \frac{c \cdot PRT}{4B} \cdot \Delta f \quad [m], \quad (2.17)$$

kde je: R měřená vzdálenost,  
 B frekvenční zdvih,  
 c rychlost šíření elektromagnetické vlny,  
 PRT perioda modulačního signálu,  
 $\Delta f$  rozdílový kmitočet.



Obr. 2.4: Stanovení vzdálenosti pomocí rozdílové frekvence FMCW radaru.



Obr. 2.5: Vliv Dopplerova posunu na rozdílovou frekvenci FMCW radaru.

V případě, že se cíl měření pohybuje nenulovou rychlostí směrem k radaru nebo od radaru, projeví se v rozdílové frekvenci  $\Delta f$  dopplerův posun  $f_D$ . Vliv dopplerova posunu je znázorněn na obrázku 2.5.

Pro frekvence  $\Delta f_1$  a  $\Delta f_2$  platí následující rovnice:

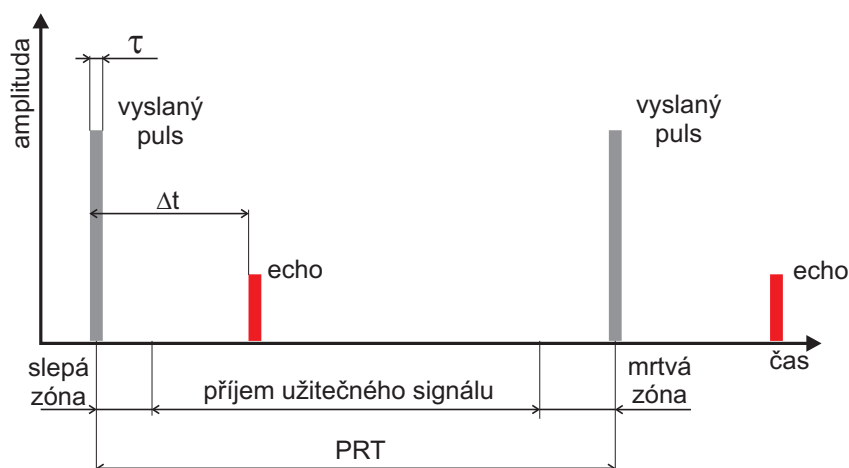
$$\begin{aligned} \Delta f_1 &= \Delta f + f_D \\ \Delta f_2 &= \Delta f - f_D \end{aligned} \tag{2.18}$$

Pro určení rozdílové frekvence  $\Delta f$  použijeme vztah 2.19:

$$\Delta f = \frac{1}{2}(\Delta f_1 + \Delta f_2) \quad [Hz] \tag{2.19}$$

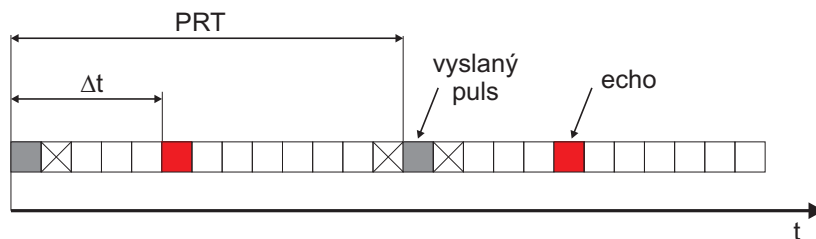
## 2.7.2 Měření vzdálenosti pulsním radarem

Princip měření vzdálenosti pulsním radarem spočívá ve vyslání časově krátkého pulsu s šířkou  $\tau$ . Poté co je vyslán tento puls, začne přijímač přijímat všechny příchozí signály. Mezi vysláním pulsu a začátkem příjmu odražených signálů se nachází ochranný interval chránící přijímač před poškozením vysílaným pulsem. Tento interval má za následek, že signály odražené od velmi blízkých cílů nebudou zachyceny. Minimální změřitelná vzdálenost je tedy dána délkou ochranného intervalu (slepé zóny). Po uplynutí doby příjmu užitečných signálů následuje mrtvá zóna, ve které je prováděna kalibrace a diagnostika. Poté je vyslán další puls. Časový rozvrh činnosti pulsního radaru znázorňuje obrázek 2.6.



Obr. 2.6: Časový rozvrh činnosti pulsního radaru.

Přijímaný signál je na časové ose rozdělen do políček časově vztažených k vyslanému pulsu. Pozice políčka, ve kterém se nalézá odražený signál určuje zpoždění potřebné k překováním dvojnásobku vzdálenosti mezi cílem a radarem. Rozdělení signálu do políček je znázorněno na obrázku 2.7. Přesnost měření vzdálenosti je dána velikostí jednotlivých políček. Čím kratší políčka jsou, tím přesněji bude stanovena vzdálenost.



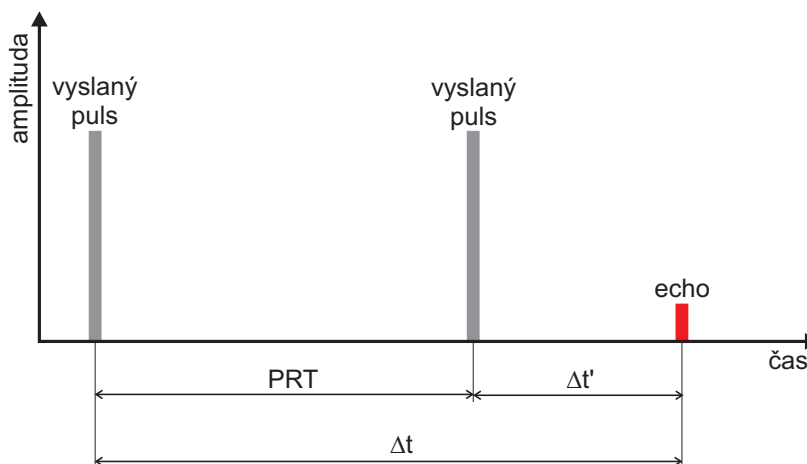
Obr. 2.7: Rozdělení přijatého signálu do políček.



Pokud radar používá modulovaný puls, může být přijatý signál zpracován dekompresí pulsu. Dekompresi pulsu umožňuje identifikovat odražený signál i ve velmi zarušeném prostředí. Vysílaný signál může být modulován pseudonáhodnou posloupností s ostrou autokorelační funkcí. Je-li pak přijatý signál porovnáván korelací s vysílanou pseudonáhodnou posloupností, objeví se na výstupu špičky v místech, kde je přítomen odražený signál s minimální časovým posuvem vzhledem k referenčnímu signálu.

### 2.7.3 Maximální jednoznačně změřitelná vzdálenost

Maximální jednoznačně změřitelná vzdálenost je dána periodou vysílání pulsů PRT. Aby mohla být vzdálenost detekovaného objektu jednoznačně stanovena musí být odražený signál přijat dříve než je vyslán další puls. Pokud je perioda vysílání pulsů příliš krátká a vzdálenost cíle relativně velká, může dojít k tomu, že je odražený signál přijat až po vyslání následujícího pulsu. V takovém případě však není změřena skutečná doba šíření signálu k cíli a zpět  $\Delta t$ , ale pouze doba mezi později vyslaným pulsem a příchodem echa  $\Delta t'$ . Tuto situaci znázorňuje obrázek 2.8. Je zřejmé, že vzdálenost vypočítaná z času  $\Delta t'$  je podstatně menší než skutečná vzdálenost cíle.



**Obr. 2.8:** Nejednoznačné určení vzdálenosti při příliš krátké PRT.

Z výše uvedeného vyplývá, že pokud není vysílaný puls vhodným způsobem modulován, musí být perioda vysílání pulsů větší než maximální doba  $\Delta t$ , aby mohla být jednoznačně stanovena vzdálenost. Tato skutečnost je shrnuta ve vztahu 2.20.

$$\Delta t_{MAX} < PRT \quad (2.20)$$

Pokud radar používá modulaci jednotlivých vysílaných pulsů pseudonáhodným kódem je možné rozlišit echa od jednotlivých pulsů použitím jiného modulačního kódu a tím správně stanovit dobu  $\Delta t$  i v případech, kdy  $\Delta t > PRT$ .

## 3

# Dostupná řešení radarových dálkoměrů

Řešením radarových měření se zabývá celá řada společností, které nabízejí jak samostatné součástky pro výrobu nízkovýkonových radarových senzorů, tak komplexnější řešení umožňující zpracování signálu z těchto součástek prostřednictvím vhodného výpočetního prostředí.

