

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Simulace vysílání radiolokátoru pomocí softwarově
definovaného rádia

Jan Pejřil

Bakalářská práce
2021

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan Pejřil**
Osobní číslo: **I18220**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Téma práce: **Simulace vysílání radiolokátoru pomocí softwarově definovaného rádia**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Student se seznámí s druhy vysílaných pulzních signálů v radiolokační technice a s pomocí veřejně dostupných pramenů uvede parametry vysílaných pulzů vybraných radarových systémů. Dále se seznámí s obsluhou a limity použití softwarově definovaného rádia (SDR) Adalm-Pluto SDR v prostředí MATLAB. Dle zjištěných omezení použitého SDR rozhodne o rozsahu simulovatelných parametrů (modulace, časování pulzu, vysílací kmitočet, řízení vysílacího kmitočtu). Následně vytvoří simulátor vysílání radiolokátoru v prostředí MATLAB, který umožní nastavení parametrů simulovaného radiolokátoru, sestavení vysílaného signálu a vysílání pomocí SDR. Minimální výčet nastavitelných parametrů je: délka pulzu, perioda vysílání pulzu a druh modulace. Dále s pomocí druhého SDR zaznamená vysílání navrhnutého simulátoru (ideálně i reálného radiolokátoru) a provede analýzu signálu (porovnání signálu na příjmu s nastavenými parametry vysílání simulátoru).

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

P. Bezoušek and P. Šedivý, *Radarová technika*. Vydavatelství ČVUT, 2004.

K. Daněk, *Moderní rádiový přijímač: kniha o jeho návrhu*. BEN – technická literatura, 2005.

M. A. Richards, *Fundamentals of radar signal processing*. New York; London: McGraw-Hill, 2005.

M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill, 2001.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vojtěch Valenta

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2021**

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Jan Pidanič
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. ledna 2021

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 14. 5. 2021

Jan Pejřil

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Vojtěchu Valentovi za cenné rady, připomínky a konzultace během vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu, kterou mi poskytují po celou dobu mého studia a pomoc při měření. Na závěr bych také rád poděkoval Fakultě Elektrotechniky a Informatiky Pardubice za vypůjčení vybavení.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá procesem tvorby reálných pulzů radiolokátorů a následnou simulací vysílání prostřednictvím softwarově definovaného rádia Adalm-Pluto SDR. Teoretická část je věnována problematice pulzních radarů a kompresi pulzu. V praktické části je popsán použitý hardware včetně vývoje simulačního programu v prostředí MATLAB, určeného pro modelování pulzních signálů následované simulací vysílání radiolokátorů. Na závěr práce jsou uvedena ukázková měření konkrétních radarových systémů, se zhodnocením jednotlivých měření.

Klíčová slova

pulzní signály, Adalm-Pluto SDR, modulace, Matlab, radary

Title

Simulation of radar transmission using software defined radio

Annotation

The bachelor thesis deals with the process of creating real radar pulses and simulation of transmission via software-defined radio Adalm-Pluto SDR. The theoretical part is devoted to the issue of pulse radars and pulse compression. The practical part describes the used hardware, including the development of a simulation program in the MATLAB environment. The simulation program is designed for modeling pulse signals followed by simulation of radar transmission. At the end of the work, sample measurements of specific radar systems are shown, with the evaluation of individual measurements.

Keywords

Pulse signals, Adalm-Pluto SDR, modulation, Matlab, radars

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Teoretická část	12
1.1 Radar.....	12
1.2 Frekvenční pásma používaná v radiolokaci	13
1.3 Pulzní radar.....	14
1.4 Časování radarů	15
1.5 Rozlišovací schopnost radaru	16
1.6 Primární zpracování radarového signálu	17
1.7 I/Q data	17
1.8 Komprese pulzu a vnitropulzní modulace	18
1.8.1 Korelační funkce.....	19
1.8.2 Obdélníkový pulz bez vnitropulzní modulace.....	20
1.8.3 Lineární frekvenční modulace	21
1.8.4 Nelineární frekvenční modulace.....	24
1.8.5 Fázová modulace a Barkerovy kódy	25
1.9 Střídání délky opakovací periody - Stagger	27
1.10 Interval koherentního zpracování CPI.....	27
1.11 Krátké a dlouhé pulzy.....	28
1.12 Přeladování radaru	28
1.13 Softwarově definované rádio.....	29
2 Popis použitého hardwaru	30
2.1 Popis softwarově definovaného rádia Adalm-Pluto SDR	30
2.2 Koaxiální kabel.....	30
2.3 Anténa JCG401	30
2.4 UWB Anténa	31
2.5 Výpočetní jednotka.....	32
2.5.1 Stolní počítač	32
2.5.2 Notebook	32
3 Vývoj simulačního programu v prostředí MATLAB	33

3.1	Popis simulačního programu	33
3.2	Získ parametrů pulzních radarů	33
3.3	Konfigurace simulačního programu	34
3.4	Generování pulzu.....	34
3.5	Modulace	34
3.6	Popis procesu přeladování frekvence a burstu signálu	35
3.7	Vysílání a příjem signálu zařízením Adalm-Pluto	35
3.8	Zobrazovací část simulačního programu.....	35
4	Simulace radiolokátorů.....	36
4.1	Volba parametrů a popis zapojení měřicí soustavy	36
4.2	Popis simulace na měřicím pracovišti	36
4.3	P-18ML.....	37
4.4	RL-61.....	41
4.5	RL-2000	44
4.5.1	Měření reálného radaru RL-2000	46
4.6	Chain Home.....	47
4.7	Sova	50
	Závěr	54
	Literatura	55
	Přílohy	58

Seznam zkratek

A/D	Analog to Digital
AESA	Active Electronically Scanned Array
BPSK	Binary - Phase Shift Keying
CPI	Coherent Processing Interval
CW	Countinuous wave
D/A	Digital to Analog
DPS	Digital Signal Processing
FM-CW	Frequency Modulated – Countinuous Wave
I/Q	In phase / Quadrature phase
NLFM	Nelineární Frekvenční Modulace
PCR	Pulse Compression Ratio
PESA	Passive Electronically Scanned Array
PRF	Pulse Repetition Frequency
RF	Radio Frequency
SDR	Softwarově definované rádio
SMA	SubMiniature version A
USB	Universal Seriál Bus
UWB	Ultra – WideBand

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Základní typy radarů, a) primární b) sekundární [1]	12
Obrázek 2 - Blokové schéma pulzního radaru [11]	14
Obrázek 3 - Časová činnost pulzního primárního radaru [1]	15
Obrázek 4 - Minimální vzdálenost cílů v dosahu [13]	16
Obrázek 5 - Grafické znázornění I/Q vzorku	17
Obrázek 6 - Vzájemná korelační funkce vyslaného a přijatého signálu.....	19
Obrázek 7 - Časový průběh obdélníkového signálu	20
Obrázek 8 - Autokorelační funkce obdélníkového signálu	20
Obrázek 9 - Časový průběh pulzu s modulací LFM s postupně narůstající frekvencí.....	21
Obrázek 10 - Průběh frekvence přes šířku pulzu s modulací LFM	22
Obrázek 11 - Korelační funkce LFM	22
Obrázek 12 - Spektrum LFM	23
Obrázek 13 - Konstelační diagram LFM	23
Obrázek 14 - Průběh frekvence přes šířku pulzu s modulací NLFM	24
Obrázek 15 - Fázový průběh signálu modulovaný BPSK s 13-bitovým kódem Barker.....	26
Obrázek 16 - Konstelační diagram modulace BPSK s využitím Barkerových kódů	26
Obrázek 17 - Autokorelační funkce 5-bitového kódu Barker	27
Obrázek 18 – Časový průběh vysílání skupiny pulzů	28
Obrázek 19 - Blokové schéma softwarově definovaného rádia [23].....	29
Obrázek 20 - Softwarově definované rádio Adalm-Pluto	30
Obrázek 21 - Anténa JCG401	31
Obrázek 22 - Ultra-wide Directional UWB Antenna	32
Obrázek 23 - Blokové schéma simulačního programu.....	33
Obrázek 24 - Textový soubor obsahující parametry pulzních radarů	34
Obrázek 25 - fotografie měřicího pracoviště na volném prostranství	37
Obrázek 26 - Průběhy I/Q dat 1. pulzu (LFM) radaru P-18ML, vlevo simulovaný a vpravo naměřený	38
Obrázek 27 - Obálka 1. naměřeného pulzu (LFM) radaru P-18ML.....	38
Obrázek 28 - Průběhy I/Q dat 2. pulzu (Barker) radaru P-18ML, vlevo simulovaný a vpravo naměřený	39
Obrázek 29 - Obálka 2. naměřeného pulzu (Barker) radaru P-18ML	39
Obrázek 30 - Konstelační diagramy naměřeného signálu radaru P-18ML, vlevo LFM a vpravo Barker	40
Obrázek 31 – Konstelační diagram obou naměřených pulzů radaru P-18ML v limitaci....	40
Obrázek 32 - Průběhy I/Q dat 1. pulzu (bez modulace) RL-61, vlevo simulovaný a vpravo naměřený	41
Obrázek 33 - Obálka 1. naměřeného pulzu (bez modulace) radaru RL-61	42
Obrázek 34 - Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) radaru RL-61, vlevo simulovaný a vpravo naměřený	42
Obrázek 35 - Obálka 2. naměřeného pulzu (LFM) radaru RL-61	43
Obrázek 36 - Spektrum 2. naměřeného pulzu (LFM) radaru RL-61	43

Obrázek 37 - Průběh I/Q 2. pulzu (NLFM) radaru RL-2000 , nalevo ideální, vpravo odvysílaný.....	44
Obrázek 38 - Průběh frekvence přes druhý pulz (NLFM) radaru RL-2000.....	45
Obrázek 39 - Konstelační diagram signálu RL-2000	45
Obrázek 40 – Sekvence vysílaných pulzů reálného radaru RL-2000.....	46
Obrázek 41 – Zaznamenaný výskyt krátkého a dlouhého pulzu reálného radaru RL-2000	47
Obrázek 42 – Průběhy I/Q dat 1. pulzu (bez modulace) Chain Home, vlevo simulovaný a vpravo naměřený	48
Obrázek 43 – Průběhy I/Q dat 1. pulzu (bez modulace) s přeladěním frekvence o 1 MHz	49
Obrázek 44 – Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) Chain Home, vlevo simulovaný a vpravo naměřený	49
Obrázek 45 – Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) s přeladěním frekvence o 1 MHz.....	49
Obrázek 46 – Spektrum naměřeného signálu radaru Chain Home	50
Obrázek 47 – Vlevo průběh absolutní hodnoty a vpravo průběh I/Q dat obdélníkového pulzu	51
Obrázek 48 – Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) radaru SOVA s F_c 3 GHz, vlevo simulovaný a vpravo naměřený.....	52
Obrázek 49 – Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) radaru SOVA s F_c 6 GHz, vlevo simulovaný a vpravo naměřený.....	52
Obrázek 50 – Tlumená obálka 2. naměřeného pulzu (LFM) radaru SOVA	53
Obrázek 51 – Ukázka časových průběhů simulované reálné složky a absolutní hodnoty naměřeného signálu v burstech	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přehled kmitočtových pásem podle IEEE [7].....	13
Tabulka 2 - Používané Barkerovy kódy [11].....	25
Tabulka 3 - Důležité parametry antény JCG401 [25].....	31
Tabulka 4 - Důležité parametry UWB antény [26]	31
Tabulka 5 - Parametry radaru P-18ML [28].....	37
Tabulka 6 - parametry radaru RL 61 [5].....	41
Tabulka 7 - parametry radaru RL – 2000 [2].....	44
Tabulka 8 - Parametry radaru Chain Home [31]	48
Tabulka 9 - parametry radaru Sova [5].....	51

Úvod

Bakalářská práce se zabývá simulací vysílání pulzních radiolokátorů pomocí softwarově definovaného rádia v prostředí MATLAB. Veškeré parametry simulovaných radiolokátorů vycházejí z veřejně dostupných zdrojů, uvádějících parametry skutečných radarových systémů. Tyto parametry jsou následně použity pro sestavení pulzních radiolokačních signálů a simulací vysílání radarového systému s ohledem na jejich simulovatelnost použitý hardware.

V teoretické části je nejprve popsán úvod do radarové techniky a používaných frekvenčních pásem společně s příklady využití pro konkrétní systémy. Následuje popis pulzních radarů včetně jejich funkce a časové činnosti. Poté je rozebrána problematika primárního zpracování radarových signálů, popis I/Q dat a komprese pulzu související s korelační funkcí a vnitropulzními modulacemi. V neposlední řadě je popsáno střídání délky opakovací periody, interval koherentního zpracování, krátké a dlouhé pulzy a přeladování radiolokátorů společně s popisem softwarově definovaného rádia.

V praktické části je popsán použitý hardware pro simulaci vysílání a vývoj simulačního programu v prostředí MATLAB R2020b, který je určen k modelování pulzních signálů a následné vysílání s využitím softwarově definovaného rádia Adalm-Pluto. Navržený simulační program umožňuje práci s parametry šířka pulzu, frekvence vysílání pulzu (PRF), vnitropulzní modulace (lineární a nelineární frekvenční modulace, BPSK modulace s využitím Barkerových kódů) včetně možnosti vytvoření pulzu bez jejího použití, vysílání pulzů v burstech a přeladování nosné frekvence. Ze záznamů lze porovnat vymodelovaný a vysílaný pulzní signál. Na závěr práce je popsáno uskutečněné měření simulace vysílání pulzních radarů s inspirovanými parametry reálných radiolokátorů a zhodnocení všech uskutečněných měření. Použité parametry musely být pro simulaci upraveny nebo doplněny s ohledem na používaný hardware a dostupné informace ohledně reálných radiolokátorů.

1 Teoretická část

1.1 Radar

Slovo Radar vzniklo zkrácením anglického výrazu „Radio Detection And Ranging“ neboli „Rádiové odhalování (předmětů) a určování (jejich) vzdálenosti“. To vyjadřuje podstatu funkce většiny radarů i jejich hlavní využití. První uplatnění našly radary v armádě při ostraze vzdušného prostoru proti nepřátelským letadlům. Dnes zastávají vojenské radary řadu funkcí v letectví, v raketové technice, v lodní navigaci, ochraně vzdušeného prostoru i jinde [1]. V civilní oblasti našly radary nejširší uplatnění v navigaci a to zejména v navigaci letecké [2]. Další využití nacházejí civilní radary v oblasti automobilů, kde jsou důležitým prvkem pro adaptivní tempomaty [3]. Příkladem meteorologického radaru je zařízení Vaisala WRM200 používaný Českým hydrometeorologickým ústavem [4].

Radary pro sledování vzdušné situace a řízení letového provozu lze rozlišovat dle principu funkce na primární, sekundární (viz. Obrázek 1), kombinované a pasivní. Primární radar vysílá signál a z odrazu vyhodnocuje vzdálenost cíle a z Dopplerova posuvu kmitočtu rychlost cíle. Sekundární radary vyhodnocuje data na základě odpovědi od jiného zařízení, které je schopno spolupracovat. Kombinované radary využívají kombinace více systémů do jednoho funkčního celku používané z důvodu využitelného potenciálu univerzálních procesorů při zpracování signálu. [1]



Obrázek 1 - Základní typy radarů, a) primární b) sekundární [1]

Vývojem a výrobou primárních a kombinovaných radiolokátorů pro civilní účely se v České republice zabývají firmy ELDIS s.r.o., T-CZ a.s. V oblasti produkce radiolokátorů, určených pro obranný průmysl, pak působí firma RETIA a.s. [5]

Další způsob členění radarů je dle režimu činnosti vysílání a to na radar s kontinuální vlnou (CW) a pulzní radar. Radar s kontinuální vlnou potřebuje ke své činnosti jednu vysílací a druhou přijímací anténu, jelikož ve stejném čase vysílá a zároveň přijímá signál. [1]

Výše popsané radary patří do skupiny aktivních radarů, nicméně vedle nich existují pasivní radary. Takový systém je schopen detekovat objekty, které generují vlastní rádiový signál. Jedním z takových nejznámějších českých systémů je pasivní radiolokátor VERA-NG, který slouží k detekci, lokalizaci, identifikaci a sledování vzdušných, pozemních a námořních cílů. Výrobce radiolokátoru je Pardubická společnost ERA a.s.. [6]

1.2 Frekvenční pásma používaná v radiolokaci

Elektromagnetické spektrum se rozděluje do několika pásem (viz. Tabulka 1) s různými fyzikálními vlastnostmi, které jsou využívány radary pro vysílání na konkrétním kmitočtu. Existuje spousta způsobů rozdělení kmitočtů, které jsou zaváděny jednotlivými instituty.

Tabulka 1 - Přehled kmitočtových pásem podle IEEE [7]

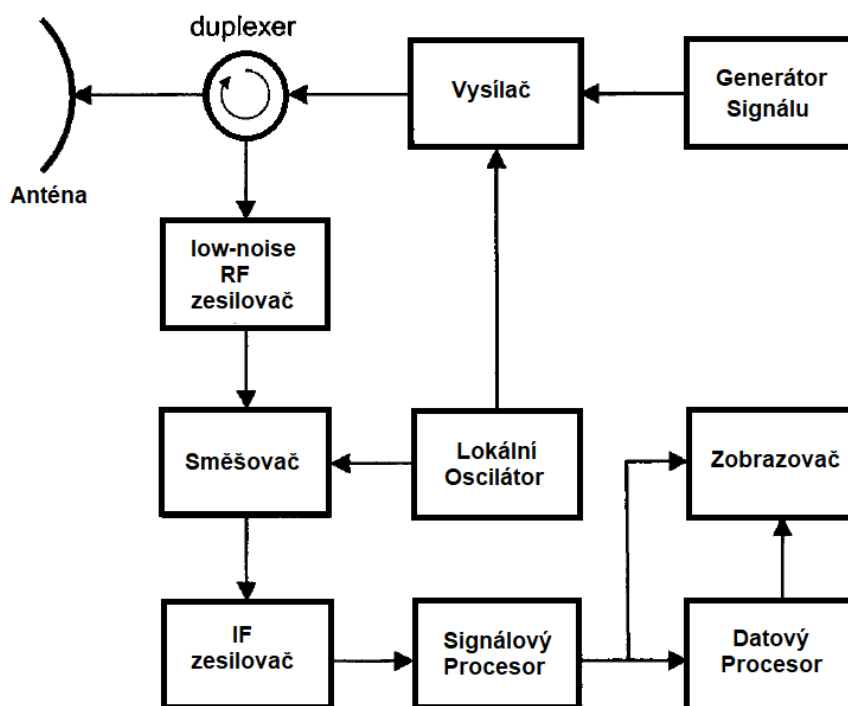
Označení pásma	Kmitočtové pásmo v GHz
HF	0.003-0.03
VHF	0.03-0.3
UHF	0.3-1
L	1-2
S	2-4
C	4-8
X	8-12
Ku	12-18
K	18-27
Ka	27-40
V	40-75
W	75-110
mm / G	110-300

Radarová pásma HF a VHF jsou jedny z historicky prvně používaných radarových pásem během 2. světové války. Radary vysílající v těchto pásmech se vyznačovaly svou velkou konstrukcí, velkým vysílaným dosahem a menší přesností. Radary v pásmu UHF se vyznačují velkým dosahem z důvodu menšího tlumení povětrnostními podmínkami. Typické využití na těchto frekvencích naleznou vojenské radary včasné výstrahy a UWB radary, které nachází velké využití v detekci živých bytostí za zdmi a nekovovými překážkami. Příkladem takového radaru je zařízení ReTWis 5 vyráběné společností RETIA, a.s., které pracuje v kmitočtovém rozsahu 1,9 až 3,7 GHz z důvodu příznivého útlumu zdiva a přijatelně malých rozměrů antén vhodné pro přenosnost zařízení [8]. Moderní radary dálkového vzdušného dohledu a traťové radary pro řízení letového provozu využívají pásmo L. Ve frekvenčním pásmu S se uplatňuje mnohem vyšší útlum než v předchozích pásmech a je zapotřebí vysílat s vyšším výkonem k dosažení velkých vzdáleností. Na těchto frekvencích pracují různé meteorologické radary. Pásmo X patří mezi velmi důležitá pásma, jelikož poměr vlnové délky a velikosti antény je příznivý vzhledem k dostačující úhlové přesnosti. Běžně se takové frekvenční pásmo uplatňuje v civilní a vojenské činnosti pro námořní navigační systémy a ve vesmírných a vzdušných aplikacích pro geografické mapování. S rostoucím frekvencí vysílání radarů se zvyšuje samotný útlum, nicméně některé vlastnosti se mohou zlepšovat a využívat se ve svůj prospěch. [9]

1.3 Pulzní radar

Pulzní radary vysílají krátké, ale silné pulzy a v čekací době, kdy je vysílač vypnutý, přijímají odražené impulzy. Využívají často jednu anténu, která slouží jak pro vysílání, tak pro příjem signálu. Šířka pulzu se ve většině případů pohybuje v řádech mikrosekund, kdežto čekací doba je mnohonásobně delší [10]. Celková perioda vysílání signálu má přímý vliv na maximální přístrojový dosah radaru a jednoznačnost určení délky detekce cíle. Tyto radary vysílají elektromagnetickou vlnu, která se šíří rychlostí světla od antény radaru do okolního prostoru, odráží se od okolních předmětů a radar odraženou energii přijímá a vyhodnocuje. Ze zpoždění mezi přijatým a vysílaným signálem se určuje vzdálenost odrazného předmětu [1]. Po vyslání pulzu začne radar přijímat odražené pulzy, které musí detekovat v čekací době. Pokud systém zaznamená odražený pulz v další periodě vysílání, nemůže poté jednoznačně určit, zda se odrazil 1. či 2. pulz a radar nedokáže jednoznačně změřit vzdálenost cíle. Mezi běžná použití pulzních radarů patří sledování letového, námořního a pozemního provozu a monitorování počasí [10].

Monostatické radary využívají pouze jednu anténu, která přepíná mezi vysílacím a přijímacím režimem. Provoz a funkci pulzního radaru si lze rozložit do jednotlivých bloků, které tvoří celý systém. Obrázek 2 představuje blokové schéma monostatického pulzního radaru.

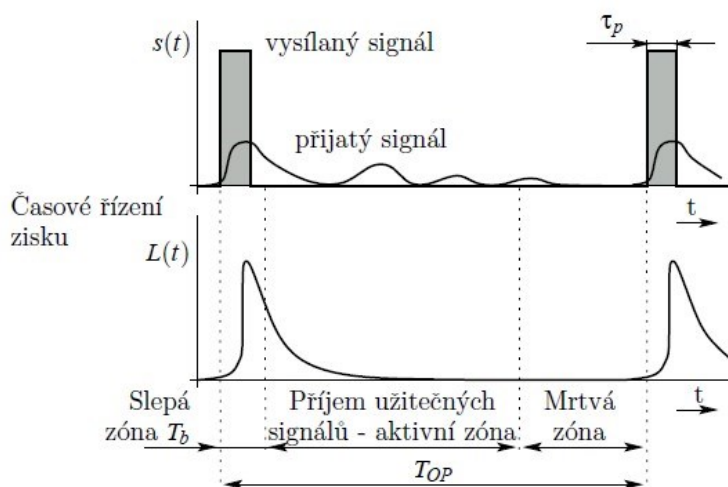


Obrázek 2 - Blokové schéma pulzního radaru [11]

Generátor signálu vytváří požadovanou pulzní vlnu. Vysílač dále moduluje vlnu na určitou frekvenci a zesiluje ji na užitečnou úroveň výkonu. Výstup vysílače je směřován do antény přes duplexer, který přepíná mezi stavy pro vysílání a příjem signálů. Odražené vlny jsou opět směřovány přes duplexer do radarového přijímače a často je prvním stupněm nízkošumový RF zesilovač. Poté následuje jeden nebo více stupňů kmitočtové konverze přijímaného signálu na postupně nižší mezifrekvence. Každá kmitočtová konverze se provádí pomocí směšovače a lokálního oscilátoru. Po digitalizaci pomocí A/D převodníku je signál v základním pásmu odeslán do signálového procesoru, který provádí požadované zpracování signálu. Například kompresi pulzu, dopplerovské filtrování, integrace a kompenzace pohybu. Výstup signálového procesoru má různé formy v závislosti na účel radaru. Sledovací radar by vysílal proud detekcí s rozsahem měřiče a úhlovými souřadnicemi. Výstup procesoru se podle potřeby odesílá na displej systému, datový procesor nebo na oba zároveň. Radary mohou používat odlišné antény pro vysílání a přijímání signálů nebo pouze jednu, která pracuje střídavě v režimu vysílání a přijímání. Konstrukce takové antény musí být uzpůsobena potřebám konkrétního systému. Prohledávání prostoru probíhá mechanicky tak, že anténa je namířena do jednoho směru, do kterého soustředí svou energii a postupně se otáčí s ohledem na pokrytí prostoru. Vedle mechanického vychylování svazku existuje elektronické vychylování se statickými anténami. PESA radary pracují se signálem na jedné frekvenci, který je rozdělen do více antén za účelem zvýšení dosahu. AESA radary mohou naopak operovat se signály s více frekvencemi, přičemž každá anténa má svůj vlastní modul pro vysílání a příjem. [11], [12]

1.4 Časování radarů

Radary lze dělit podle způsobu časování činnosti a to na systémy s pulzním a kontinuálním (CW) signálem. Oba systémy pracují v periodických cyklech, ve kterých se opakuje stejná posloupnost činností. Impulzní radary (viz. Obrázek 3) vysílají časově krátké pulzy a ve zbytku času přijímají odrazy od předmětů. Používají se tedy pro dosah větší než 1 km a pro kratší dosahy se aplikují naopak radary ve spojitém režimu.



Obrázek 3 - Časová činnost pulzního primárního radaru [1]

Princip časové činnosti pulzního radaru je na Obrázku 3. Předměty, které se vyskytují ve slepé zóně (rovnice 1.1), která má vzdálenost R_b , nedokáže radar detekovat. Během vysílání pulzu nemůže přijímač v době T_b přijímat a zpracovávat odrazy, které přijdou v tomto časovém intervalu. [1]

$$R_b = T_b \frac{c}{2} \quad (1.1)$$

Po odvyhlání a skončení doby T_b radar přijímá užitečné odražené signály. Poté následuje úsek, ve kterém může ještě přijímat odrazy od velkých objektů, ale pro radar nejsou podstatné. Aby se vyloučili, je zapotřebí vyčkat s vysíláním dalšího pulzu. [1]

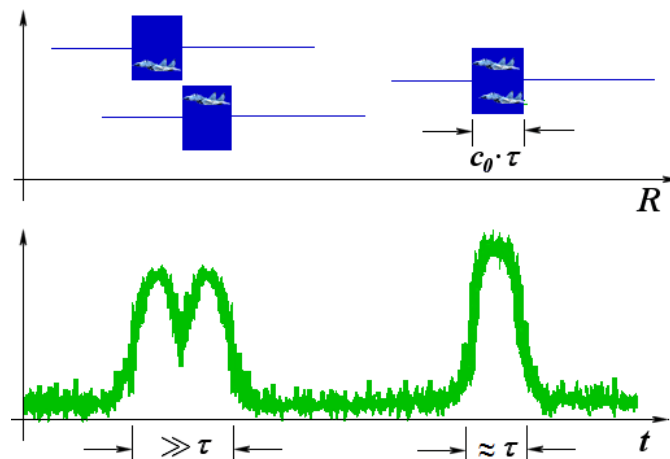
$$T_{OP} > \frac{2R_{max}}{c} \quad (1.2)$$

$$f_{OP} = \frac{1}{T_{OP}} \quad (1.3)$$

Tato časová prodleva mezi vysláním dalšího pulzu a maximálním rozsahem se nazývá mrtvá zóna, která může být využita k dalším činnostem. Perioda vysílání pulzu T_{op} (rovnice 1.2) musí být větší než dvojnásobek maximální dosahu radaru R_{max} , který je vydělen konstantou rychlosti světla c . Frekvence vysílání pulzu (rovnice 1.3) f_{op} též označována PRF je vypočítána převrácenou hodnotou T_{op} . V kontrastu s CW radary mají pulzní radary mnohem jednodušší získ informace o vzdálenosti objektu, který odpovídá polovině časové prodlevy od času vyslání pulzu po jeho návrat. [1]

1.5 Rozlišovací schopnost radaru

Cílem rozlišovací schopnosti radaru je jeho schopnost rozlišovat mezi cíli, které jsou velmi blízko sebe v dosahu (viz. Obrázek 4) nebo směru. Rozlišovací schopnost radarů se liší podle účelu jednotlivých radarů. Příkladem jsou civilní přistávací radary, které vyžadují velkou přesnost rozlišovací schopnosti, kdežto radary pro daleké dosahy mají přesnost výrazně menší. [11]



Obrázek 4 - Minimální vzdálenost cílů v dosahu [13]

Rozlišení závisí na šířce vysílaného pulzu, typu a velikosti cíle a efektivitě použitého přijímače. Nominální rozlišovací schopnost radaru ΔR lze vypočítat vzorcem 1.4, kde hlavním faktorem je šířka pásma modulovaného pulzu β . Modulované pulzy mají oproti pulzům bez modulace mnohem širší spektrum, z čehož plyne lepší schopnost rozlišení cíle v dálce. [11], [13]

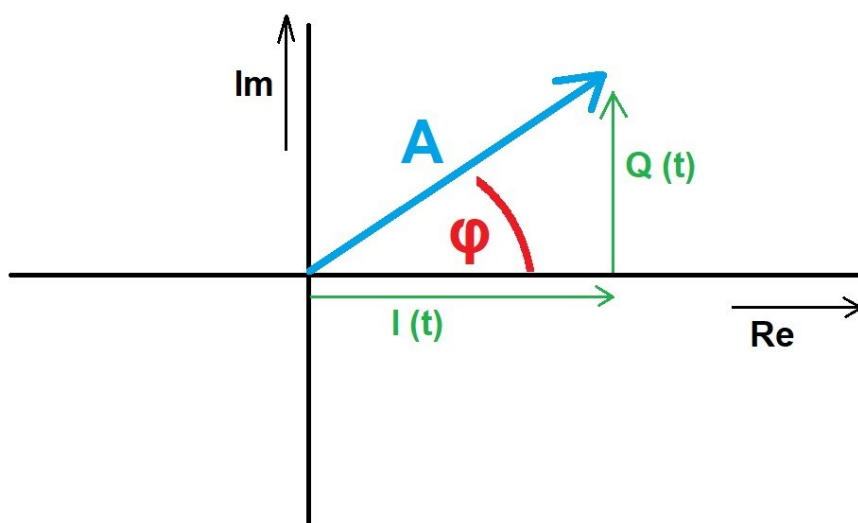
$$\Delta R = \frac{c}{2\beta} \quad (1.4)$$

1.6 Primární zpracování radarového signálu

Zpracování přijatého signálu, v rámci jednoho přeběhu paprsku antény přes cíl, je označováno jako primární zpracování. Systém pracuje s komplexními obálkami, které se získají buď analogovým obvodem, nebo přímým vzorkováním mezifrekvenčního signálu a jeho následnou digitální filtrací a decimací. Korelací pak dochází ke kompresi pulzu. Druhou operací bývá Dopplerovské zpracování, pomocí kterého je možné odfiltrout odrazy od terénu, mraků a detekovat pohyblivé cíle s pomocí banky pásmových propustí. Hlavním cílem zpracování radarových signálů je minimalizovat rušivé signály a správná detekce objektu. [1], [14]

1.7 I/Q data

Nejvhodnější volbou pro vyjádření signálu je použití takzvaných I/Q dat, kde I znamená „In-Phase“ a Q značí „Quadrature Phase“. Využívá se kvůli schopnosti určit aktuální hodnotu amplitudy a fázi signálu. Systém využívající této metody dokáže modulovat signál pomocí všech typů modulací, které jsou definovány vzorky reálné a imaginární části signálu.



Obrázek 5 - Grafické znázornění I/Q vzorku

I/Q data lze vyjádřit v několika různých formách, které mají své výhody a nevýhody.

Kartézská forma

Jedná se o tvar, kde se dají I/Q data reprezentovat pomocí pozice v souřadnicovém systému (viz. Obrázek 5) a je nejběžnější z důvodu snadné modulace a demodulace. V komplexní rovině je lze vyjádřit jako součet reálné složky (I) a imaginární složky (Q). Další používanou formou, která se například používá v programovacím jazyce Matlab, je vektorový zápis [I,Q].