### 3.1 Součástky pro radarová měření

Většina společností zabývajících se vývojem radarové techniky nabízí součástky obsahující vysokofrekvenční části radaru. Tyto součástky mohou obsahovat pouze vysílač, pouze přijímač, vysílač i přijímač a případně ještě anténu nebo další obvody pro předběžné zpracování signálu. V další části jsou uvedeny se stručným popisem součástky obsahující vysílač i přijímač (transceiver).

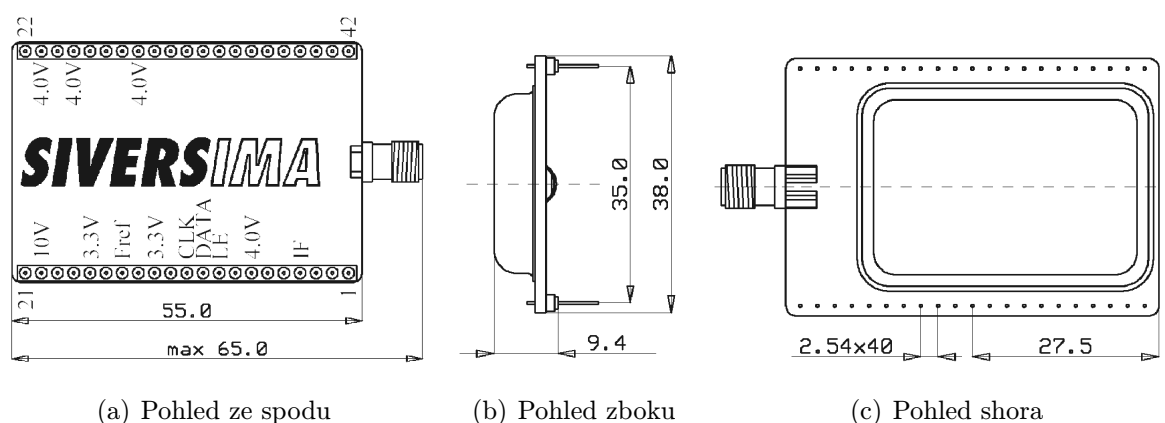
#### 3.1.1 SiversIMA FMCW radar sensor RS3400K/00

Švédská společnost SiversIMA nabízí obvod RS3400K/00 obsahující vysílač i přijímač FMCW radaru pracující v pásmu X nebo K s šířkou pásma 1500 MHz. Výstupní frekvence syntetizéru je řízena digitálně prostřednictvím sériového 3-vodičového rozhraní. Výstupní frekvence syntetizéru se nemění plynule, ale v určitých krocích. Proto je tento systém někdy nazýván SFCW (Stepped Frequency Continuous Wave) radar. S touto součástkou lze dosáhnout při měření vzdálenosti nepohybujících se objektů rozlišení 2 cm na vzdálenost 20 až 30 m. V tabulce 3.1 jsou shrnuty některé parametry tohoto obvodu. [4]

Cena tohoto obvodu je 795 EUR. Společnost SiversIMA má zastoupení v ČR společností TransTech Electronic s.r.o. K tomuto obvodu je dostupná řídicí deska CO1000A/00 popisovaná v kapitole 3.2.3.

parametr	hodnota
napájecí napětí	4 V 10 V 3,3 V
napájecí proud	25 mA 1 mA 35 mA
kmitočet vysílače	24,0 - 25,5 GHz
frekvenční rozsah $\Delta f_{VCO}$	1,5 GHz
výstupní výkon	15 dBm
max. dosah	20 - 30 m

Tab. 3.1: Shrnutí parametrů obvodu SiversIMA RS3400K/00



(a) Pohled ze spodu

(b) Pohled z boku

(c) Pohled shora

Obr. 3.1: Nákres obvodu SiversIMA RS3400K/00 [Převzato z [4]]

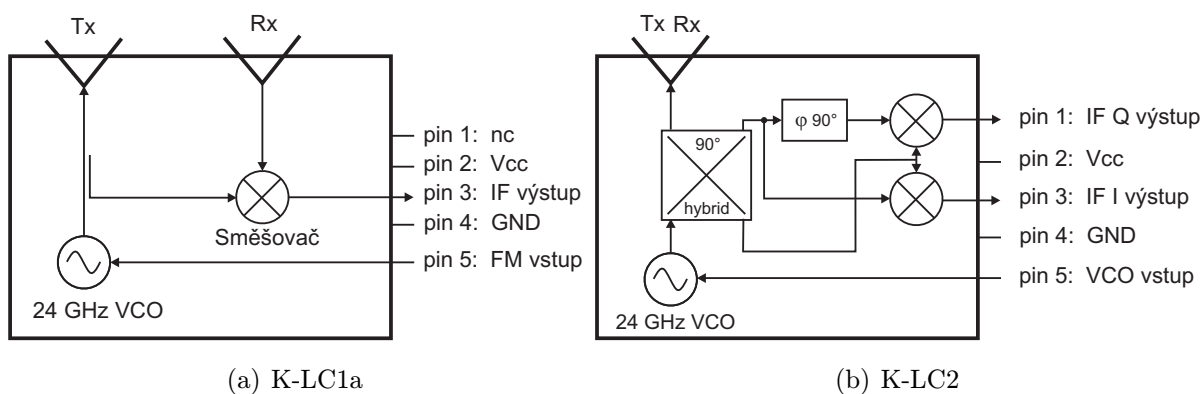
### 3.1.2 RFbeam Microwave GmbH

V nabídce společnosti RFbeam Microwave GmbH jsou radarové moduly obsahující mikrovlnné části radarových čidel pro měření vzdálenosti, detekci pohybu a případně měření rychlosti. Tyto moduly pracují v pásmu K.

#### 3.1.2.1 Obvody K-LC1a a K-LC2

Nejjednoduššími obvody z nabídky společnosti RFbeam jsou obvody K-LC1a a K-LC2 pro FMCW radary. Součástí obou obvodů je napěťově řízený oscilátor ovládaný vstupem FM. Obvod K-LC1a má samostatnou anténu pro vysílač a samostatnou anténu pro přijímač. Obvod K-LC2 používá pro vysílač a přijímač společnou anténu.

Výstupem obvodu K-LC1a je nezesílený mezifrekvenční kmitočet IF v pásmu 0 až 50 MHz. V případě obvodu K-LC2 je nezesílený mezifrekvenční kmitočet rozdělen na složky I a Q opět v pásmu 0 až 50 MHz. Na obrázku 3.2 je blokové schéma obvodů K-LC1a a K-LC2.



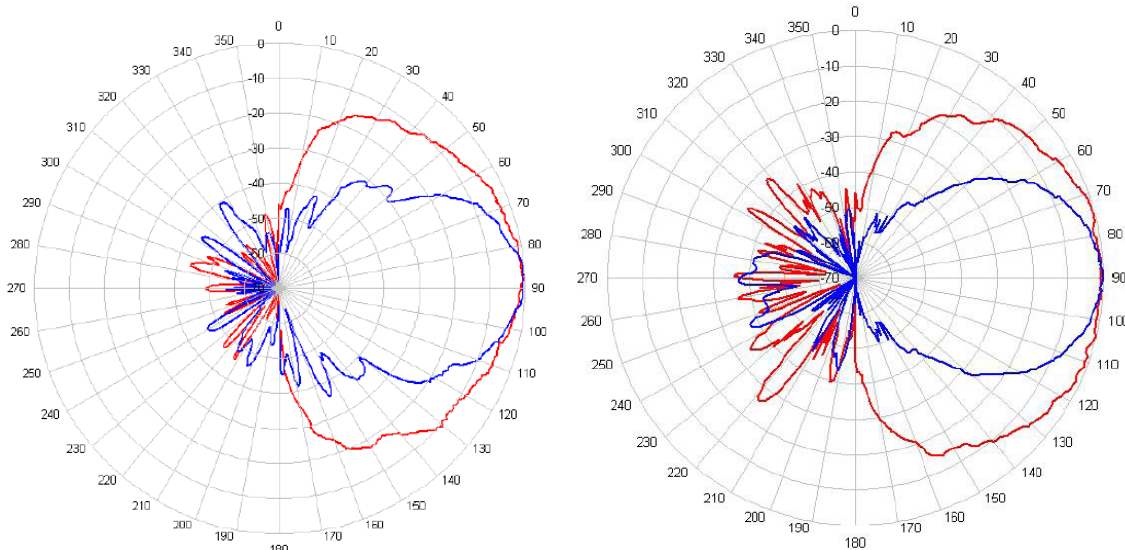
**Obr. 3.2:** Blokové schéma obvodů RFbeam K-LC1a a K-LC2

V tabulce 3.2 jsou uvedeny orientační hodnoty maximálních dosahů obvodů K-LC1a a K-LC2. Skutečný maximální dosah je však závislý na mnoha faktorech a způsobu zpracování přijatého signálu. Následující tabulka porovnává některé parametry těchto obvodů.

parametr	K-LC1a	K-LC2
napájecí napětí	5 V	5 V
napájecí proud	45 mA	45 mA
kmitočet vysílače	24,05 - 24,25 GHz	24,05 - 24,25 GHz
frekvenční rozsah $\Delta f_{VCO}$	180 MHz	100 MHz
výstupní výkon $P_{TX}$	12 - 17 dBm	12 - 17 dBm
citlivost přijímače $P_{RX}$	-96 dBm	-93 dBm
max. dosah osoby	12 m	9 m
auta	30 m	22 m

**Tab. 3.2:** Porovnání obvodů RFbeam K-LC1a a K-LC2

Součástí obou obvodů jsou vysílací a přijímací antény. Na obrázku 3.3 jsou uvedeny vyzářovací charakteristiky antén těchto obvodů. [5] [6]



(a) K-LC1a |Převzato z [5]|

(b) K-LC2 |Převzato z [6]|

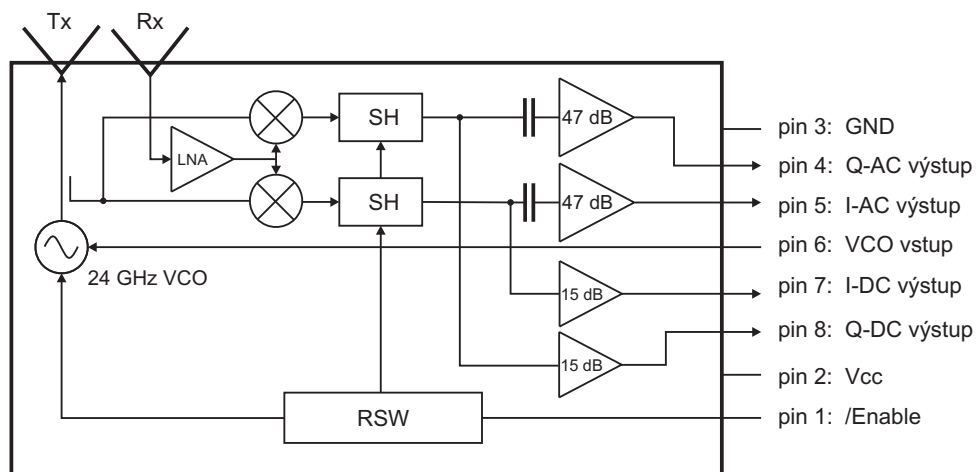
**Obr. 3.3:** Vyzařovací charakteristiky antén obvodů RFbeam K-LC1a a K-LC2.

### 3.1.2.2 Obvod K-MC1

Obvod RFbeam K-MC1 je komplexnějším řešením transceiveru FMCW radaru obsahující napěťově řízený oscilátor, vysílací a přijímací anténu, nízkošumový zesilovač přijatého signálu, směšovače pro I a Q složky přijatého signálu a zesilovače I a Q složek IF výstupu. Zesilovače výstupních signálů umožňují tyto výstupy přímo zpracovávat A/D převodníkem. Na obrázku 3.4 je blokové schéma tohoto obvodu. Navíc je tento obvod doplněn o možnost rychlého uspání a probuzení během 4  $\mu$ s pomocí vstupu *enable* umožňující úsporu energie. V následující tabulce jsou shrnuty některé parametry obvodu K-MC1. [7]

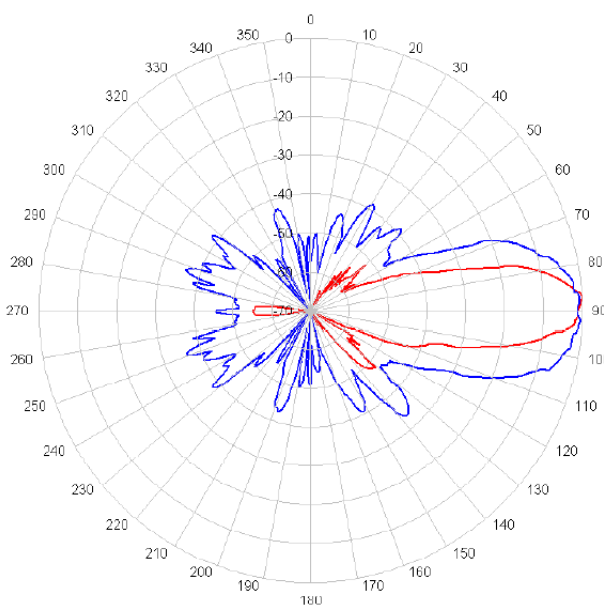
parametr	K-MC1
napájecí napětí	5 V
napájecí proud	enable v log. 0 enable v log. 1
kmitočet vysílače	24,05 - 24,25 GHz
frekvenční rozsah $\Delta f_{VCO}$	180 MHz
výstupní výkon $P_{TX}$	16 - 20 dBm
citlivost přijímače $P_{RX}$	- 123 dBm
frekvenční rozsah	DC výstupů AC výstupů
max. dosah	osoby auta

**Tab. 3.3:** Některé parametry obvodu RFbeam K-MC1



**Obr. 3.4:** Blokové schéma obvodu RFbeam K-MC1.

Součástí tohoto obvodu je vysílací a přijímací anténní sestava s následující směrovou charakteristikou.



**Obr. 3.5:** Vyzařovací charakteristika antén obvodu K-MC1 |Převzato z [7]|

K těmto i dalším modulům z nabídky RFbeam jsou k dispozici také zařízení ST100 Starterkit a ST200 Evaluation Kit poskytující potřebné obvody pro zpracování signálu z jednotlivých modulů. V kapitole 3.2.2 je podrobněji popsáno zařízení ST200 Evaluation Kit.

### 3.1.3 Přehled ostatních výrobců

Vývojem součástek pro radarová měření se věnuje kromě výše uvedených ještě řada dalších výrobců. Pro přehled uvádím několik dalších výrobců a součástek.

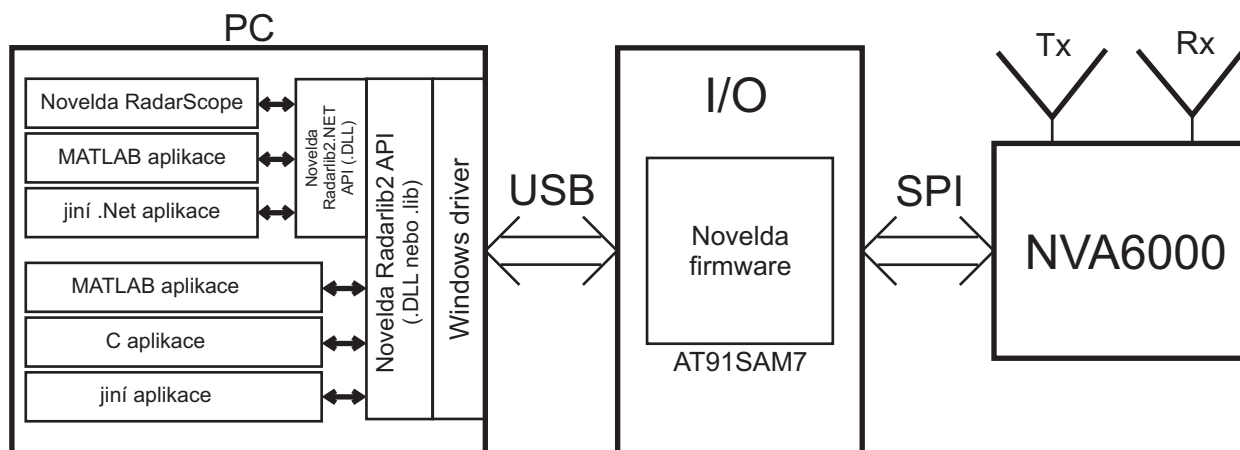
- **Silikon radar** - tato společnost se věnuje vývoji jednočipových FMCW radarů a pulsních radarů na bázi BiCMOS pracujících v pásmech od 10 GHz do cca 120 GHz.
- **ViaSat** - V nabídce společnosti ViaSat je jednočipový transceiver FMCW radaru pracující v pásmu 24 GHz.
- **Novelda** - Norská společnost specializující se na vývoj jednočipových pulsních radarů. V nabídce této společnosti je vývojová deska popisovaná v kapitole 3.2.1.