Polární forma

$$I = A \cdot \cos(\varphi) \quad (1.5)$$

$$Q = A \cdot \sin(\varphi) \quad (1.6)$$

Kde A - je maximální amplituda funkcí cosinus a sinus

φ - je fázový úhel, znázorňující pozici v úseku jedné periody (od 0° do 360°)

Ze vzorců 1.7 a 1.8 lze vypočítat velikost amplitudy a fázi signálu

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (1.7)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (1.8)$$

Eulerova forma

$$A \cdot \cos(\varphi) + i \cdot A \cdot \sin(\varphi) = A \cdot e^{i\varphi} \quad (1.9)$$

Eulerova forma (rovnice 1.9) pracuje s amplitudou a fází vzorku. [15], [16], [17]

1.8 Komprese pulzu a vnitropulzní modulace

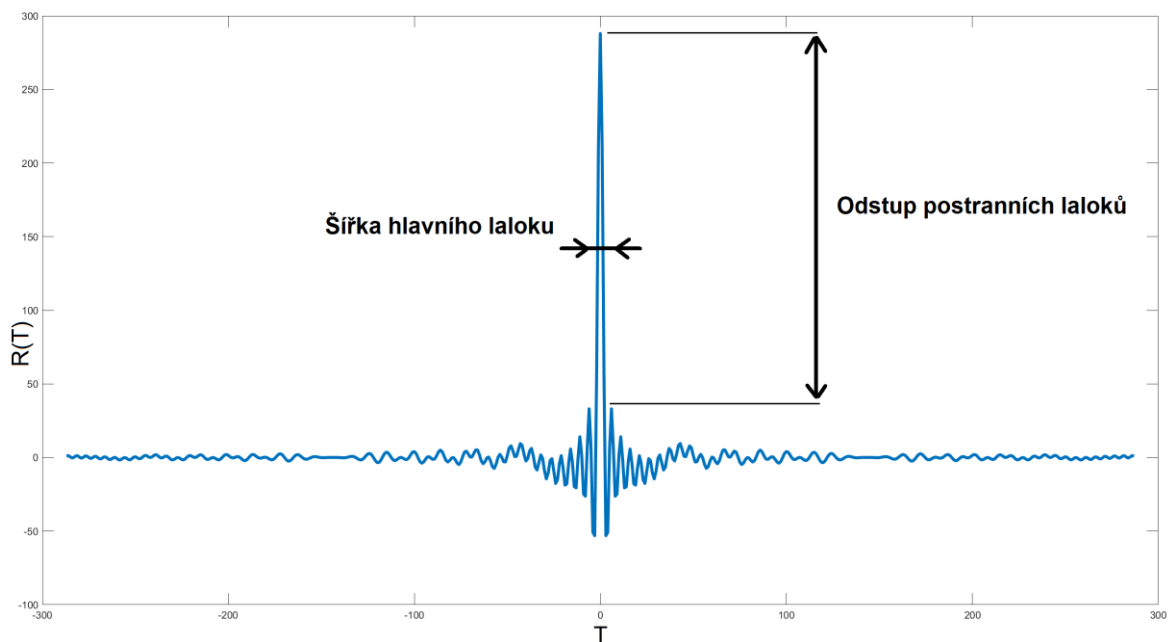
Zvýšení citlivosti a maximální vzdálenost detekce cíle je dosaženo, pokud se na cíl dostane velké množství energie, což vyžaduje velký pulzní výkon vysílače. Použitím vhodné vnitropulzní modulace dochází ke zlepšení rozlišovací schopnosti velmi dlouhých pulzů a nižšímu požadovanému výkonu vysílače. Důvodem je mnohonásobně lepší detekce, jelikož s pomocí pulzní komprese lze detekovat odražené signály, které již zmizely v šumu před samotnou kompresí a je velmi malá pravděpodobnost podobnosti šumu a signálu s vnitropulzní modulací. Pulzní kompresní poměr PCR (nebo též pulzní kompresní faktor K) je poměr časové délky nekomprimovaného vysílaného pulzu T vzhledem k délce komprimovaného pulzu τ_C a využívá se při výpočet v radarových rovnicích. Pulzní kompresní faktor lze vypočítat vzorcem 1.10, kde B je šířka pásma vysílaného pulzu.

$$K = T \cdot B = \frac{T}{\tau_c} \quad (1.10)$$

Modulované pulzy mají mnohem širší pásma než pulzy bez modulace a tím se zlepšuje přesnost měření vzdálenosti objektu. Proces komprese pulzu spočívá v průchodu modulovaného pulzu přizpůsobeným filtrem, který je převeden na korelační funkci s kratším hlavním lalokem. Mezi nevýhody patří zhoršení minimálního dosahu radaru, nárůst časových postranních laloků, nepřesnosti filtru způsobené Dopplerovými frekvencemi a složitější realizace. [1], [18]

1.8.1 Korelační funkce

Při zpracování radarového signálu se korelací (viz. Obrázek 6) rozumí srovnání mezi neznámým signálem a známým referenčním signálem neboli jejich stupeň shody jako funkce časového posunu.

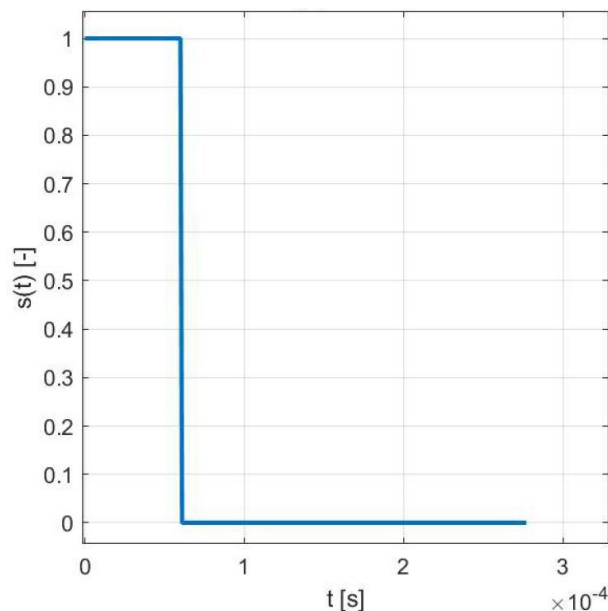


Obrázek 6 - Vzájemná korelační funkce vyslaného a přijatého signálu

Maximum korelační funkce je hodnota celkového zpoždění přijatého signálu oproti vyslanému a při měření odrazejícího předmětu je nutno měřit polohu maxima signálu. Každá korelační funkce má absolutní extrém – hlavní maximum a různý počet postranních maxim, které mohou být způsobeny chybnou detekcí cíle v nesprávném okamžiku nebo pokud je v blízkosti cíle další slabší cíl. Během rozlišování dvou cílů dostaneme po demodulaci a průchodu přizpůsobeným filtrem odezvu ve tvaru vzájemné korelaci mezi přijatým a vyslaným signálem. Odezvy jsou od sebe posunuty o určitý čas, a pokud od sebe budou odražené signály vzdáleny o více, než efektivní šířku korelační funkce dokážeme je jednoznačně detekovat jako dva cíle. [1], [19]

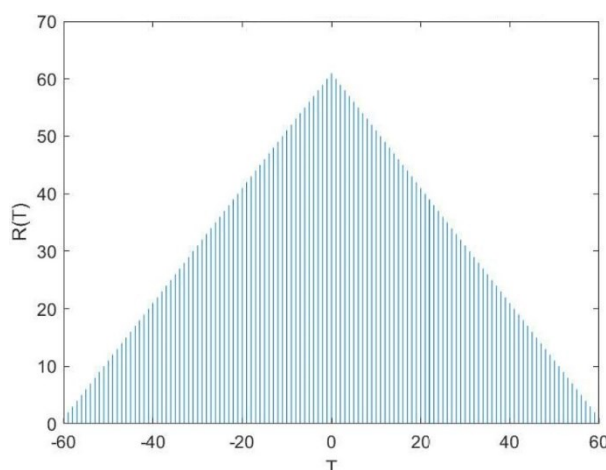
1.8.2 Obdélníkový pulz bez vnitropulzní modulace

Mezi nejjednodušší používané pulzní signály patří obdélník bez využití vnitropulzní modulace. Rozlišovací schopnost je dána šířkou pulzu. Nevýhodou je potřebně velký špičkový výkon a ztráty kvůli Dopplerovu posunu. [14]



Obrázek 7 - Časový průběh obdélníkového signálu

Obdélníkový pulz bez využití modulace (viz. Obrázek 7) se převážně používá pro užší pulzy oproti ostatním vysílaným pulzům, jelikož slouží k měření na nižší vzdálenosti a není vyžadována velká energie pulzu. Širší pulzy se naopak využívají pro detekci na mnohem delší vzdálenost a je tedy vhodné použít odlišnou modulaci, pomocí které lze docílit vyšší energie. [14]



Obrázek 8 - Autokorelační funkce obdélníkového signálu

Autokorelační funkce (viz. Obrázek 8) má tvar trojúhelníku a šířka odpovídá dvojnásobné šířce pulzu. Kvůli zlepšení rozlišovací schopnosti jsou vhodnější pulzy s užším hlavním lalokem korelační funkce.

1.8.3 Lineární frekvenční modulace

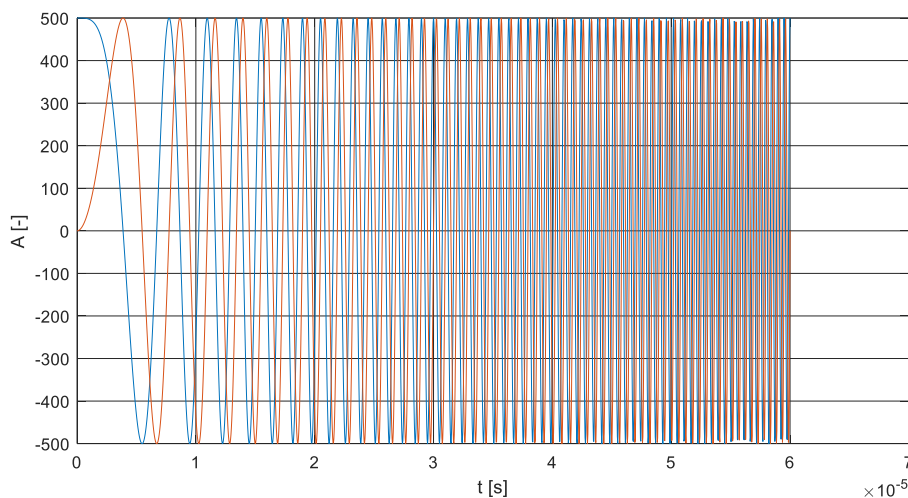
Frekvenčně modulované signály mají lineární průběh okamžité frekvence, kterému odpovídá kvadratický průběh fáze. Amplituda pulzu je obvykle konstantní a celková změna frekvence se nazývá frekvenční zdvih. Existuje více variant rozložení frekvence v modulovaném pulzu. Průběh okamžité frekvence se dá vypočítat ze vzorce 1.11, kde Δf je frekvenční zdvih a τ_p šířka pulzu. [11]

$$f(t) = -\frac{\Delta f}{2} + \Delta f \cdot \frac{t}{\tau_p} \quad (1.11)$$

V praxi se lineární frekvenční modulace aplikuje na širší pulzy, jelikož takový pulz má vyšší energii oproti nemodulovaným pulzům a dokáže mnohem snadněji detekovat cíle na delší vzdálenost (viz. Kapitola 1.8).

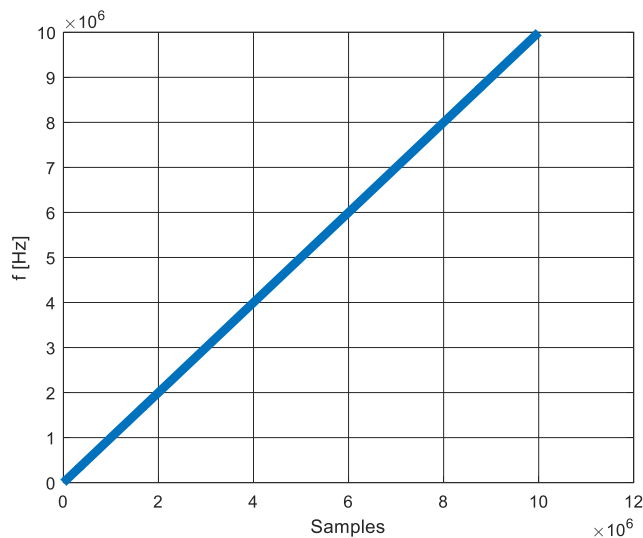
$$s(t) = A \cdot e^{(2\pi \cdot f(t) \cdot t + \varphi(t))} \quad (1.12)$$

Průběh signálu v čase lze vypočítat vzorcem 1.12, kde A je amplituda signálu a $\varphi(t)$ je fáze signálu v závislosti na čase.



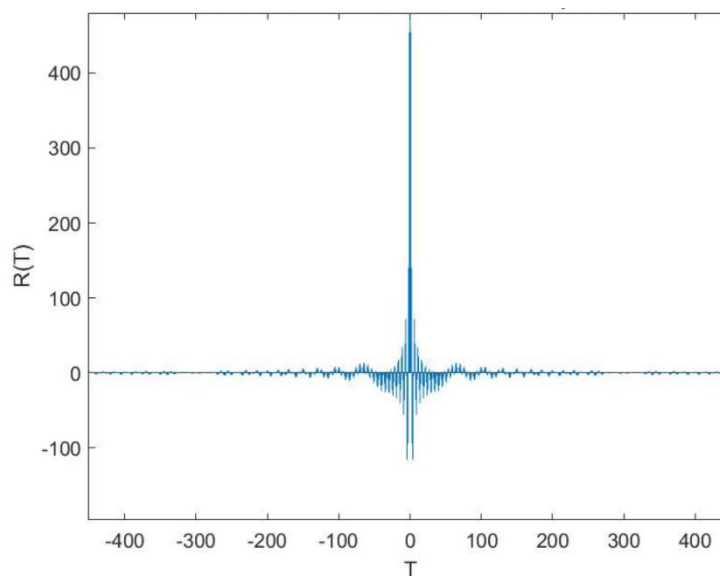
Obrázek 9 - Časový průběh pulzu s modulací LFM s postupně narůstající frekvencí

Způsob lineárního rozkladu frekvence se provádí jednou ze čtyř základních metod. Metoda s postupně narůstající frekvencí (viz. Obrázek 9) rozkládá frekvenci lineárně od nejnižší po nejvyšší konečnou frekvenci v celé šířce pulzu. Metoda s postupně klesající frekvencí naopak využívá opačného postupu, kdy jsou frekvence aplikovány od nejvyšší po tu nejnižší. Obrázek 10 znázorňuje nárůst frekvence modulovaný přes pulz. Průběh takové frekvence by měl mít vždy tvar přímky (viz. Obrázek 10).



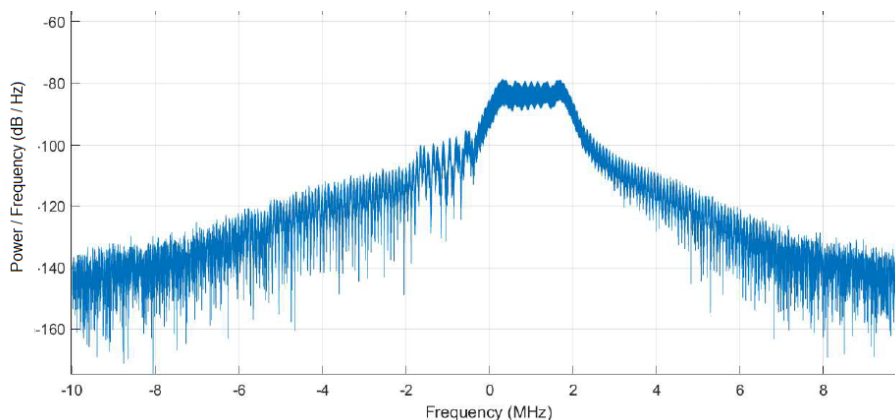
Obrázek 10 - Průběh frekvence přes šířku pulzu s modulací LFM

Šířka hlavního laloku autokorelační funkce (viz. Obrázek 11) má přibližnou velikost $1/\Delta f$. Odstup prvního postranního laloku je -13,5 dB, za kterým následují další postupně klesající postranní laloky. [1]



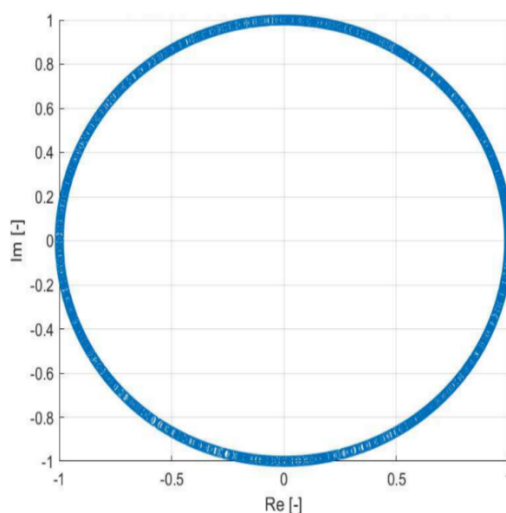
Obrázek 11 - Korelační funkce LFM

Poslední dvě metody se od předchozích liší tím, že uprostřed pulzu figuruje buď nejnižší, nebo naopak nejvyšší frekvence a jejich využitím pro FM-CW radary. Jedna z metod má průběh frekvence takový, že na začátku pulzu se vyskytují nízké frekvence a postupně narůstají do půlky šířky pulzu, od které následovně frekvence klesají opět do nízkých hodnot. Další využívaná metoda je přesným opakem předchozí metody, jelikož na začátku pulzu jsou nejvyšší frekvence, které postupně klesají až do bodu, kde je pulz v polovině a následně opět rostou do nejvyšších hodnot až do konce trvání pulzu.



Obrázek 12 - Spektrum LFM

Frekvenční spektrum (viz. Obrázek 12) lineárně frekvenční modulace bývá téměř obdélníkové s šířkou o velikosti frekvenčního zdvihu. Zvlnění temene spektra klesá s rostoucí hodnotou součinu frekvenčního zdvihu a šířky vysílaného pulzu.



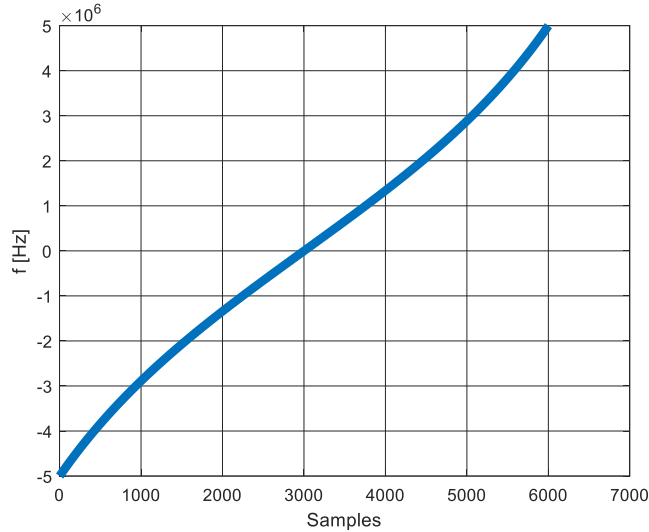
Obrázek 13 - Konstelační diagram LFM

Jednotlivé body v ideálním konstelačním diagramu lineární frekvenční modulace (viz. Obrázek 13) kopírují tvar kružnice. V praxi lze konstelační diagram signálu použít pro kontrolu, zda nebyl přijatý signál ovlivněn různými druhy rušení, jako je například bílý Gaussovský šum, rušení způsobené jiným zařízením nebo útlum. Při procesu zpracování radarových signálu je vhodné analyzovat konstelační diagramy jednotlivých pulzů.