## 3.2 Komplexní řešení radarových dálkoměrů

Někteří uvedení výrobci poskytují ke svým součástkám vývojovou desku s potřebnými periferními obvody umožňujícími snadné připojení k PC a následné zpracování signálu prostřednictvím programového vybavení.

### 3.2.1 Novelda development kit NVA R620

Novelda NVA R620 je vývojový kit pracující s jednočipovým pulsním radarem NVA6000 ve frekvenčním pásmu 6 až 8,5 GHz. Součástí tohoto kitu jsou vysílací a přijímací antény s dielektrickými čočkami pro zvýšení směrovosti, IO modul pro komunikaci s PC prostřednictvím USB 2.0.



Obr. 3.6: Blokové schéma NVA R620.

Na obrázku 3.6 je základní blokové schéma kitu NVA R620. Srdcem celého zařízení je integrovaný transceiver Novelda NVA6000. Tento obvod zajišťuje vysílání signálu, příjem odražených signálů jejich zesílení a následné vzorkování. NVA6000 komunikuje s PC prostřednictvím mikrokontroleru Atmel AT91SAM7.

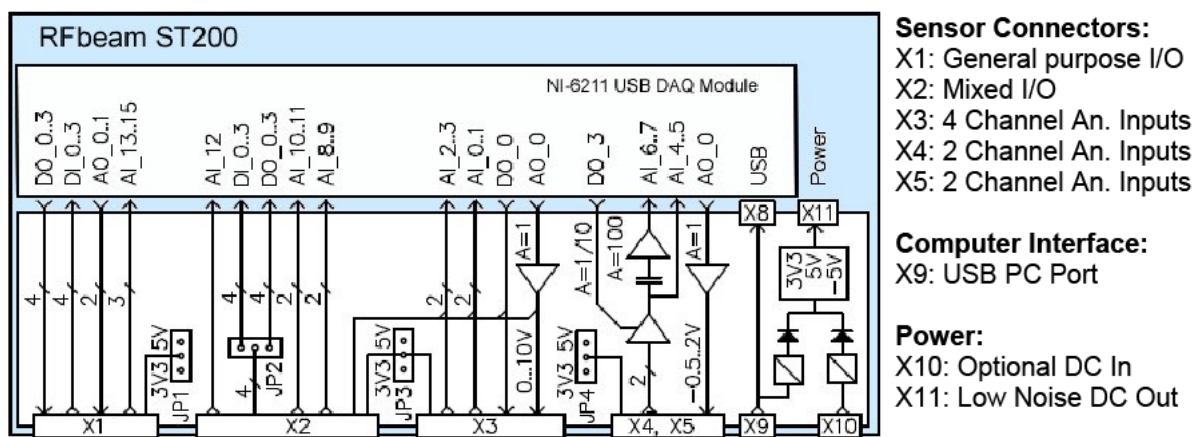
Novelda Impulse Radar ve skutečnosti pracuje jako 512 paralelních radarů snímajících signál odpovídající odrazu v určité vzdálenosti od antény. Pro získání dostatečného množství vzorků z dané vzdálenosti není vyslán pouze jediný puls, ale sekvence několika velmi krátkých pulsů, každý o délce cca 1 ns. Opakovací frekvence těchto pulsů je 48 MHz. Přijatá echa od jednotlivých pulsů jsou následně vzorkována pro každý puls s určitým časovým zpožděním oproti předchozímu puls. Následným poskládáním řady takto získaných vzorků z celé sekvence pulsů je dosaženo vzorkovací rychlosti ekvivalentní s více než 39 GS/s pro jediný puls.

Součástí vývojového kitu je také programová podpora obsahující grafické uživatelské rozhraní RadarScope, kompletní knihovny pro jazyk C, ukázkovou aplikaci pro Matlab a C# demo aplikaci. Na vyžádání jsou dostupné i zdrojové kódy firmwaru. [9]

Cena kompletního vývojového kitu NVA R620 s veškerou podporou je 5000 EUR.

### 3.2.2 RFbeam Microwave GmbH ST200 Evaluation Kit

ST200 Evaluation Kit je univerzální deska umožňující připojení většiny radarových modulů z nabídky společnosti RFbeam. Součástí celého zařízení jsou napájecí zdroje pro radarové moduly, zesilovače přijatého signálu pro moduly které nemají zesilovače vestavěné. Pro převedení signálu do číslicové podoby a připojení k PC prostřednictvím USB je použit 16 bitový DAQ modul NI-USB-6211 se vzorkovací frekvencí 250 kHz. Na obrázku 3.7 je uvedeno blokové schéma. [8]



Obr. 3.7: Blokové schéma ST200 |Převzato z [8]|

Řízení ST200 a následné vyhodnocování informací z přijatého signálu je prováděno pomocí PC programem Signal Explorer. Program Signal Explorer může pracovat ve třech režimech podle režimu činnosti radaru:

- **Dopplerovský režim** umožňuje získání informace o rychlosti pohybu sledovaného objektu. Při použití CW radaru je výstupem radarového senzoru mezifrekvenční



kmitočet, který vzniká při směšování vysílaného a přijímaného signálu. Tento kmitočet je závislý na rychlosti se kterou se pohybuje sledovaný objekt. Program Signal Explorer vyhodnocuje velikost tohoto kmitočtu a přepočítává ji na rychlost.

- **FMCW režim** slouží k vyhodnocování vzdálenosti a rychlosti sledovaného cíle. Tento režim umožňuje nastavení parametrů modulačního signálu v podobě pilového nebo trojúhelníkového průběhu. Umožňuje použití vhodného tvaru modulačního signálu pro dosažení lineární změny výstupní frekvence VCO. Vyhodnocování vzdálenosti a rychlosti cíle je prováděno FFT mezifrekvenčního kmitočtu.
- **FSK režim** pro řízení a vyhodnocování signálů při použití FSK radaru. V tomto režimu je možné vyhodnocovat rychlost pohybu sledovaného cíle a vzdálenost pohybujícího se cíle z fázového posunu odraženého signálu.

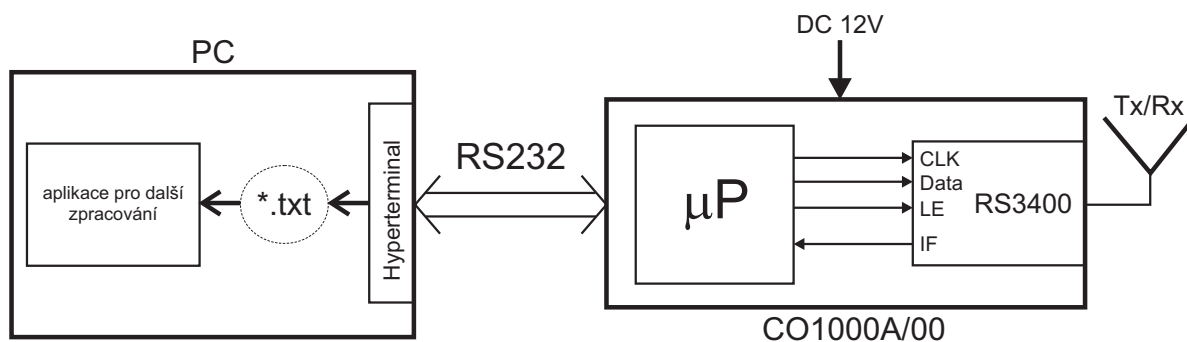
Celková cena ST200 Evaluation Kitu včetně programu Signal Explorer a modulů K-LC1a, K-LC2 a K-MC1 je 3950 EUR.

### 3.2.3 SiversIMA Controller Board CO1000A/00

Řídicí deska CO1000A/00 je zařízení zajišťující komunikaci mezi FMCW radarem RS3400 (popisovaným v kapitole 3.1.1) a PC. Deska obsahuje napájecí obvody pro RS3400, mikroprocesor zajišťující komunikaci s RS3400 prostřednictvím 3-vodičového sériového rozhraní (hodinový signál, datový signál a latch enable signál). Pro komunikaci mezi mikroprocesorem a PC je použito rozhraní RS232. Součástí desky je také AD převodník sloužící ke zpracování výstupního IF signálu.

Komunikace s řídicí deskou se provádí pomocí příkazů odesílaných kterýmkoliv programem obsluhujícím sériový port (např.: Hyperterminal nebo PuTTY).