Jednou z dalších variant je lineární frekvenční modulace s amplitudovým váhováním. Funkcí takové modulace je zredukování postranních časových laloků na přijatelnou hodnotu po průchodu signálu vhodným filtrem. Nevýhodou je ovšem menší odstup signál-šum a ztráty v rozsahu 1,5 až 2,5 dB z důvodu nepřizpůsobeného filtru. Velikost postranních laloků je důležitým parametrem komprese pulzů a lze ji volbou takové modulace snížit až na hodnotu – 30 dB. [1]

1.8.4 Nelineární frekvenční modulace

V neposlední řadě se lze setkat s nelineární frekvenční modulací, kterou lze též potlačit postranní časové laloky bez možných ztrát v odstupu signál-šum, pomocí zkreslení průběhu frekvence na okrajích pulzu nebo přímo nelineárním průběhem frekvence v pulzu. Dochází nicméně ke snížení odolnosti na Dopplerův posun přijímaného signálu. Nevýhodou jsou systematické chyby při měření radiální vzdálenosti cíle. [14], [1]



Obrázek 14 - Průběh frekvence přes šířku pulzu s modulací NLFM

Tvar křivky okamžité frekvence (viz. Obrázek 14) s použitou modulací NLFM založené na tangenciální funkci lze volitelně tvarovat. Ve výpočtech pro průběh frekvence operuje regulační faktor postranních laloků, kterým lze měnit samotné rozložení frekvencí. Vhodnou regulací se docílí přijatelnějších úrovní postranních laloků, které vylepšují samotnou detekci radaru. [20]

$$f(t) = \frac{\beta \cdot \tan\left(\frac{2\gamma t}{\tau}\right)}{2 \cdot \tan(\gamma)} \quad (1.13)$$

Průběh frekvence lze vypočítat pomocí vzorce 1.13, kde β je šířka pásma použité modulace, τ je šířka pulzu a t je čas, jenž se pohybuje mezi záporně a kladně vzatou polovinou šířky pulzu. Parametr γ je počítán pomocí vzorce 1.14, kde α je regulační faktor postranních laloků, který musí být větší nebo roven hodnotě 0. [20]

$$\gamma = \tan^{-1}(\alpha) \quad (1.14)$$

1.8.5 Fázová modulace a Barkerovy kódy

Dalším přístupem, kterým lze dosáhnout komprese pulzu je fázová vnitropulzní modulace, která se vyznačuje konstantní frekvencí a změnou fáze v době trvání pulzu.

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n(t - n\tau_s) \quad (1.15)$$

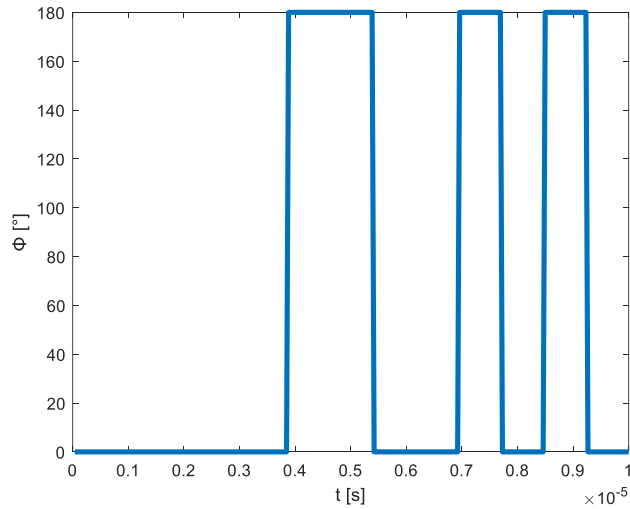
Kde $x_n(t)$ – je průběh jednotlivých vzorků pulzu,
 τ_s – je doba trvání symbolu,
 N – je vzorek symbolu.

Průběh zakódovaného pulzu (vzorec 1.15) lze rozdělit na N vzorků, které nabývají převážně stavu „0“, který označuje výchozí stav fáze a „1“, což je fázový posun (většinou invertovaný signál). Jedněmi z nejpoužívanějších binárních kódů jsou Barkerovy kódy, které rozdělují pulz na specifický počet vzorků, kde každý má dle tabulky (viz. Tabulka 2) přiřazený logický stav odpovídající průběhu fáze. Odolnost na Dopplerův posun je horší v kontrastu s jinými používanými modulacemi. [14]

Tabulka 2 - Používané Barkerovy kódy [11]

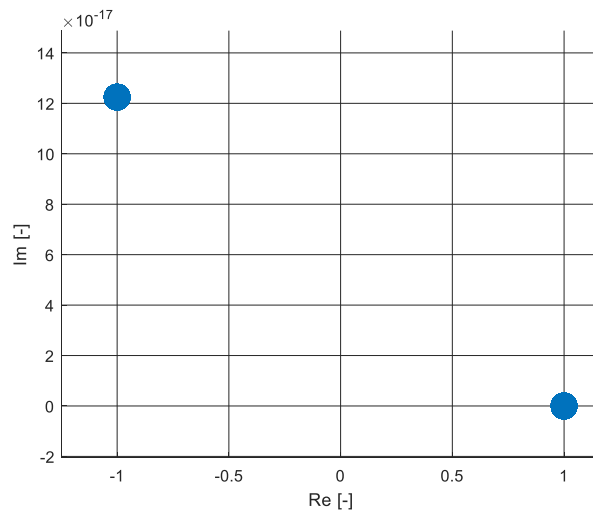
N	$\{c_n\}$
2	01
3	001
4	0001
5	00010
7	0001101
11	00011101101
13	0000011001010

Jednotlivé Barkerovy kódy rozdělují pulz na odlišný počet modulačních symbolů s logickými stavy, přičemž nejdelší sudý kód odpovídá délce $N=4$ a nejdelší lichý známý kód $N=13$. Vzorkovací frekvence musí být volena tak, aby bylo možné rozdělit pulz na konkrétní počet symbolů odpovídající hodnotě N . Jeden takový symbol obsahuje několik vzorků, přičemž všechny mají hodnotu fáze vycházející z tabulky.



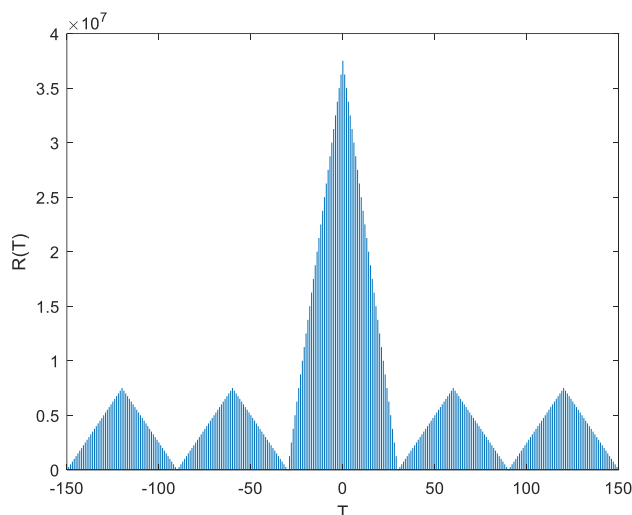
Obrázek 15 - Fázový průběh signálu modulovaný BPSK s 13-bitovým kódem Barker

Na Obrázku 15 je znázorněné překlápění fáze pro modulovaný BPSK pulz 13-bitovým kódem Barker. Pro užší pulzy se používají kratší kódy jako například běžně využívaný Barker 5. Body v konstelačním diagramu (viz. Obrázek 16) jsou vůči sobě posunuty o 180° .



Obrázek 16 - Konstelační diagram modulace BPSK s využitím Barkerových kódů

Amplitudy postranních časových laloků jsou téměř perfektní, jelikož mají nejmenší možnou hodnotu blížíci se hodnotě 1. Hlavní lalok má přibližnou amplitudu rovnající se hodnotě N v čase $t=0$. Postranní časové laloky jsou rovnoměrně rozprostřené kolem hlavního laloku. Průběh autokorelační funkce je zobrazen na Obrázku 17.



Obrázek 17 - Autokorelační funkce 5- bitového kódu Barker

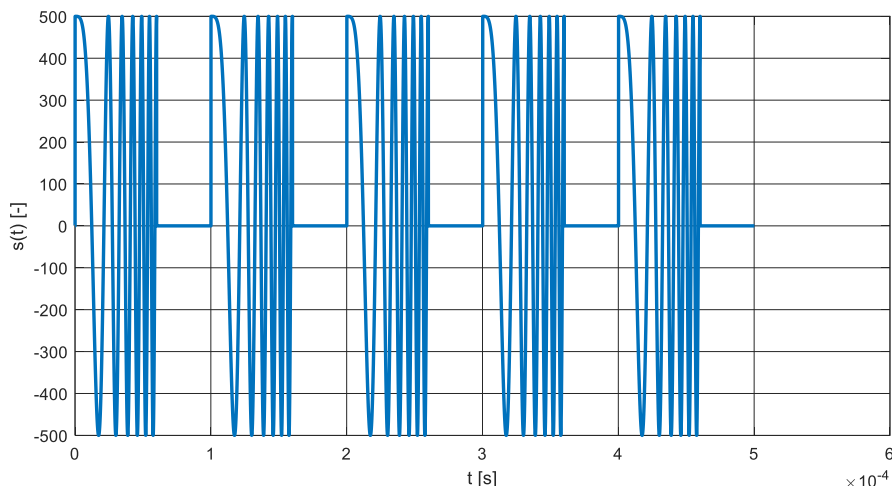
Pro fázovou modulaci existují další možné varianty způsobu kódování, jako je například Frankův kód. Jedná se o polyfázovou modulaci aproximující modulaci frekvenčními skoky signálem s diskrétní fází. Frekvenční krok je odvozen od počtu aproximovaných frekvencí. Podobný kód P1 funguje na stejném principu a liší se pouze ve způsobu uspořádání fázových změn. Za zmínku též stojí Weltho kódy tvořené dvojicemi polyfázových kódů. [1], [11]

1.9 Střídání délky opakovací periody - Stagger

Při jednoznačném měření vzdálenosti může docházet k detekci odraženého signálu od vzdáleného objektu, který radar může zaznamenat až při vysílání dalšího pulzu a nastává problém se správným výpočtem vzdálenosti daného objektu. Během zpracování dat může v další periodě dojít k detekci takového odraženého signálu a nelze určit, zda se jedná o odraz prvního nebo druhého vysílaného pulzu. Pro dobu mezi vysílacími pulzy T_{op} musí platit podmínka pro jednoznačné měření vzdálenosti (viz. Rovnice 1.1). Mezi možnostmi řešení jednoznačného měření patří vnitropulzní modulace, přeladování provozní nosné frekvence nebo střídáním délky opakovací periody T_{op} (označované anglickým výrazem „stagger“), která se též využívá pro změnu slepé rychlosti cíle. Pokud se cíl pohne mezi jednotlivými pulzy tak, že by byl posuv přijatého signálu pulz od pulzu roven 360° nastane situace, kdy se cíl radaru jeví jako statický a dochází ke ztrátě detekce [1].

1.10 Interval koherentního zpracování CPI

Vysílání skupiny pulzů CPI je metoda, která se používá pro detekci pohyblivých cílů. Pulzy jsou vysílány v krátkých časových intervalech (viz. Obrázek 18) po sobě, což má za následek zvětšení množství energie vysílaného pulzu, čímž se docílí lepšího odstupu signál-šum. V praxi stačí využívat jeden přizpůsobený filtr, kterým se postupně zpracují jednotlivé pulzy a na jeho výstupu bude jejich součet. [11]



Obrázek 18 – Časový průběh vysílání skupiny pulzů

1.11 Krátké a dlouhé pulzy

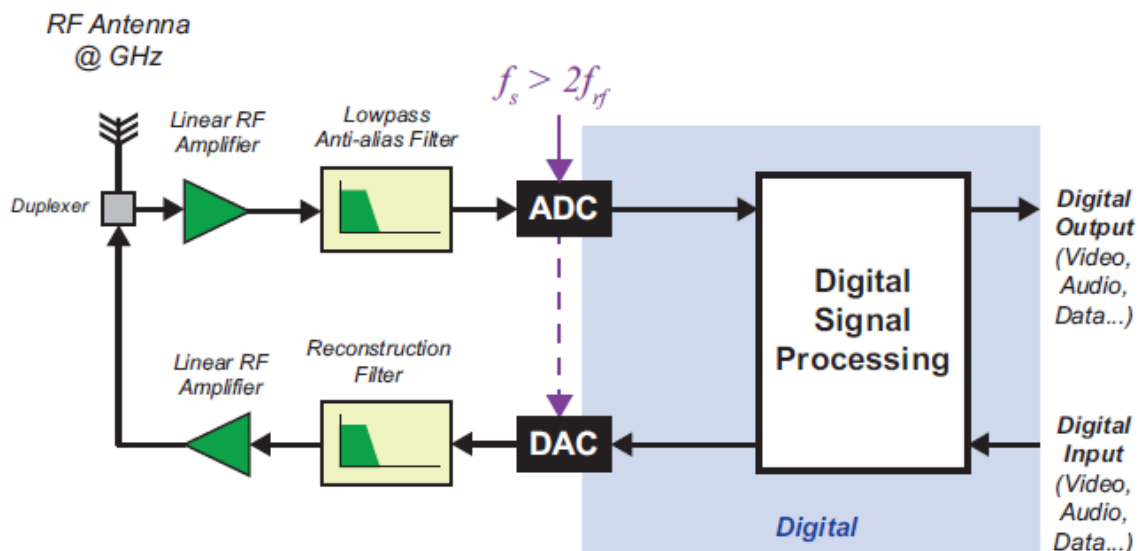
Dosah radaru se odvíjí od spousty faktorů, jako je například požadavek na vysoký vysílací výkon. Využitím komprese pulzu není zapotřebí tak veliký výkon, nicméně pro co nejlepší dosah je nutné používat relativně dlouhé modulované pulzy. Čím širší pulz, tím je horší minimální rozsah měření, jelikož během vysílání nemohou monostatické radary přijímat signál. Aby se omezily tyto nevýhody, používá se několik metod. Jednou z možností je střídavé vysílání modulovaných krátkých a dlouhých pulzů, a druhou možností vysílání velmi krátkého nemodulovaného pulzu, jehož výkon zaručí krátký maximální dosah pro menší vzdálenosti. [21]

1.12 Přeladování radaru

Radary jsou vystavovány několika druhům rušení, jakými jsou například atmosférické jevy, rušení druhým vysílačem operující na stejném kmitočtu nebo úmyslné rušení radaru pomocí rušičky. Využitím přeladování své provozní frekvence (označováno anglickým výrazem „frequency agility“) se dá rušení částečně nebo zcela omezit. Pulzní radary mohou využívat přeladování s každým vysílaným burstem, kde se k provozní frekvenci přičte, nebo odečte specifický přírůstek frekvence. Starší modely radarů pracovaly s malým množstvím pevných kmitočtů, na které se dokázaly naladit. U modernějších radarů existují algoritmy pro přeladování pracovní frekvence s náhodným krokováním. [22]

1.13 Softwarově definované rádio

Softwarově definované rádio je zařízení, které dokáže vysílat a přijímat rádiové signály. Klasické rádiové zařízení zpracovává data v jeho fyzické vrstvě, kdežto funkce softwarově definované rádia je založena na digitálním zpracování uvnitř digitálního signálového procesoru (DPS). [23]



Obrázek 19 - Blokové schéma softwarově definovaného rádia [23]

Ideální softwarově definované rádio (viz. Obrázek 18) se skládá z radiofrekvenční části (obsahující anténu, zesilovače a filtry), A/D a D/A převodníků a digitálního signálového procesoru. Běžně cenově dostupné SDR zařízení využívají směšování signálu na nulu nebo mezifrekvenci před samotnou digitalizací. [23]

2 Popis použitého hardwaru

2.1 Popis softwarově definovaného rádia Adalm-Pluto SDR

Jednou z dostupných variant dostačujících pro simulaci radarových pulzů je SDR active learning modul Adalm-Pluto (viz. Obrázek 20) vyráběn firmou Analog Devices. Zařízení je kompatibilní s mnoha programovacími jazyky jako C, C++, C# a MATLAB. Zároveň spolupracuje s veřejně dostupnými knihovnami a rozšířeními ulehčující kalibraci softwarově definovaného rádia a samotnou programovací část. [24]



Obrázek 20 - Softwarově definované rádio Adalm-Pluto

Zařízení je vybaveno vysílačem a přijímačem, které dokážou pracovat v poloduplexním nebo duplexním provozu a zároveň generovat nebo přijímat rádiové analogové signály v rozsahu 325 MHz až 3,8 GHz s okamžitou šířkou pásma 20 MHz. Napájení a komunikace probíhá připojením USB 2.0 kabelu. Nevýhodou takového propojení je omezená přenosová rychlost a zároveň nutnost propojení dostatečně dlouhým kabelem dvou zařízení na stejnou výpočetní jednotku. [24]

2.2 Koaxiální kabel

Realizace přenosu dat mezi vysílací a přijímací částí softwarově definovaného rádia lze vyřešit propojením obou svorek koaxiálním kabelem. Výhodou takové signálové cesty je přenos signálu s velkou šířkou pásma, minimálního rušení systémů v okolí, a stejně tak minimalizace přijatého rušení, oproti vysílání a přijímání dat pomocí antén.