Zpracování mezifrekvenčního signálu probíhá v několika krocích. V prvním kroku je mezifrekvenční signál převeden do číslicové podoby. Poté je odeslán po RS232 do PC a uložen jako textový soubor (\*.txt). Další zpracování takto získaných dat závisí na požadavcích a možnostech uživatele. Princip činnosti řídicí desky je znázorněn na obrázku 3.8. [4]



Obr. 3.8: Blokové schéma CO1000A/00

Cena samotné řídicí desky CO1000A/00 je 290 EUR.

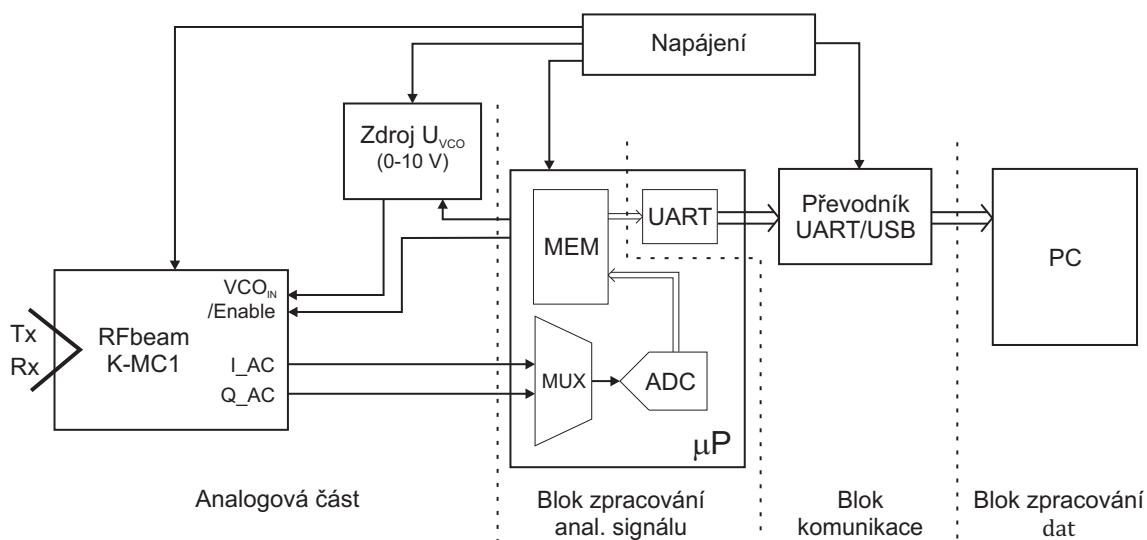
# 4

## Návrh radarového FMCW dálkoměru

Cílem této kapitoly je navrhnout možné obvodové řešení radarového FMCW dálkoměru pro účely testování různých metod zpracování dat získaných z tohoto zařízení. Základem navrženého dálkoměru je některá ze součástek uvedených v kapitole 3.1.

### 4.1 Princip funkce navrženého řešení

Navrhovaný radarový dálkoměr je možné rozdělit do několika hlavních bloků, které zajišťují jednotlivé funkce nezbytné pro měření. Tyto bloky jsou znázorněny na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Blokové schéma navrhovaného radarového dálkoměru

- **Analogová část** zajišťuje vysílání a příjem vhodně modulovaného RF signálu. Výstupem tohoto bloku je mezifrekvenční kmitočet s parametry vhodnými pro další

zpracování. Tato část je tvořena zvoleným radarovým obvodem některého z výše uvedených výrobců.

- **Blok řízení** analogové části. Úkolem tohoto bloku je dodávat analogové části vhodný modulační signál a další potřebné řídicí signály.
- **Blok zpracování analogového signálu** zajišťuje převedení výstupního signálu analogové části do číslicové podoby a jeho uložení do paměti. Hlavní částí tohoto bloku je vhodný mikroprocesor s potřebnými periferními obvody.
- **Blok komunikace** zajišťuje komunikaci mezi blokem zpracování analogového signálu a blokem zpracování dat realizuje přenos číslicového signálu z paměti předchozího bloku a jeho následné uložení ve formátu vhodném pro další zpracování.
- **Blok zpracování dat** realizuje potřebné matematické výpočty pro získání požadované informace z uložených dat. Tento blok je realizován pomocí vhodného výpočetního prostředí v PC.

## 4.2 Analogová část

Analogová část má velký podíl na výsledných parametrech radaru. Zároveň také klade určité nároky na následující bloky. Většina obvodů potřebných pro činnost analogové části je obsažena v radarových transceiverech.

Pro navrhovaný radarový dálkoměr jsem zvolil radarový transceiver K-MC1 společnosti RFbeam Microwave GmbH.

Zvolený obvod obsahuje všechny důležité analogové obvody. Přijímaný signál je zesílen nízkošumovým zesilovačem a nasměšován s vysílaným signálem. Mezifrekvenční kmitočet je rozdělen na složky I a Q. Obě složky jsou přivedeny přes S&H obvody do zesilovače se ziskem 15 dB a vyveden na výstupy I\_DC a Q\_DC. Frekvenčního rozsah těchto výstupů je 0 až 500 kHz. Výstupní signál S&H obvodů je také přes filtry přiváděn do zesilovače se ziskem 47 dB a vyveden na výstupy I\_AC a Q\_AC v kmitočtovém pásmu 40 Hz až 15 kHz.

Výhodou tohoto obvodu je, že jeho výstupy mají potřebný výkon pro to, aby mohly přímo řídit A/D převodníky. Požadované rozlišení A/D převodníků je 10 bitů pro AC výstupy a 12 bitů DC výstupy.

### 4.2.1 Řídicí signály pro obvod K-MC1

Obvod K-MC1 potřebuje pro svoji činnost dva řídicí signály:

- **Enable** tento signál slouží k přepínání obvodu do režimu spánku. Obvod je aktivní pokud je vstup */Enable* ve stavu „L“.

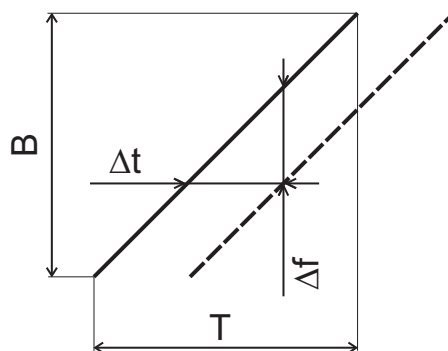
Tento signál musí dosahovat napětí  $V_{CC} - 0,7V$  až  $V_{CC} + 0,3V$  (tj. při pěti voltovém napájení  $+ 4,3V$  až  $+ 5,3V$ ) pro úroveň „H“ a  $- 0,2 V$  až  $2 V$  pro úroveň „L“. Protože výstupní signál z použitého mikroprocesoru dosahuje maximálního napětí  $3,6 V$ , je nutné upravit jej na příslušné napěťové úrovně. K tomuto účelu slouží blok změny úrovně na obrázku 4.3.

- **Modulační signál** slouží k řízení VCO. Rozsah řídicího napětí VCO je  $0$  až  $10 V$ . Tento signál je podrobněji popsán v následujícím textu.

Pro FMCW režim je zapotřebí na vstup modulačního signálu přivádět napětí  $U_{VCO}$  lineárně se měnící od  $0$  do  $10 V$ . Na strmosti této změny je závislé výsledné rozlišení radaru, jelikož pro mezifrekvenční kmitočet platí vztah 4.1.

$$\Delta f = \frac{B \cdot 2R}{T \cdot c} \quad [Hz] \quad (4.1)$$

- kde je:  $\Delta f$  mezifrekvenční kmitočet,  
 $B$  rozsah přeladitelnosti kmitočtu VCO,  
 $R$  vzdálenost cíle,  
 $T$  doba, za kterou se změní kmitočet VCO o  $B$  (viz. obr. 4.2),  
 $c$  rychlost světla ve vakuu.