2.3 Anténa JCG401

Pro přenos dat mezi dvěma softwarově definovanými rádii na delší vzdálenost je vhodné využít antény JCG401 (viz. Obrázek 21), které jsou již součástí balení rádia. Balení obsahuje 2 takové antény a využívají se pro kalibraci rádia. Jedná se o anténu vyrobenou společností Jiashan Jinchang Electron, která se zabývá vývojem a konstrukcí více druhů antén. Důležité parametry antény popisuje Tabulka 3. [25]

Tabulka 3 - Důležité parametry antény JCG401 [25]

Frekvenční rozsah	824~894/1710~2170MHz
Polarizace	Lineární
Zisk	2dBi
Činitel stojatého vlnění	< 2.5
Impedance	50Ω
Konektor	SMA Male
Operační teplota	-40°C~+85°C

Nejdůležitějším parametrem antény je frekvenční rozsah a zisk, jehož spodní frekvenční pásmo je uváděno jako rozsah 824~894 MHz. Pro vyšší hodnoty kmitočtu než jsou uváděny výrobcem, jako horní hranice frekvenčního rozsahu je lepší použít anténu s větším rozsahem.



Obrázek 21 - Anténa JCG401

2.4 UWB Anténa

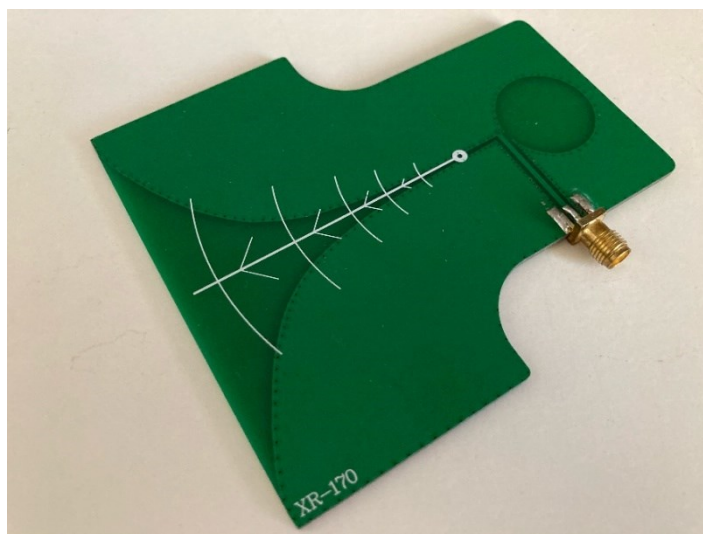
Pro vysílání na vyšších kmitočtech byla použita UWB anténa (viz. Obrázek 22), která dokáže pracovat v kmitočtových pásmech L, S, C a částečně i X. Všechny důležité parametry antény popisuje Tabulka 4.

Tabulka 4 - Důležité parametry UWB antény [26]

Frekvenční rozsah	1.4 ~ 10.5 GHz
Polarizace	Lineární
Zisk	7dBi
Činitel stojatého vlnění	< 2.0
Konektor	SMA Female

Oproti anténě JCG401 nabízí UWB anténa kmitočtový rozsah 1.4 – 10.5 GHz, který se dá využít pro simulování radiolokátorů, které operují s vyšší frekvencí nebo pro jiné účely jako je například GPS navigace. Při měření na stejných frekvencích, které mohou ve stejné chvíli

využívat i jiné systémy je zapotřebí odstínit takový signál, aby nerušil měřený přijímaný signál. Simulaci radiolokátoru je nejvýhodnější provést mimo dosah takových rušivých signálů.



Obrázek 22 - Ultra-wide Directional UWB Antenna

2.5 Výpočetní jednotka

Softwarově definované rádio Adalm-Pluto umožňuje ke své funkci připojení přes sběrnici USB k výpočetní jednotce. Parametry takové výpočetní jednotky by měli být volené tak, aby svým výkonem dokázaly zpracovat větší množství dat, jelikož v některých proměnných může být uloženo množství dat odpovídající desítkám milionu I/Q vzorků. Pro simulaci s anténami je vhodnější zvolit jako výpočetní jednotku notebook kvůli pohybu v terénu.

2.5.1 Stolní počítač

Veškerý vývoj a testování aplikace byl prováděn na stolním počítači v uzavřené místnosti. Aby bylo předejito mnohocestným odrazům antén, byla vysílací a přijímací část softwarově definovaného rádia propojena koaxiálním kabelem. Stolní počítač je vybaven grafickou kartou GeForce GTX 1050 s pamětí 2 GB, šestijádrovým procesorem AMD FX-6300, který pracuje na frekvenci 3,5 GHz, dvěma operačními pamětmi 8 GB (dohromady 16 GB) a SSD diskem Kingston s kapacitou 500 GB. Výkon stolního počítače byl dostačující vzhledem k náročnosti všech simulací, přičemž delší čas při zpracování dat záležel převážně na paměti použitého softwarově definovaného rádia.

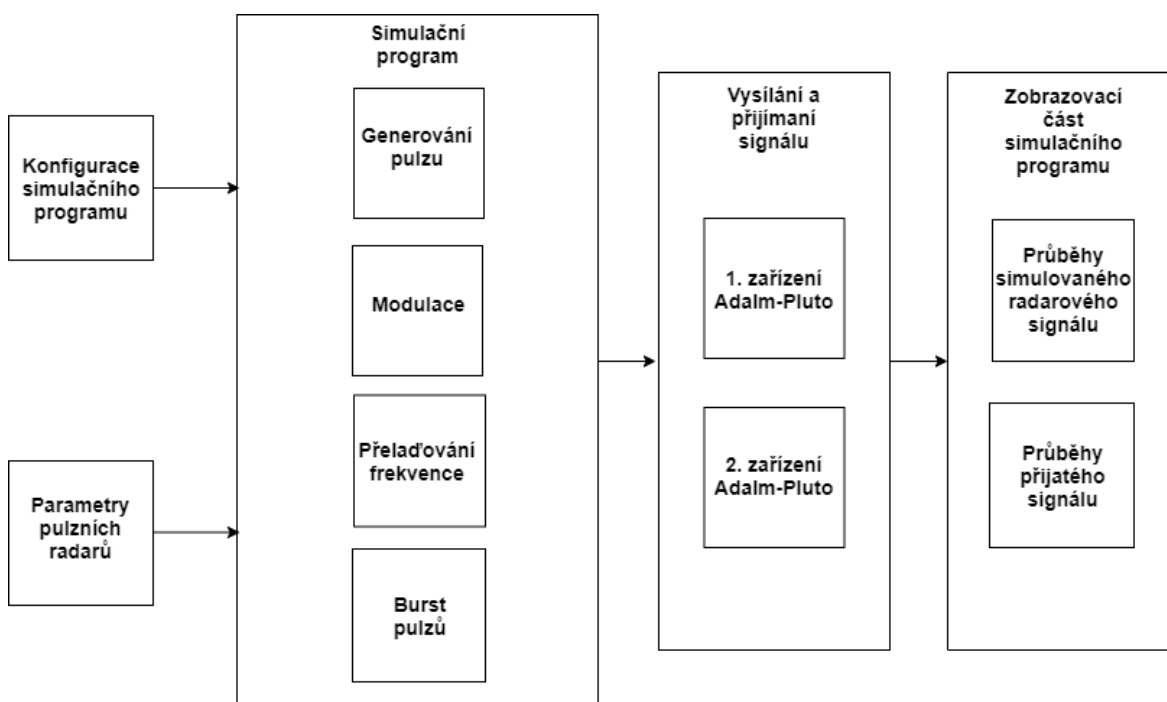
2.5.2 Notebook

Notebook je jednou z nejlepších možností při výběru výpočetní jednotky vzhledem k jeho mobilitě a možnosti praktických měření při napájení z baterie notebooku. Používané zařízení HP 250 G6 je vybaveno integrovanou grafickou kartou Intel HD Graphics 520, dvoujádrovým procesorem Intel i3, který pracuje na frekvenci 2 GHz, operační paměti RAM s kapacitou 4 GB a SSD diskem SATA s kapacitou 250 GB.

3 Vývoj simulačního programu v prostředí MATLAB

3.1 Popis simulačního programu

Pro simulaci vysílání radiolokátorů bylo dle zadání využito softwarově definovaného rádia a programovacího jazyka MATLAB (verze R2020b). Pro správnou funkci simulačního programu je zapotřebí přítomnost podpůrné rozšíření pro zpracování digitálních dat a ovládání softwarově definovaného rádia Adalm-Pluto [27]. Struktura programu je popsána na Obrázku 23. Blokové schéma je rozděleno do několika částí popisující jednotlivé procesy simulačního programu popsané v následujících kapitolách.



Obrázek 23 - Blokové schéma simulačního programu

3.2 Získ parametrů pulzních radarů

Účelem simulace je generování pulzních signálů na základě vstupních hodnot. Tyto vstupní hodnoty vycházejí z parametrů reálných radarových systémů, získaných z veřejně dostupných zdrojů. Simulační program načítá hodnoty uložené v textovém souboru a následně je vloží do předem definovaných proměnných. V dalších částech programu jsou data zpracovávána postupně od prvního pulzu až po poslední. Využitím takového zápisu je možné nadefinovat více pulzních signálů a zároveň mít větší množství textových souborů pro více simulovaných radarů. Struktura zápisu radarových parametrů do textového souboru je znázorněna na Obrázku 24, přičemž první řádek slouží pouze jako popis jednotlivých sloupců.

Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda		
Pulse	Tp	PRF	Modul	Hodnota	ModType	Burst
1	6e-6	500	None	0	0	6
2	10e-6	1000	LFM	1e6	UPCHIRP	3

Obrázek 24 - Textový soubor obsahující parametry pulzních radarů

3.3 Konfigurace simulačního programu

Druhou částí konfigurace simulačního programu je přímý zápis do proměnných. Výhodou tohoto řešení je oddělení pevně stanovených parametrů radaru a nastavení simulačního programu, které se může přepisovat přímo uvnitř něho. Mezi nastavitelné parametry patří vzorkovací frekvence v rozmezí 520 kHz až 61,44 MHz a nosná frekvence v rozpětí 70 MHz až 6 GHz. Interval těchto hodnot je s výpomocí podpůrného rozšíření laditelný v širším pásmu, než dovoluje samotné Adalm-Pluto v základu [27]. Nicméně samotné rádio dovoluje pracovat s jinými parametry, které jsou uvedeny v kapitole 2.1. Dalším nastavitelným parametrem je výběr délky zobrazovaných rámců přijatého signálu. Posledním konfigurovatelným parametrem je ladění nosné frekvence radaru řešeno zápisem do matice.

3.4 Generování pulzu

Pulzní signál se v základu skládá ze dvou částí a to ze samotného pulzu společně s jeho čekací dobou. V simulačním programu se vygenerují časové vektory pro oba zmíněné parametry s určitým počtem hodnot, které jsou rozšiřitelné o velikost vzorkovací frekvence. Volba vzorkovací frekvence musí být volena s ohledem na další kroky programu, jelikož modulace BPSK s různými Barkerovými kódy vyžadují ke svému výpočtu vektorovou délku pulzu, která musí být dělitelná vstupním parametrem radaru „ModType“, jenž zároveň označuje druh kódu. Podobné nároky má i modulace LFM, která vyžaduje dostatečně velkou vzorkovací frekvence ke svému správnému vymodelování. Vzorkovací frekvence musí splňovat vzorkovací teorém, aby nedocházelo k aliasingu signálu.

3.5 Modulace

Podmínkou správně provedené modulace je vhodná velikost vzorkovacího kmitočtu (viz. Kapitola 3.4). Simulační program obsahuje sadu základních modulací FM a PM zároveň s běžně používanými modulacemi v radarové technice mezi které patří LFM, NLFM a BPS s využitím Barkerových kódů. Je-li parametr pulzního radaru „Modul“ vyplněn slovem „None“ nebude pro daný pulz provedena komprese použitím žádné z nabízených modulací a simulační program vygeneruje pulz ve tvaru obdélníku. Jakkoliv generovaný pulz je převeden vzorcem 3.1 (nebo jeho vhodnou úpravou) na I/Q data z důvodu kompatibility s dalšími procesy programu.

$$s(t) = A \cdot e^{(2\pi \cdot f(t) \cdot t + \varphi(t))} \quad (3.1)$$

Všechny varianty LFM (viz. Kapitola 1.8.3) vygenerují na základě vstupních parametrů vektor I/Q dat, použitím vhodné úpravy vzorce 3.1 pro konkrétní variantu. Použitím NLFM (viz. Kapitola 1.8.4) dojde k sestavení vektoru frekvence podle vzorce 1.13. Podobný princip uplatňují všechny varianty modulace BPSK s využitím Barkerových kódů (viz. Kapitola 1.8.5), kde dojde k vygenerování vektoru fáze, který se dosadí do vzorce 3.1 za $\varphi(t)$.

3.6 Popis procesu přeladování frekvence a burstu signálu

Přeladování pracovní frekvence radaru je řešeno zápisem do matice uvnitř simulačního programu a to z důvodu možnost zadání přímých hodnot. Z délky matice vytvoří program identické pulzy s přeladěným kmitočtem a zařadí je postupně za sebe s posloupností odpovídající pozicím zadaných hodnot uvnitř matice. V praxi využívají moderní radary složité algoritmy a široký výběr ladících frekvencí [22]. Nasimulování velkého množství pulzů s přeladěnými frekvencemi nelze se zařízením Adalm-Pluto realizovat z důvodu kapacity paměti, proto byla v praktickém měření využita pouze jedna přeladěná frekvence.

Pomocí číselného údaje v parametru „Burst“ zapsaného v textovém souboru s parametry radaru lze realizovat opakování pulzu. Simulační program rozšíří pulz společně s jeho čekací dobou o konkrétní hodnotu a zařadí je postupně za sebe.

3.7 Vysílání a příjem signálu zařízením Adalm-Pluto

Před samotným vysíláním je provedeno nastavení vysílací a přijímací schopnosti rádia. Při používání dvou zařízení Adalm-Pluto je zapotřebí nastavit, které z nich bude vysílat a jaké přijímat signál pomocí nastavení identifikačního čísla zařízení v simulačním programu, jenž se odvíjí od sběrnice USB, na kterou jsou jednotlivá zařízení připojena. Dále je potřeba nadefinovat vzorkovací a nosnou frekvenci společně se ziskem zesilovačů vysílače a přijímače, datovým typem a délkou rámce. Vysílání jednoho rámce (celého pulzu včetně všech burstů a přeladování) proběhne pouze jednou, přičemž přijímač zachytí a vygeneruje vektor zaznamenaných I/Q dat. Pro pouhé přijímání signálu lze použít pouze část zdrojového kódu simulačního programu, který nastavuje příjem zařízení, a zobrazovací část.

3.8 Zobrazovací část simulačního programu

Simulační program pracuje v zobrazovací části s naměřenými daty na přijímači rádia a zároveň s vygenerovanými daty před samotným vysíláním. Simulovaná data slouží pro vykreslení grafů ideálního signálu. První okno obsahuje grafy znázorňující reálný a imaginární průběhy ideálního signálu a zároveň graf obsahující průběh reálné a imaginární složky v čase. Průběhy reálných složek signálů jsou znázorněny modrou barvou a průběhy imaginárních složek barvou oranžovou. V druhém okně lze zobrazit časový průběh absolutní hodnoty naměřeného signálu (v decibelech), který prošel vysílací a přijímací cestou zařízení Adalm-Pluto, společně s konstelačním diagramem a spektrem signálu. Simulační program umožňuje na závěr záznam svého nastavení a naměřených hodnot do souboru s názvem „SimResult.mat“.

4 Simulace radiolokátorů

4.1 Volba parametrů a popis zapojení měřící soustavy

Ve veřejně dostupných publikacích se běžně neuvádí všechny důležité parametry radiolokačních systémů, jako například použité vnitropulzní modulace. Parametry vybraných radarů byly vybírány s ohledem na různorodost rozsahů jednotlivých parametrů a praktických využití těchto systémů. Pokud nebyla v žádném zdroji uvedena frekvence vysílání pulzu, byla vypočítána jako podíl konstanty rychlosti světla c a dvojnásobku dosahu daného radiolokátoru R_{max} (vzorec 3.2). V publikacích je často uváděn krátký a dlouhý dosah z čehož vyplývá nutnost simulace krátkého a dlouhého pulzu. S ohledem na šířky pulzů byla volena vnitropulzní modulace, přičemž pro krátké pulzy byla ve většině případů použita modulace BPSK pomocí krátkých Barkerových kódů nebo nedošlo k využití žádné z modulací. Široké pulzy byly modulovány lineárně frekvenční modulací nebo delšími Barkerovy kódy (BPSK).

$$PRF = \frac{c}{2 \cdot R_{max}} \quad (3.2)$$

Simulaci vysílání radiolokátoru je nutné provést se dvěma zařízeními Adalm-Pluto, jelikož při měření je nutné udržet rozestup mezi anténami. Obě softwarově definovaná rádia byla připojena přes sběrnici USB k výpočetní jednotce a v simulačním programu byla obou zařízení nastavena role vysílače nebo přijímače.