**Obr. 4.2:** Rozložení veličin pro výpočet  $\Delta f$  a  $T$ .

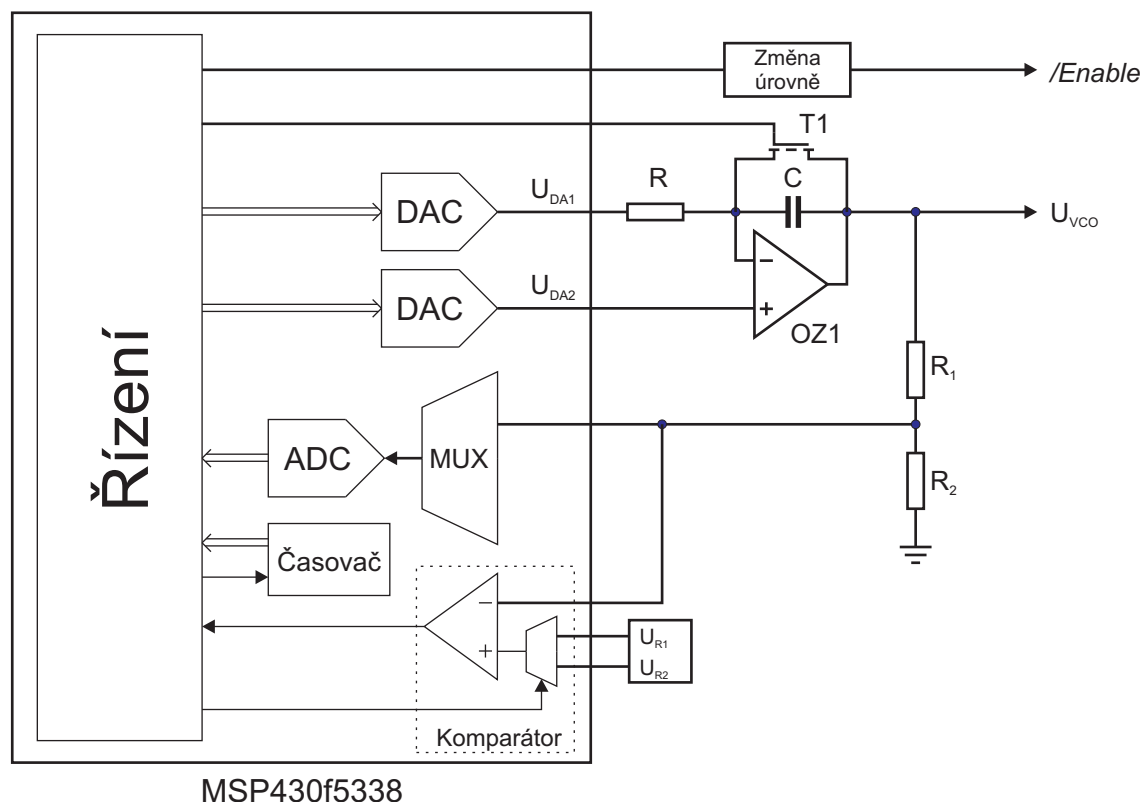
Při změně mezifrekvenčního kmitočtu o  $150 \text{ Hz/m}$  ( $\Delta f$  o velikosti  $150 \text{ Hz}$  odpovídá odrazu ze vzdálenosti  $R = 1 \text{ m}$ ) a maximálním uvažovaném dosahu radaru  $100 \text{ m}$  bude využita celá šířka pásma výstupů  $x_{AC}$ . Upravíme-li vztah 4.1 a dosadíme požadované hodnoty, dostaneme čas  $T$ , za který se musí změnit napětí  $U_{VCO}$  z  $0 V$  na  $10 V$  resp. z  $10 V$  na  $0 V$ :

$$T = \frac{B \cdot 2R}{\Delta f \cdot c} \quad [s] \quad (4.2)$$

Po dosažení požadovaných hodnot  $B = 180 \text{ MHz}$  (rozsah kmitočtové přeladitelnosti VCO),  $R = 1 \text{ m}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  a  $\Delta f = 150 \text{ Hz}$ :

$$T = \frac{180 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 1}{150 \cdot 3 \cdot 10^8} = 8 \cdot 10^{-3} s \quad (4.3)$$

Na obrázku 4.3 je blokově znázorněn princip funkce zdroje řídicích signálů.



Obr. 4.3: Blokové schéma zdroje řídicích signálů

Hlavním prvkem zdroje modulačního signálu jsou periferní obvody mikroprocesoru MSP430f5338 a integrátor tvořený operačním zesilovačem OZ1 (AD8027 s nesymetrickým napájením), rezistorem R a kondenzátorem C, který integruje rozdíl napětí mezi D/A převodníky. Pro výstupní napětí integrátoru platí vztah 4.4.

$$U_{VCO} = -\frac{1}{RC} \int (U_{DA1} - U_{DA2}) dt + U_{DA2} + U_C(0) \quad [V] \quad (4.4)$$

Protože napětí na obou D/A převodnicích je konstantní, můžeme vztah pro  $U_{VCO}$  zjednodušit.

$$U_{VCO} = -\frac{U_{DA1} - U_{DA2}}{RC} t + U_{DA2} + U_C(0) \quad [V] \quad (4.5)$$

Podle rovnice 4.5 se bude výstupní napětí měnit lineárně se strmostí danou hodnotami R, C a rozdílem napětí mezi výstupy D/A převodníků.

Změnou napětí mezi D/A převodníky lze měnit strmost změny napětí  $U_{VCO}$ . Budeme-li uvažovat použití D/A převodníku v 12-bitovém režimu, při časové konstantě integrátoru  $RC = 30\mu s$  a referenčním napětí D/A převodníků 2,5 V (interní zdroj referenčního napětí) bude doba změny  $U_{VCO}$  v plném rozsahu přeladitelná od  $T \doteq 120\mu s$  do  $T \doteq 490ms$ . Požadovaná hodnota  $T = 8ms$  odpovídá rozdílu napětí  $U_{DA1} - U_{DA2} \doteq 38mV$ .

Výstupní napětí integrátoru je porovnáváno komparátorem s referenčním napětím  $U_{R1}$  resp.  $U_{R2}$ . V okamžiku, kdy výstupní napětí dosáhne maximálního resp. minimálního požadovaného napětí, komparátor změní svoji výstupní úroveň (vyvolá přerušeni). Na změnu výstupní úrovně komparátoru zareaguje řídicí jednotka tím, že nastaví výstupní napětí obou D/A převodníků na stejnou hodnotu. Následně je přepnut vstup komparátoru na  $U_{R2}$  resp.  $U_{R1}$ . Poté je mezi převodníky vytvořeno napětí opačné polarity než v předchozím stavu a probíhá integrace tohoto napětí opačným směrem. Tranzistor T1 umožňuje v případě potřeby okamžité vybití kondenzátoru C.

Pokud je na začátku integrace spuštěn časovač a při přerušeni vyvolaném komparátorem jeho hodnota zachycena v capture registru je možné stanovit skutečný čas T potřebný pro změnu  $U_{VCO}$  v plném rozsahu. Tento čas může být následně využit pro korekci rozdílu napětí D/A převodníků nebo zpřesnění následného přepočtu mezifrekvenčního kmitočtu na vzdálenost.

Řídicí napětí  $U_{VCO}$  je možné vzorkovat prostřednictvím A/D převodníku do paměti a následně získaný průběh použít pro kontrolu a případné úpravy řídicího napětí. Pokud je vzorkováno řídicí napětí není však možné zároveň vzorkovat jiné signály protože mikroprocesor MSP430f5338 obsahuje pouze jeden A/D převodník s možností výběru vstupů.

## 4.3 Zpracování signálu z analogové části

Cílem této části dálkoměru je signál získaný z obvodu RFbeam K-MC1 přizpůsobit pro další číslicové zpracování a takto upravený signál následně uložit do paměti.

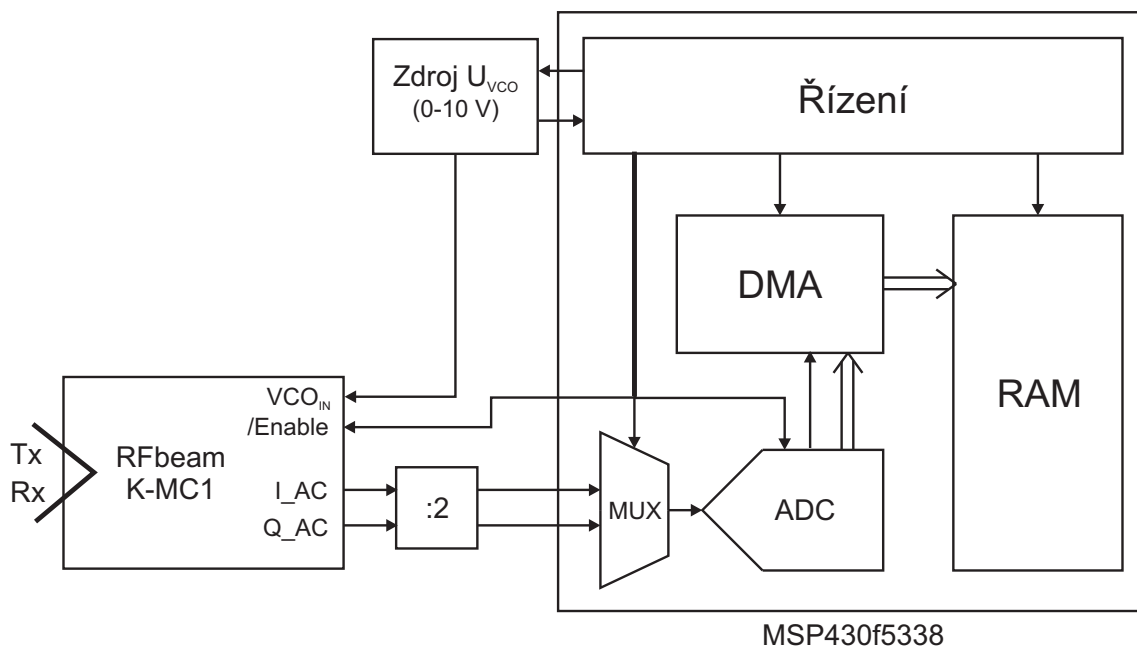
Při dalších úvahách budeme uvažovat pro zpracování analogového signálu použití 16-bitového mikroprocesoru MSP430f5338.

### 4.3.1 Princip funkce zpracování analogového signálu

Hlavní fází zpracování analogového signálu je převedení příslušných úseků mezifrekvenčního signálu do číslicové podoby a následné uložení vzorků do paměti.

Pro vzorkování mezifrekvenčního kmitočtu je výhodné použít režim A/D převodníku, ve kterém je po zahájení převodu opakovaně vzorkován zvolený vstupní kanál bez nutnosti dalšího spouštění.

Spuštění převodu je realizováno programovým nastavením příslušného bitu poté co je zahájeno generování daného úseku modulačního signálu. Po každém ukončeném převodu vzorku je vyvoláno A/D převodníkem přerušeni, na které zareaguje řadič DMA. DMA řadič pracuje v režimu přenosu dat z pevně dané adresy (adresy výstupního registru A/D převodníku) do bloku adres v RAM paměti. Celý převod je poté zastaven nastavením příslušného řídicího bitu A/D převodníku při přerušeni, které vyvolal komparátor ve zdroji řídicích signálů, poté co modulační signál dosáhl požadovaného napětí. Na obrázku 4.4 je blokově znázorněno zpracování analogového signálu.



Obr. 4.4: Blokové schéma zpracování analogového signálu

Protože použitý převodník je schopný zpracovávat maximální napětí 2,5 V, ale napětí na výstupu obvodu K-MC1 dosahuje až 5 V, je nutné toto napětí snížit na polovinu.

### 4.3.2 Požadavky na obvody provádějící zpracování analogového signálu

Výstupem obvodu K-MC1 je mezifrekvenční signál na výstupech x\_DC a x\_AC. Pro další zpracování bude použit signál z některého výstupu x\_AC. Tento výstup se pohybuje v kmitočtové oblasti od 40 Hz do 15 kHz. Maximální napětí tohoto výstupu může dosahovat 5 V.

Mikroprocesor MSP430f5338 je vybaven 12-bitovým A/D převodníkem se vzorkovací rychlostí až 200 kS/s a rozlišením 12 bitů. Proto tento procesor plní požadavky kladené na zařízení, pomocí kterého je zpracováván analogový signál. Další výhodou tohoto procesoru je možnost přenosu dat z A/D převodníku prostřednictvím DMA. Díky tomu nebude CPU vytíženo obsluhou A/D převodu.

Pokud budeme uvažovat převod signálu o délce  $T = 8ms$  vzorkovací rychlostí  $f_S = 200kS/s$  převodníkem s 12-bitovým rozlišením, bude pro převedené vzorky v paměti zapotřebí blok o velikosti:

$$T \cdot f_S \cdot 2 = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2 = 3,2kB \quad (4.6)$$

Pro výpočet vzdálenosti a dopplerova posunu je zapotřebí navzorkovat minimálně dva tyto bloky signálu (pro fázi, ve které je výstupní kmitočet snižován, a pro fázi, ve které je zvyšován). Pro tyto signály bude proto potřeba minimálně 6,4 kB paměti.

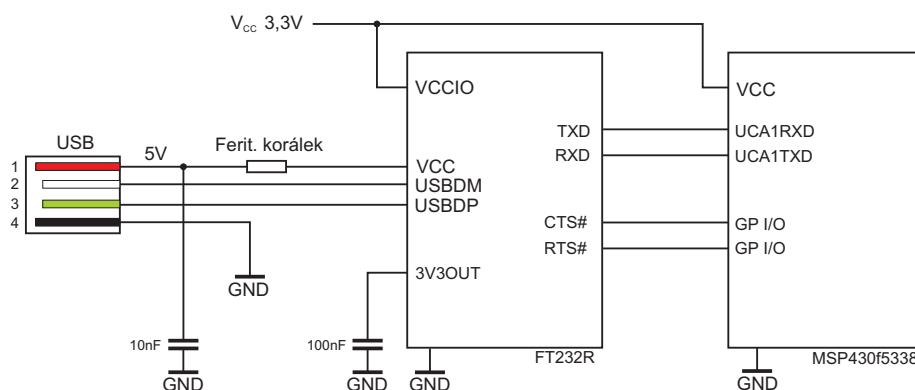
## 4.4 Komunikace s PC

Blok komunikace s PC zajišťuje přenos řídicích dat z PC do dálkoměru a následně přenos naměřených dat z dálkoměru do PC k dalšímu zpracování.

Pro činnost dálkoměru je zapotřebí přenášet mezi PC a dálkoměrem následující informace:

- **Parametry měření** - nastavení požadovaných parametrů měření (např.: rychlosti přeběhu modulačního signálu  $U_{VCO}$  mezi krajními hodnotami, nastavení počtu měření).
- **Naměřená data** - přenos vzorků mezifrekvenčního kmitočtu a naměřené rychlosti přeběhu  $U_{VCO}$  z paměti dálkoměru do PC.
- **Informace o stavu dálkoměru**

Komunikace mezi dálkoměrem a PC bude zajištěna pomocí UART. Pro možnost připojení dálkoměru k PC pomocí USB rozhraní bude výstupní UART signál z mikroprocesoru převeden obvodem FTDI FT232R na signál USB. V PC bude probíhat komunikace s dálkoměrem prostřednictvím virtuálního sériového portu. Na obrázku 4.5 je blokové schéma zapojení obvodů zajišťujících komunikaci s PC.



Obr. 4.5: Blokové schéma komunikace s PC

## 4.5 Napájení

Blok napájení zajišťuje potřebná napájecí napětí pro všechny obvody tvořící dálkoměr. V dálkoměru je zapotřebí několika různých napájecích napětí pro různé obvody. V tabulce 4.1 je přehled jednotlivých obvodů a příslušných napájecích napětí.

Mikroprocesor MSP430f5338 potřebuje pro svoji činnost oddělené napájecí napětí číselové části  $V_{CC}$  a analogových periferních obvodů  $AV_{CC}$ .

Pro napájení obvodu FT232R napětím 5 V je použito napájecí napětí z USB.



obvod	napájecí napětí
RFbeam K-MC1	5 V
MSP430f5338 $DV_{CC}$	3,3 V
$AV_{CC}$	3,3 V
FT232R $V_{CC}$	5 V
$V_{CCIO}$	3,3V
AD8027 (OZ1 na obr. 4.3)	10 V
zdroj $U_{R1}, U_{R2}$	3,3V
změna úrovně signálu $/Enable$	5 V

Tab. 4.1: Napájecí napětí jednotlivých obvodů

## 4.6 Průběh měření a zpracování dat

Způsobem řízení jednotlivých obvodů je dán průběh měření. Navržený radarový dálkoměr nabízí řadu možných postupů měření vzdálenosti a případně i rychlosti. V následující části je navržen jeden z možných postupů měření vzdálenosti.

Po zapnutí dálkoměru jsou nastaveny všechny obvody a řídicí signály do výchozího stavu. Budeme uvažovat následující výchozí stav:

- VCO je zablokovan signálem  $/Enable$ .
- Na výstupu obou D/A převodníků je nastaveno nejmenší možné napětí a tranzistor T1 je v otevřeném stavu, tím je C vybit. Tímto stavem je zajištěno nejmenší možné napětí  $U_{VCO}$ .
- Na vstup komparátoru je přivedeno referenční napětí  $U_{R1}$  pro integraci nahoru.
- Časovač je vynulován.
- Vstupní multiplexer A/D převodníku je nastaven na převod signálu z výstupu I.AC.