4.2 Popis simulace na měřícím pracovišti

Prioritou během měření je správný příjem signálu, který může být chybný, pokud přijímací anténa zachytí nežádoucí signály, které mohou být způsobeny odrazy od ostatních objektů nebo jinými nežádoucími jevy. Použitím koaxiálního kabelu lze zamezit nežádoucím odrazům, a proto je vhodné ho použít v uzavřeném prostředí, pokud není k dispozici vhodná anténa pro danou vysílací frekvenci. Pro měření s anténami je vhodné využít jako měřící pracoviště takovou lokalitu, ve které nebude docházet k velkým nežádoucím vlivům na měření.



Obrázek 25 - fotografie měřicí pracoviště na volném prostranství

Praktické měření bylo prováděno na jaře 2021 na volném prostranství (viz. Obrázek 25) v blízkosti obce Horušice v Pardubickém kraji. Lokalita byla vhodná, jelikož se v jejím blízkém okruhu nevyskytovaly žádné stromy, které by mohly způsobovat nežádoucí odrazy signálu, které by měly dostatečnou velikost, aby došlo k rušivým vlivům. Před samotným měřením došlo ke kontrole výskytu nežádoucích signálů na plánovaných vysílacích frekvencích a následovalo rozmístění softwarově definovaných rádií. Obě zařízení byla připojena přes USB kabel k notebooku, který zajišťoval datový tok a zároveň napájení obou rádií.

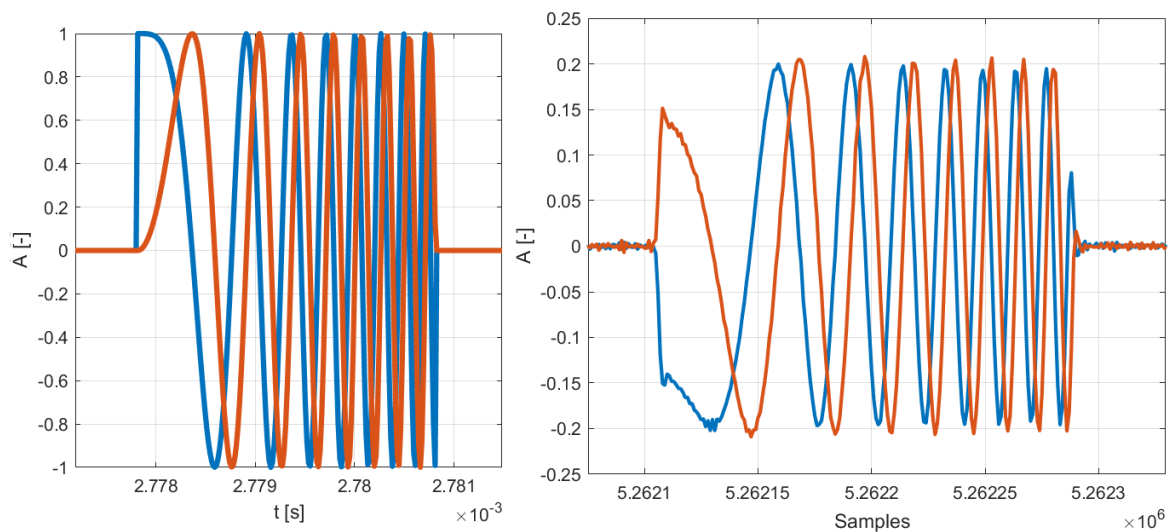
4.3 P-18ML

Modernizovaný přehledový radar P-18ML je nástupcem modelu P-18 (1RL131 Terek, „Spoon Rest“). Jedná se o pozemní mobilní radar vysílající v pásmu VHF, vyráběný Litevskou firmou LiTak-Tak. Výrobce uvádí významné zlepšení parametrů oproti jeho předchůdci a zároveň je vybaven funkcí automatického sledování a získávání dat z jiných sledovacích radarů a výškoměrů. [28]

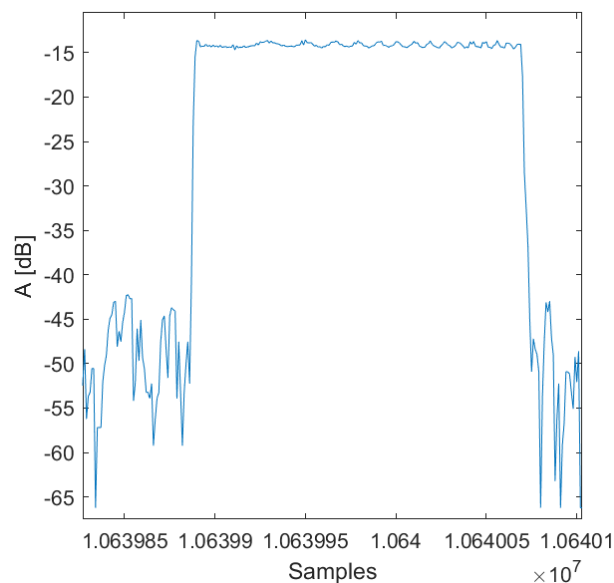
Tabulka 5 - Parametry radaru P-18ML [28]

Parametry	Parametry uváděné výrobcem		Simulované parametry	
	První pulz	Druhý pulz	První pulz	Druhý pulz
Šířka pulzu [μs]	6	6	3	6
PRF [Hz]	360	360	360	36
Modulace	-	-	LFM	Barker
Hodnota modulace	-	-	5 MHz	180°
Typ modulace / kódu	-	-	Up-chirp	13
Počet pulzů v burstu	-	-	2	3
Vysílací frekvence [MHz]	140-180		170	

Výrobce radaru uvádí na svých webových stránkách základní informace o radaru P-18ML včetně jeho parametrů. Simulované modulace byly zvoleny na základě šířek vysílaných pulzů, kdy pro první pulz byla zvolena LFM „Up-chirp“ včetně úpravy šířky pulzu na 3 μ s a pro druhý pulz modulace BPSK s Barkerovým kódem o délce 13. Hodnota frekvence vysílání pulzů PRF byla inspirována předchůdcem tohoto radaru zařízením P-18, přičemž hodnota druhého simulovaného pulzu byla snížena, což má znázorňovat průběh pulzu určeného k detekci na delší vzdálenost. Pro simulaci bylo použito jedno zařízení Adalm-Pluto a koaxiální kabel z důvodu nízké vysílací frekvence, jelikož nebyla k dispozici vhodná anténa. [28], [29]

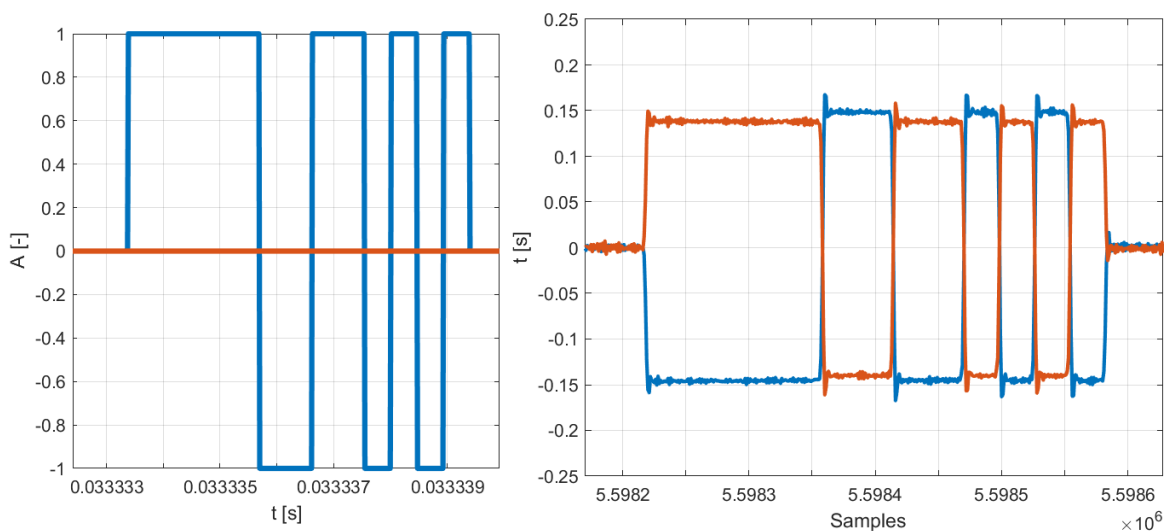


Obrázek 26 - Průběhy I/Q dat 1. pulzu (LFM) radaru P-18ML, vlevo simulovaný a vpravo naměřený

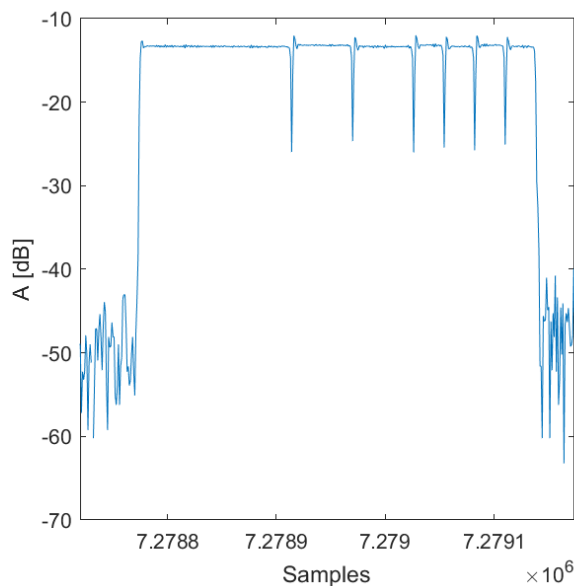


Obrázek 27 - Obálka 1. naměřeného pulzu (LFM) radaru P-18ML

Z průběhů na Obrázku 26 je patrné, že simulovaný a naměřený pulz mají lineárně narůstající průběh frekvence a lze jednoznačně určit, o jakou modulaci se jedná. Průběh absolutní hodnoty naměřeného komplexního signálu je na obrázku 27. Zvlnění obálky může být způsobeno kompenzací vyvážení reálné a imaginární složky signálu, jelikož v simulačním programu dochází k modulování pouze reálné části signálu. Důvodem může být zpoždění mezi změnami stavů signálu, které je vystaveno kompenzací vyvážení I a Q složky v RF čipu přímo v zařízení Adalm-Pluto. [30]

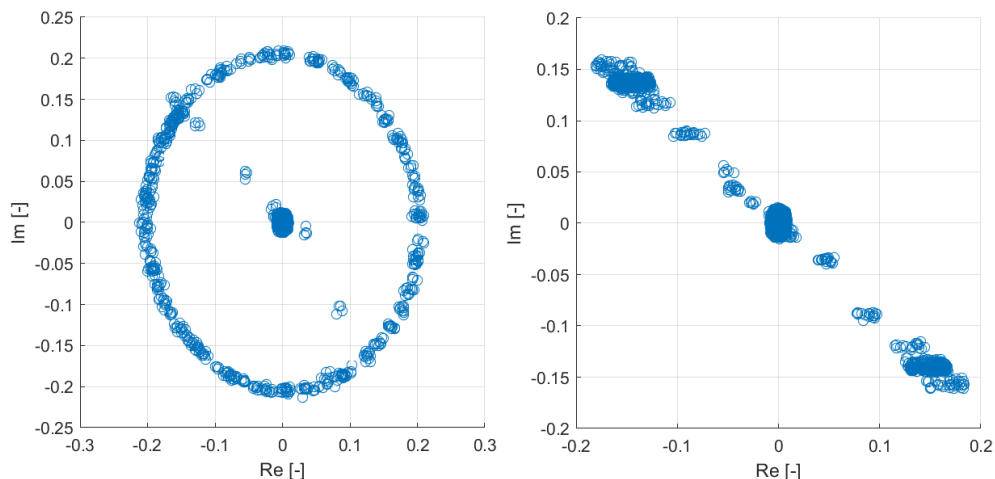


Obrázek 28 - Průběhy I/Q dat 2. pulzu (Barker) radaru P-18ML, vlevo simulovaný a vpravo naměřený



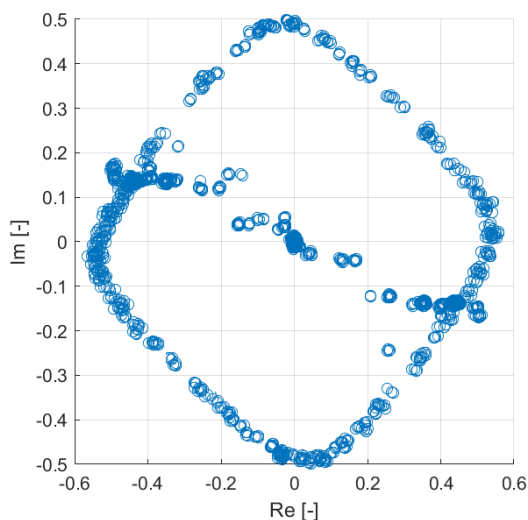
Obrázek 29 - Obálka 2. naměřeného pulzu (Barker) radaru P-18ML

Změna fáze simulovaného pulzu Barker 13 (viz. Obrázek 27) probíhá v časech, kdy se změní amplituda signálu a je patrné, že simulační program moduluje pouze reálnou složku signálu. Složky naměřeného komplexního signálu jsou otočeny o 360° . V praxi nelze fázový posuv zanedbávat, a proto běžně před zpracováním signálu předchází kompenzace frekvenčního a fázového rozdílu [1]. Při měření radarového signálu jde především o určení komprese pulzu. Z obou simulovaných pulzů lze věrohodně určit, o jakou použitou modulaci se jedná. Šířky pulzů a čekací doby mezi pulzy též odpovídají zadaným parametrům. S ohledem na šířky pulzu a použité modulace byla zvolena vzorkovací frekvence 60,5 MHz.



Obrázek 30 - Konstelační diagramy naměřeného signálu radaru P-18ML, vlevo LFM a vpravo Barker

Reálné a imaginární složky (viz. Obrázku 29) naměřeného signálu byly vyneseny do konstelačních diagramů, přičemž volbou vhodnější vzorkovací frekvence, frekvenčního zdvihu s ohledem na šířku pulzu by jednotlivé body věrohodněji kopírovaly tvar kružnice (viz. Kapitola 1.8.3) pro první pulz. Koncové body v konstelačním diagramu pro 2. pulz s modulací BPSK (Barker 13) jsou vůči sobě posunuty o 180° , přičemž se mezi nimi nacházejí i body, které odpovídají šumu signálu.



Obrázek 31 – Konstelační diagram obou naměřených pulzů radaru P-18ML v limitaci

Tvar konstelačního diagramu na Obrázku 31 se liší od předchozích konstelačních grafů, jelikož zisk zesilovače vysílacího rozhraní zařízení Adalm-Pluto byl nastaven na hodnotu 0 dB a docházelo k limitaci součtu výkonu I a Q dat, proto byl při měření zvolen zisk -15 dB.

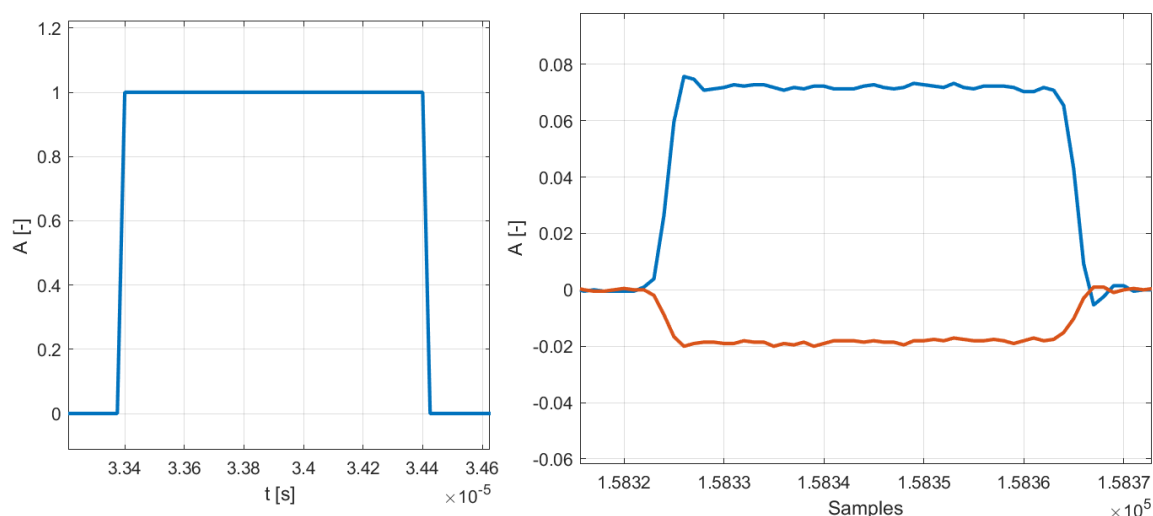
4.4 RL-61

Letištní přehledový radar RL-61 (ONĚGA) vyvíjen v druhé polovině osmdesátých let je plně koherentní systém s klystronovým vysílačem, který vysílá dvojici pulzů popsané v Tabulce 7. Delší pulz vykrýval vzdálenosti od 5 km do 100 km a kratší 2-5 km. Koherentní systém přinesl zlepšení potlačení nežádoucích odrazů od pozemních cílů, rychlého přeladění kmitočtu a případné změny modulace pulzů. [5]

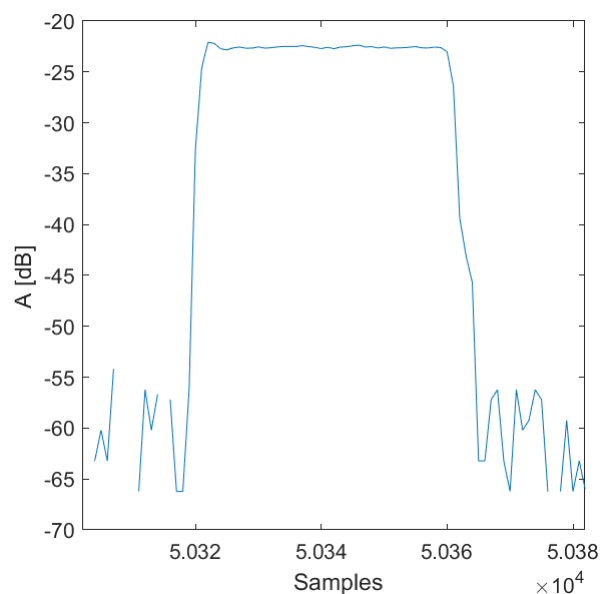
Tabulka 6 - parametry radaru RL 61 [5]

Parametry	Veřejně dostupné parametry		Simulované parametry	
	První pulz	Druhý pulz	První pulz	Druhý pulz
Šířka pulzu [μs]	1,2	24	1,2	24
PRF [kHz]	-	-	30	1,5
Modulace	Žádná	LFM	Žádná	LFM
Hodnota modulace	-	-	-	1 MHz
Typ modulace / kódu	-	-	-	Down-chirp
Počet pulzů v burstu	-	-	2	4
Vysílací frekvence [MHz]	2700-2900		2700	

V dostupných materiálech jsou uvedeny všechny podstatné parametry signálu, které byly převzaty pro samotné měření [5]. Frekvence vysílání pulzů byla vypočítána s použitím vzorce 3.2, kde se za R_{\max} rozumí maximální dosahy pro oba pulzy. Samotné měření bylo prováděno se dvěma zařízeními Adalm-Pluto pro vysílání a příjem signálu s použitím dvou UWB antén. Zisk vysílače byl nastaven na hodnotu -15 a zisk přijímače druhého zařízení na hodnotu 2.

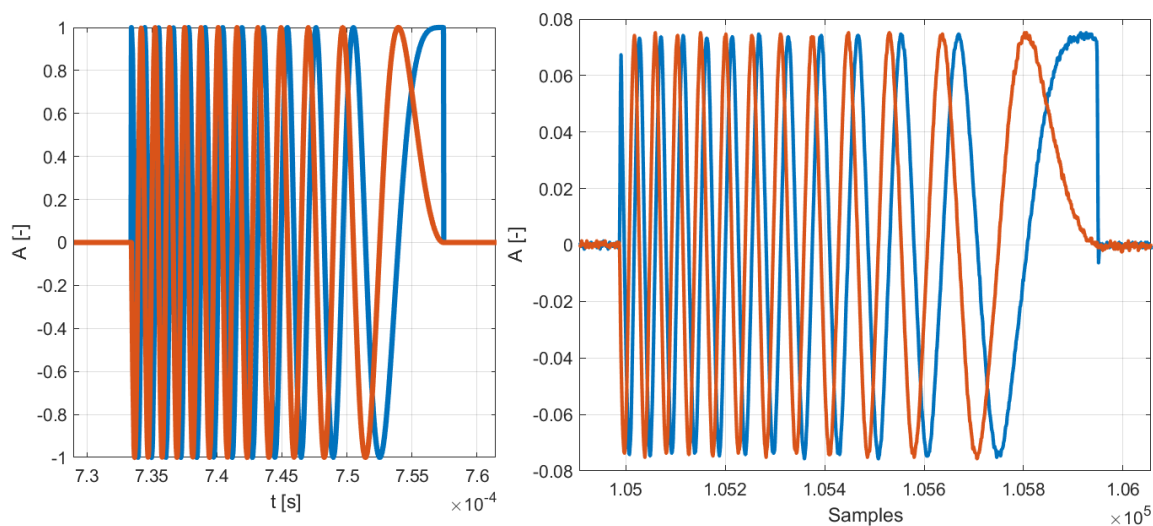


Obrázek 32 - Průběhy I/Q dat 1. pulzu (bez modulace) RL-61, vlevo simulovaný a vpravo naměřený

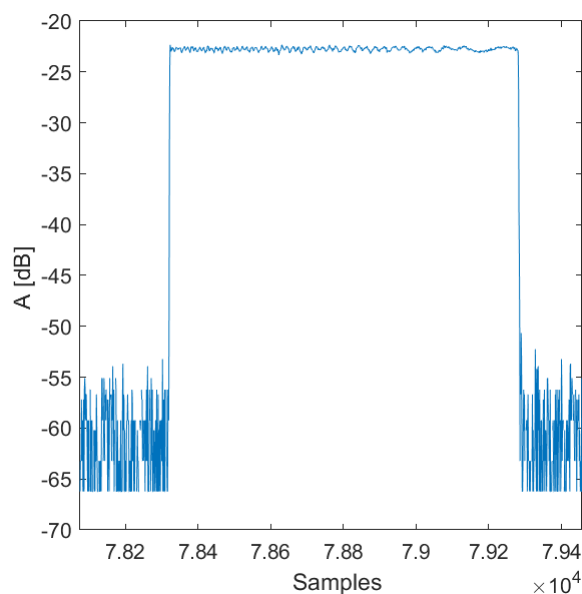


Obrázek 33 - Obálka 1. naměřeného pulzu (bez modulace) radaru RL-61

Průběh obdélníkového pulzu (viz. Obrázek 32) má na vysílací straně otočenou Q složku o 180° . Při vysílání více těchto pulzů může dojít k jevu, kdy každý další pulz může mít otočenou fázi o určitou hodnotu. Při vykreslení komplexní obálky signálu (absolutní hodnoty) se liší úrovně jednotlivých pulzů v jednotkách až desítkách decibelů.

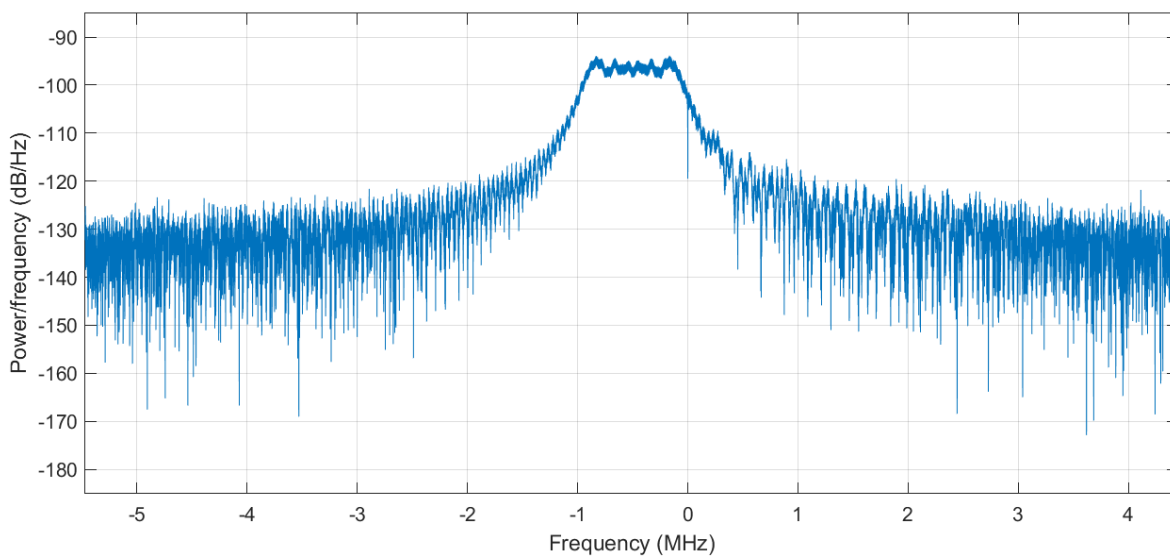


Obrázek 34 - Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) radaru RL-61, vlevo simulovaný a vpravo naměřený



Obrázek 35 - Obálka 2. naměřeného pulzu (LFM) radaru RL-61

Přijatá komplexní data druhého pulzu s modulací LFM (viz. Obrázek 34) se téměř neliší od nasimulovaného ideálního časového průběhu. Použitá vzorkovací frekvence má hodnotu 40 MHz, což je dostačující pro vzorkování takového pulzu s modulací LFM s frekvenčním zdvihem 1 MHz. Spektrum signálu (viz. Obrázek 36) má šířku odpovídající hodnotě frekvenčního zdvihu.



Obrázek 36 - Spektrum 2. naměřeného pulzu (LFM) radaru RL-61

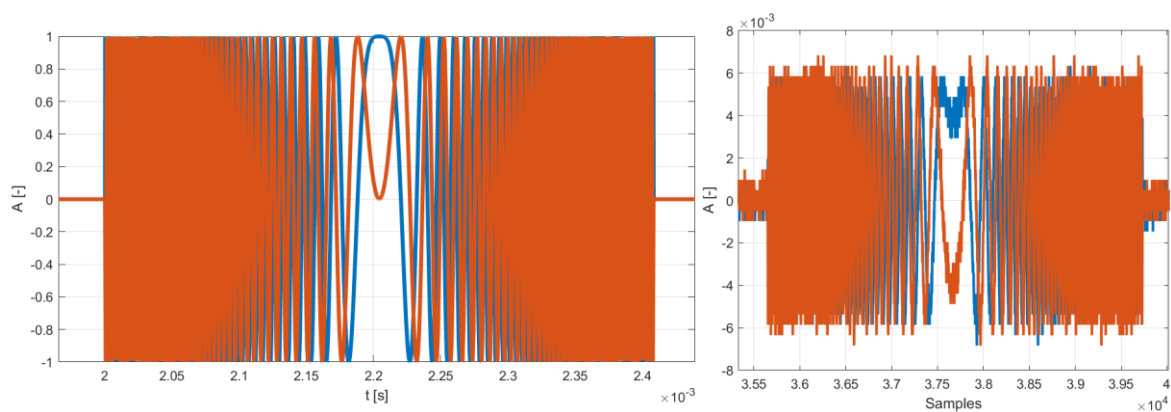
4.5 RL-2000

RL-2000 patří do moderní generace primárních přehledových radarů ELDIS sloužící pro kontrolu a sledování oblasti zájmu letišť. Systém se vyznačuje zabezpečením proti selhání a nízkými náklady. [2]

Tabulka 7 - parametry radaru RL – 2000 [2]

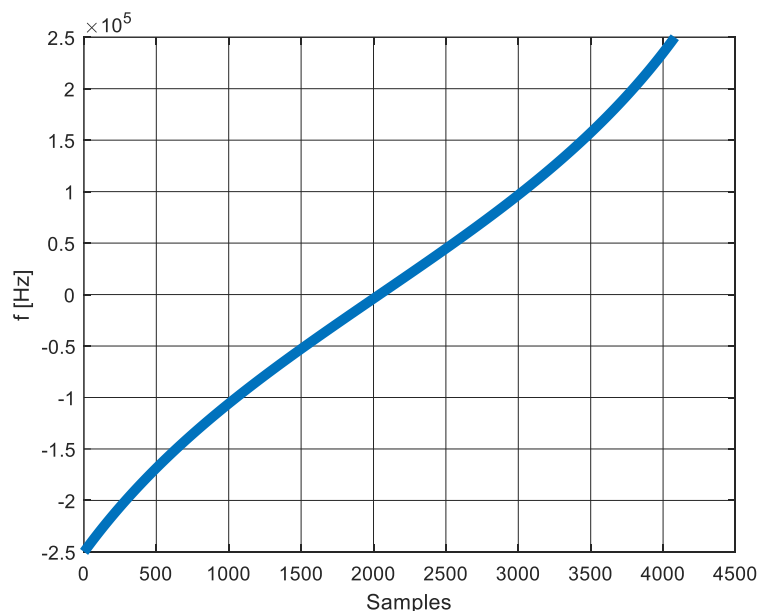
Parametry	Parametry uváděné výrobcem		Simulované parametry	
	První pulz	Druhý pulz	První pulz	Druhý pulz
Šířka pulzu [μs]	1,2	40,8	1,2	40,8
PRF [Hz]	-	-	1000	750
Modulace	-	-	Žádná	NLFM
Hodnota modulace	-	-	-	0,5 MHz
Typ modulace / kódu	-	-	-	UP-chirp
Počet pulzů v burstu	-	-	2	2
Vysílací frekvence [MHz]	2700-2900		2700	

Hodnoty šířek pulzů byly převzaty od výrobce společně s vysílanou frekvencí. Frekvence vysílání pulzu byly vypočítány s využitím vzorce 3.2 a vybraným dosahem 150 km, pro druhý pulz byla uměle zvolena hodnota 750 Hz [2]. Modulace byly voleny podle běžně používaných modulací, které využívají jiné radiolokační systémy s ohledem na šířky pulzů. Pro demonstraci byly zvoleny dva pulzy v jednom burstu. Simulace vysílání proběhla se dvěma zařízeními Adalm-Pluto, ke kterým byly připojeny UWB antény. Obě antény byly v přibližné výšce 1 metr s rozstupem 2,5 až 3 metry. Zisk vysílače prvního zařízení byl nastaven na hodnotu 0 a zisk přijímače druhého zařízení na hodnotu 2.



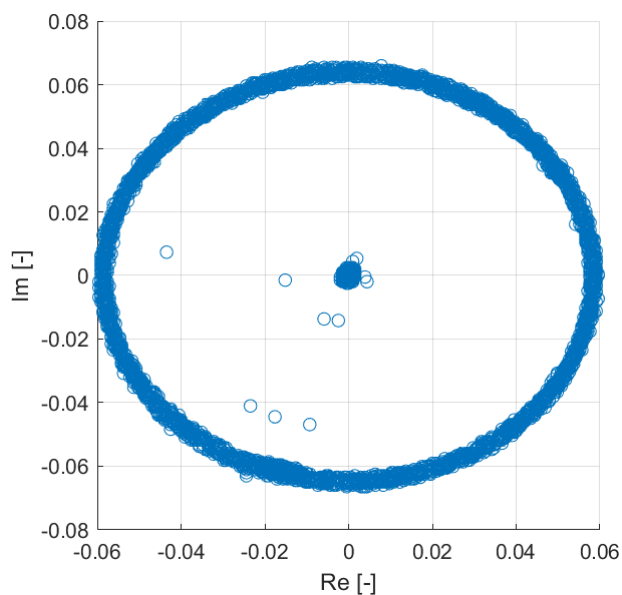
Obrázek 37 - Průběh I/Q 2. pulzu (NLFM) radaru RL-2000 , nalevo ideální, vpravo odvysílaný

Časový průběh komplexních složek prvního pulzu bez použité modulace je podobný jako u předešlých naměřených radarů, proto není nutné dělat jejich rozbor znovu. Aliasing přijatého signálu může být způsoben nevhodně zvolenou vzdáleností a natočením antén. Během měření docházelo k situacím, kdy měly na příjmu pulzy nízkou úroveň a jejich průběhy byly zkresleny šumem. Průběh frekvence přes pulz (viz. Obrázek 38) odpovídá předpokladům použité NLFM. Regulační faktor alfa byl volen s hodnotou 1.



Obrázek 38 - Průběh frekvence přes druhý pulz (NLFM) radaru RL-2000

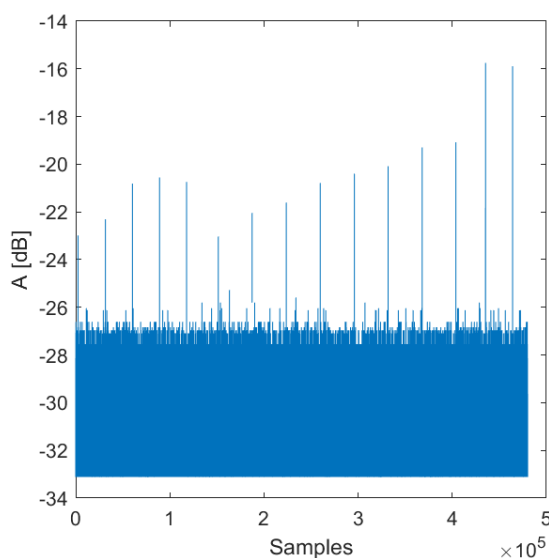
Jednotlivé body v konstelačním diagramu (viz. Obrázek 39) pro signál NLFM kopírují tvar kružnice.