Následně může být nastavena požadovaná strmost řídicího napětí  $U_{VCO}$ . Z požadované strmosti  $U_{VCO}$  je poté vypočten rozdíl napětí  $U_{DA1} - U_{DA2}$ .

Po zahájení měření je zavřen tranzistor T1, signálem  $/Enable$  je aktivován VCO, na výstupech D/A převodníků je nastaven příslušný rozdíl napětí pro požadovanou strmost tak aby  $U_{DA1} - U_{DA2} < 0$  ( $U_{VCO}$  se zvětšuje), je spuštěn časovač a aktivován A/D převod.

V okamžiku, kdy napětí  $U_{VCO}$  dosáhne komparační meze dané napětím  $U_{R1}$  dojde k překlopení komparátoru. Na překlopení komparátoru zareaguje řídicí jednotka zastavením časovače a A/D převodu, nastavením řídicích napětí  $U_{DA1}$  a  $U_{DA2}$  tak aby  $U_{DA1} - U_{DA2} = 0$  a zablokováním VCO ( $/Enable$  ve stavu H). Následně je přečtena a uložena hodnota časovače. Tím je ukončena první fáze měření.

Následně je na vstup komparátoru přivedeno napětí  $U_{R2}$  místo  $U_{R1}$  a je vynulován časovač. Druhá fáze měření probíhá podle stejného scénáře jako první fáze, jen s tím

rozdílem, že řídicí napětí  $U_{DA1}$  a  $U_{DA2}$  jsou nastavena tak aby  $U_{DA1} - U_{DA2} > 0$  ( $U_{VCO}$  klesá).

Po skončení druhé fáze je měření ukončeno. Naměřená data z obou fází měření jsou uložena v paměti dálkoměru. Z paměti dálkoměru jsou následně naměřená data přenesena do PC.

Další zpracování dat je již úkolem výpočetního prostředí v PC pomocí kterého je z naměřených dat získána informace o vzdálenosti a případně rychlosti měřeného objektu.

Jedna z možností jak dále zpracovat naměřená data je použití diskretní Fourierovy transformace pro stanovení kmitočtového spektra mezifrekvenčního signálu. Pokud je v dosahu dálkoměru pouze jediný objekt objeví se v kmitočtovém spektru signálu siskáného v první fázi měření špička odpovídající kmitočtu  $\Delta f_1$ . Pro tento kmitočet platí vztah 2.18. Stejným způsobem je možné stanovit kmitočet  $\Delta f_2$ , pro který platí rovněž vztah 2.18.

Následnou aplikací vztahů 2.19 a 2.17 je možné z takto získaných kmitočtů stanovit vzdálenost zachyceného cíle.

Pokud požadujeme také získání informace o rychlosti zachyceného objektu, získáme použitím vztahu 4.7 kmitočet odpovídající velikosti Dopplerova posuvu.

$$f_D = \frac{1}{2}(\Delta f_1 - \Delta f_2) \quad [Hz] \quad (4.7)$$

Pokud známe velikost Dopplerova posuvu můžeme snadno stanovit rychlost cíle použitím rovnice 4.8:

$$v_r = \frac{f_D \cdot \lambda}{2} \quad [ms^{-1}]. \quad (4.8)$$

Výhodou navrženého postupu měření je to, že jsou získávány mezifrekvenční signály pro rostoucí výstupní kmitočet vysílače a pro klesající výstupní kmitočet vysílače vždy v samostatné fázi měření. Díky tomu se neprojeví problémy vznikající v okamžicích, kdy vysílaný kmitočet již klesá, ale přijímaný vlivem zpoždění ještě roste a naopak. Nevýhodou však může být příliš malá délka naměřených mezifrekvenčních signálů. Při stanovování malých vzdáleností pak může působit problémy nepříznivý poměr délky trvání změřeného úseku a periody mezifrekvenčního kmitočtu.

## 5

# Závěr

Měření vzdálenosti pomocí radaru je možné provádět dvěma hlavními způsoby. Metoda měření pulsním radarem klade značné nároky na většinu bloků celého systému zejména na rychlost zpracování přijatého signálu. Tato metoda však přináší výhodu možnosti vyzáření většího špičkového výkonu a tím zvýšení dosahu. Druhá metoda využívající kontinuálního frekvenčně modulovaného radaru neklade tak vysoké požadavky na systém provádějící zpracování výstupních signálů.

Na trhu je k dispozici řada obvodů obsahujících koncové stupně radarů (radarové transceivery) jak pro pulsní tak pro kontinuální radarová měření. Většina výrobců těchto součástek nabízí pro své výrobky testovací a vývojové moduly s potřebným programovým vybavením umožňujícím testování a vývoj metod zpracování výstupních signálů z transceiverů. Ceny transceiverů se pohybují od desítek do tisíců EUR podle parametrů obvodu, složitosti obvodu a metod použitých pro tvorbu a zpracování signálů. Ceny testovacích modulů se pohybují v řádu několika tisíc EUR.

Navržený radarový dálkoměr pracuje na principu frekvenčně modulovaného kontinuálního radaru. Jako základ je použit 24 GHz transceiver firmy RFbeam Microwave GmbH K-MC1 s maximálním teoretickým dosahem 150 m. Zařízení umožňuje nastavení parametrů signálu řídicího frekvenční modulaci, provádí uložení navzorkovaného výstupního signálu do paměti a jeho následné předání do osobního počítače k číslicovému zpracování. Z důvodu dočasné nedostupnosti zvoleného transceiveru v době vzniku této práce nemohla být otestována vhodnost zvolených řešení.

V případě realizace zařízení by bylo nutné otestovat skutečnou funkci zdroje řídicích signálů pro obvod K-MC1. Další zajímavé poznatky by přineslo testování použitelnosti dat získaných z dálkoměru pro další zpracování vzhledem k nastaveným parametrům měření.

Pro postup měření, který je nastíněn v kapitole 4.6 by bylo nutné otestovat jeho vhodnost pro měření kratších vzdáleností. Minimální vzdálenost změřitelná tímto postupem je zjevně závislá na poměru periody mezifrekvenčního signálu a délky navzorkovaného úseku. Při použití parametrů uvedených kapitole 4.2.1 je délka vzorkovaného úseku cca 8 ms a perioda mezifrekvenčního signálu 10 ms na jeden metr měřené vzdálenosti. Tato skutečnost bude hrát důležitou roli přiměření vzdáleností v řádu jednotek metrů.

# Literatura

- [1] SKOLNIK, Merrill. *Radar Handbook, Third Edition* USA: The McGraw-Hill Companies, 2008. ISBN 978-0-07-148547-0.
- [2] SKOLNIK, Merrill. *Introduction to Radar Systems* USA: The McGraw-Hill Companies, 1981. ISBN 0-07-057909-1.
- [3] TOOMAY, John C. a HANNEN, Paul J. *Radar Principles For The Non-Specialist, Third Edition* SciTech Publishing Inc., 2004. ISBN 1-891121-28-6.
- [4] *Complete FMCW Radar Application Note*. Firemní literatura firmy Sivers IMA, Sivers IMA AB 2011.
- [5] *Datasheet K-LC1a*. Firemní literatura firmy RFbeam Microwave GmbH, RFbeam Microwave GmbH 2010.
- [6] *Datasheet K-LC2*. Firemní literatura firmy RFbeam Microwave GmbH, RFbeam Microwave GmbH 2011.
- [7] *Datasheet K-MC1*. Firemní literatura firmy RFbeam Microwave GmbH, RFbeam Microwave GmbH 2011.
- [8] *User Manual RFbeam ST200*. Firemní literatura firmy RFbeam Microwave GmbH, RFbeam Microwave GmbH 2012.
- [9] *Novelda White Paper Nanoscale Impulse Radar*. Firemní literatura firmy Novelda AS, Novelda AS 2011.
- [10] *MSP430x5xx/MSP430x6xx Family User's Guide*. Firemní literatura firmy Texas Instruments, Texas Instruments ©2008-2011, revised 2011.
- [11] *MSP430F533x*. Firemní literatura firmy Texas Instruments, Texas Instruments ©2010-2011, revised 2011.
- [12] *FT232R USB UART IC Datasheet Version 2.10*. Firemní literatura firmy FTDI Chip, Future Technology Devices International Limited ©2010.

- [13] WOLFF, Christian. *Radartutorial* [online]. ©2011 [cit. 7.10.2011].  
Dostupné z [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu)
- [14] PARKER, Michael. *Radar Basic - part 1-5* [online]. 5/17/2011 - 7/18/2011  
[cit. 20.10.2011]. Dostupné z <http://www.eetimes.com/design/programmable-logic/4216104>