Obrázek 39 - Konstelační diagram signálu RL-2000

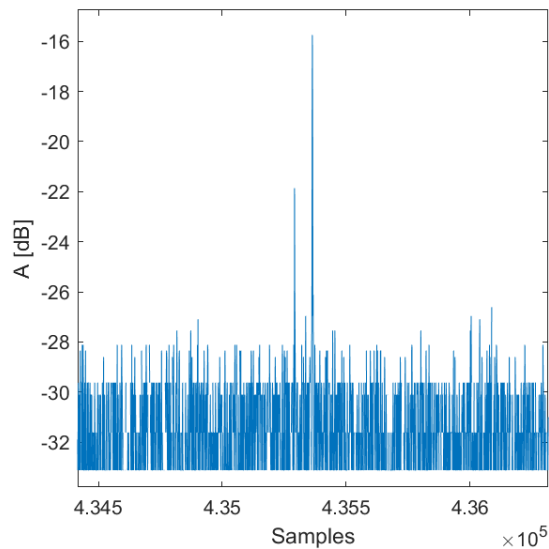
4.5.1 Měření reálného radaru RL-2000

Praktické měření reálného radaru RL-2000, který je součástí letiště Pardubice, bylo provedeno dne 3. května 2021 mezi obcemi Třebosice a Staré Jesenčany. Vzdálenost od radaru činila zhruba 500 m. Měření proběhlo pomocí upraveného scriptu pro příjem signálu a vykreslením komplexní obálky přijatých dat s jedním zařízením Adalm-Pluto, na jehož konektoru pro příjem byla připojena UWB anténa s nastaveným ziskem přijímače na hodnotě 5. Nosná frekvence rádia byla nastavena na hodnotu 2,8 GHz, jelikož radar vysílá v rozmezí 2,7 až 2,9 GHz [2]. Signál byl vzorkován s frekvencí 30 MHz a šířkou 500000 vzorků v přijatém rámci.



Obrázek 40 – Sekvence vysílaných pulzů reálného radaru RL-2000

Na obrázku 40 je zachycena sekvence vysílaných pulzů. Během měření bylo potřeba zachytit vysílání radaru v okamžiku, kdy anténa radaru směřovala na přijímací anténu zařízení Adalm-Pluto. Nebylo možné zaznamenat signál při každé otáčce radaru, jelikož simulační program prováděl každý další záznam se zpožděním přibližně půl sekundy. Vzhledem k použitému hardwaru nebylo možné snímat vysílaný signál radaru s menším zpožděním, jelikož by musela být zredukován počet dat, čímž by musela být snížena vzorkovací frekvence nebo šířka přijatých vzorků.



Obrázek 41 – Zaznamenaný výskyt krátkého a dlouhého pulzu reálného radaru RL-2000

V přijatém signálu se vykytuje krátký a dlouhý pulz, což odpovídá předpokladům reálného vysílání takového radaru. Čekací doba mezi krátkým a dlouhým pulzem je přibližně $2,2 \mu\text{s}$ a doba mezi dlouhým a krátkým pulzem další přijaté dvojice pulzů je přibližně $0,9587 \text{ ms}$.

Záznam dat pro každou otáčku radaru nebylo možné provést vždy, protože vysílací frekvence nemusela souhlasit s nastavenou frekvencí měřicího zařízení Adalm-pluto, jelikož v radaru docházelo k přeladování této vysílací frekvence. Naměřená I/Q data (viz. Obrázek 42) nemají tvar obdélníku, ať už kvůli nedostatečně vysoké vzorkovací frekvenci, nebo chybnému záznamu. Signál s nepatrně lišící se nosnou frekvencí, který se na přijímací stranu měřicího zařízení mohl dostat kvůli aliasingu, nemusel být dostatečně potlačen filtrem za směřováním uvnitř rádia. Z průběhu lze alespoň přibližně určit šířku obou pulzů, přičemž šířka krátkého pulzu činí $0,1 \mu\text{s}$ a šířka dlouhého pulzu $0,13 \mu\text{s}$. Parametry uváděné výrobcem se neshodují s naměřenými parametry, což může být způsobeno chybným záznamem vzhledem k použitému hardwaru a jeho omezením, nebo tím, že samotný radar RL-2000 vysílá signály s jinými parametry, než uvádí výrobce [2].

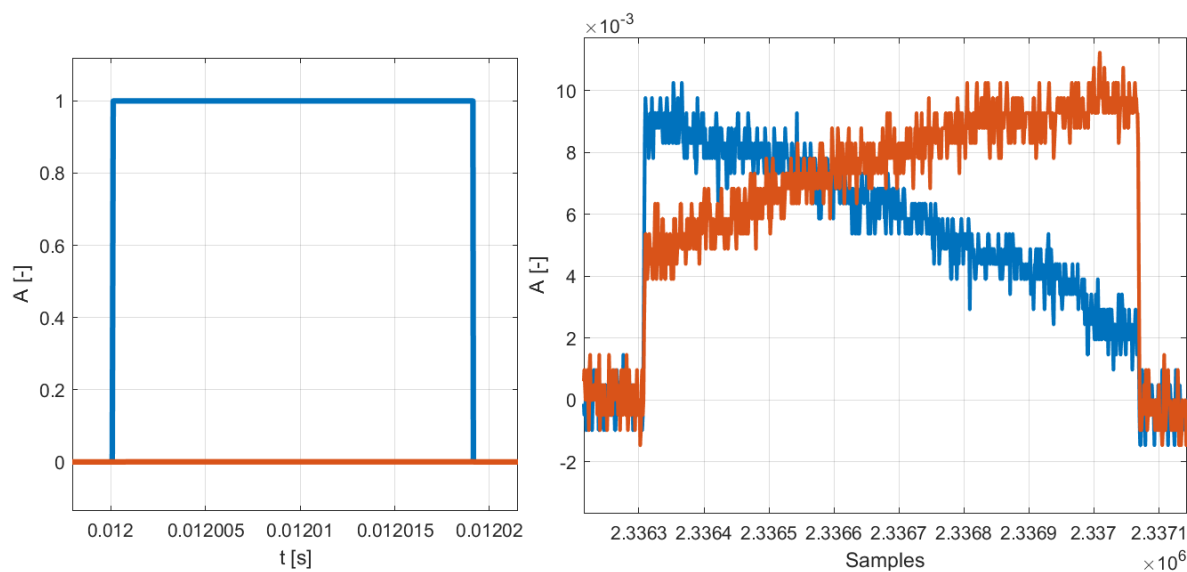
4.6 Chain Home

Chain Home (AMES) byl krycí název pro pobřežní komplex radarových stanic postavených Brity před a během druhé světové války. Systém zahrnoval tři typy radarů, přičemž každý vysílal na jiném kmitočtu s odlišnými parametry signálu. V Tabulce 8 jsou uvedeny parametry radaru označovaného názvem Chain Home Extra Low, který měl kratší dosah, ale dokázal detekovat letadla v nízkých nadmořských výškách. [31]

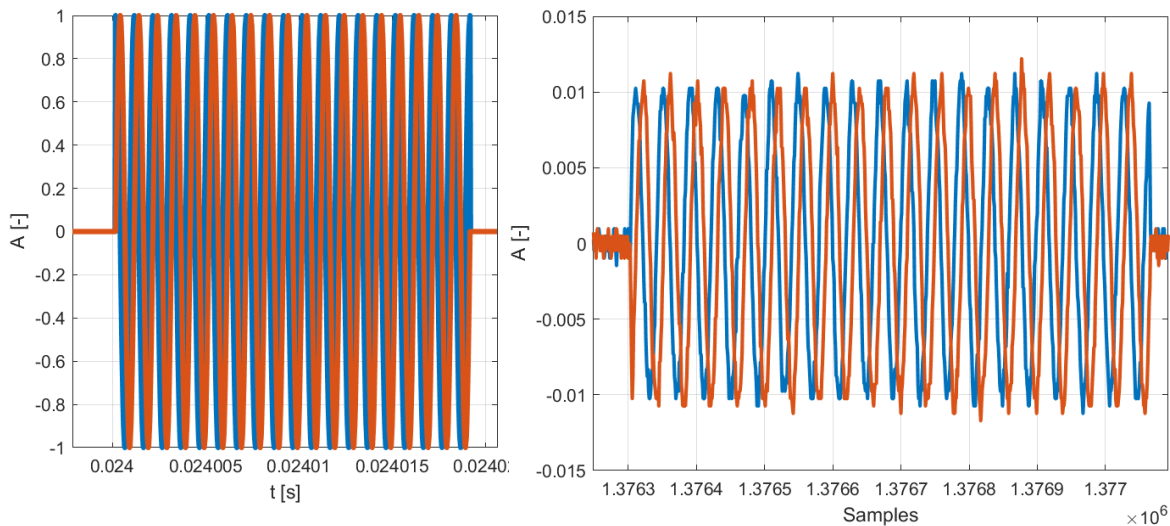
Tabulka 8 - Parametry radaru Chain Home [31]

Parametry	Veřejně dostupné parametry		Simulované parametry	
	První pulz	Druhý pulz	První pulz	Druhý pulz
Šířka pulzu [μs]	1,9	6,6	1,9	6,6
PRF [Hz]	500	-	500	100
Modulace	-	-	Žádná	LFM
Hodnota modulace	-	-	-	1 MHz
Typ modulace / kódu	-	-	-	Up-chirp
Počet pulzů v burstu	-	-	1	1
Vysílací frekvence [MHz]	3000		3000	

Frekvence vysílání pulzů byla pro druhý pulz zmenšena na jednu pětinu PRF prvního pulzu z důvodu prezentace kratšího a delšího rozsahu radiolokátoru. Pro kratší pulz nebyla zvolena žádná modulace a pro druhý širší pulz modulace LFM s lineárně narůstající frekvencí s frekvenčním zdvihem 1 MHz. Zároveň bylo pro oba pulzy použito přeladění kmitočtu o hodnotu 1 MHz. Simulace vysílání proběhla ve vhodném prostředí se dvěma zařízeními Adalm-Pluto a UWB anténami přičemž vzdálenost mezi nimi činila přibližně 2,5 až 3 metry. Zisk vysílače byl nastaven na hodnotu 0 a zisk přijímače na hodnotu 2.

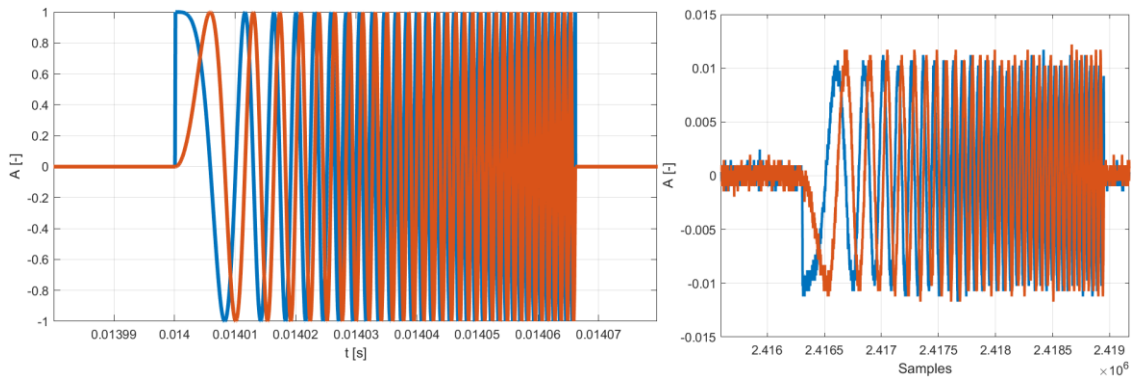


Obrázek 42 – Průběhy I/Q dat 1. pulzu (bez modulace) Chain Home, vlevo simulovaný a vpravo naměřený

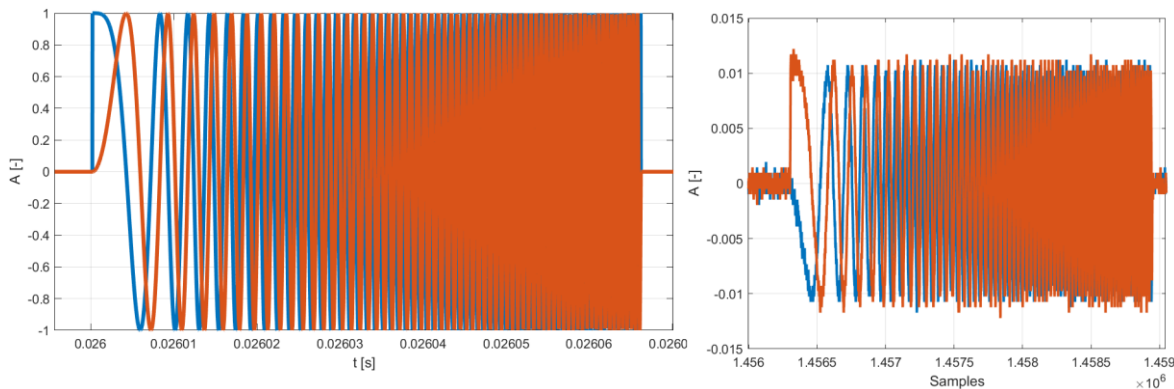


Obrázek 43 – Průběhy I/Q dat 1. pulzu (bez modulace) s přeladěním frekvence o 1 MHz

V obdélníkovém pulzu (viz. Obrázek 42) se po přeladěni (viz. Obrázek 43) objeví průběh harmonického signálu právě s kmitočtem 1 MHz, který odpovídá hodnotě, o kterou se měl signál přeladit. Pokud by bylo použito více frekvencí pro přeladování, bylo by na přijímači vidět více pulzů, přičemž harmonické průběhy uvnitř pulzu by měly odlišnou frekvenci. Je důležité volit vhodnou vzorkovací frekvenci s ohledem na použitý díl přeladěné frekvence, aby nedocházelo k aliasingu.

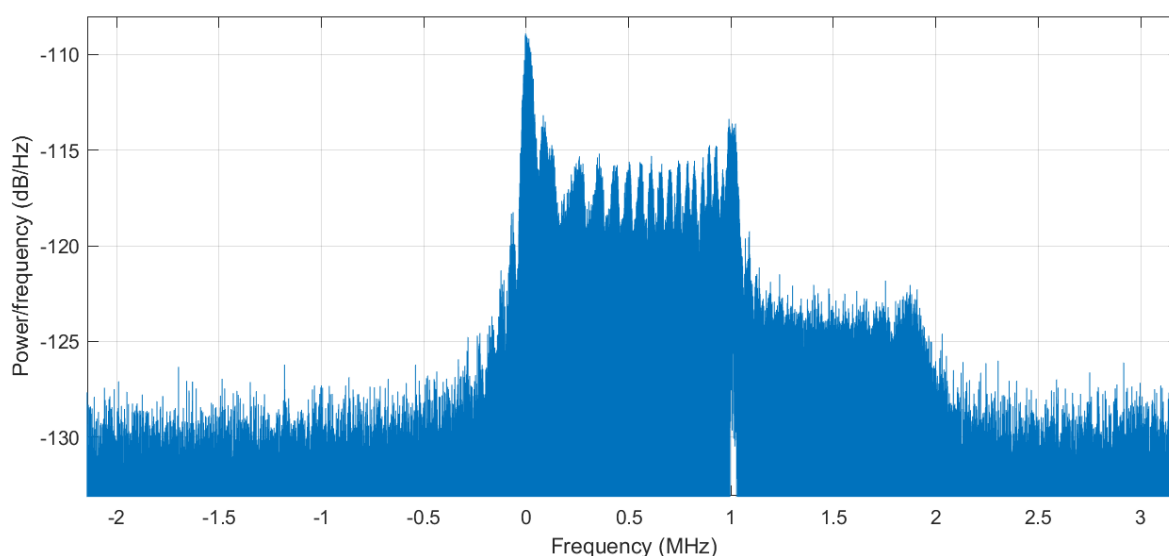


Obrázek 44 – Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) Chain Home, vlevo simulovaný a vpravo naměřený



Obrázek 45 – Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) s přeladěním frekvence o 1 MHz

Fáze druhého naměřeného pulzu (viz. Obrázek 44) s šířkou $6,6 \mu\text{s}$ a modulací LFM je vůči nasimulovanému pulzu otočena o 180° . Zvolená vzorkovací frekvence rovna 40 MHz je dostačující pro frekvenční zdvih 1 MHz , nicméně naměřené komplexní složky přijatého signálu jsou s čím dál větší frekvencí zatíženy chybnou detekcí, která ale nezabraňuje jednoznačnému určení, o jakou použitou modulaci se jedná. V naměřeném pulzu, jenž byl přeladěn o hodnotu 1 MHz (viz. Obrázek 45) je průběh frekvence značně hustší, jelikož se k původní hodnotě frekvenčního zdvihu přičetla konkrétní hodnota přeladěné frekvence a jejich součet činí 2 MHz . Aby nedocházelo k chybnému vzorkování vyšších frekvencí a tedy i chybné detekci signálu je nutné volit buď menší kroky pro přeladování, nebo vyšší vzorkovací frekvence, která je vzhledem k použitému hardwaru značně omezena.



Obrázek 46 – Spektrum naměřeného signálu radaru Chain Home

Spektrum celého naměřeného signálu (viz. Obrázek 46) se skládá ze dvou pásem použitých frekvencí s odlišnými úrovněmi. První pásmo odpovídá použitým frekvencím pro frekvenční zdvih modulovaného pulzu s LFM a hned za ním následuje pásmo s nižší úrovní, které patří přeladěným pulzům, jejichž průběh frekvence byl dvojnásobný s ohledem na použité parametry. Vyšší úroveň v pásmu od 0 do 1 MHz je způsobena příjmem dvou rámců bez přeladění a přítomností obdélníkového pulzu bez modulace, která měla průběh frekvence přes pulz použitým přeladováním.

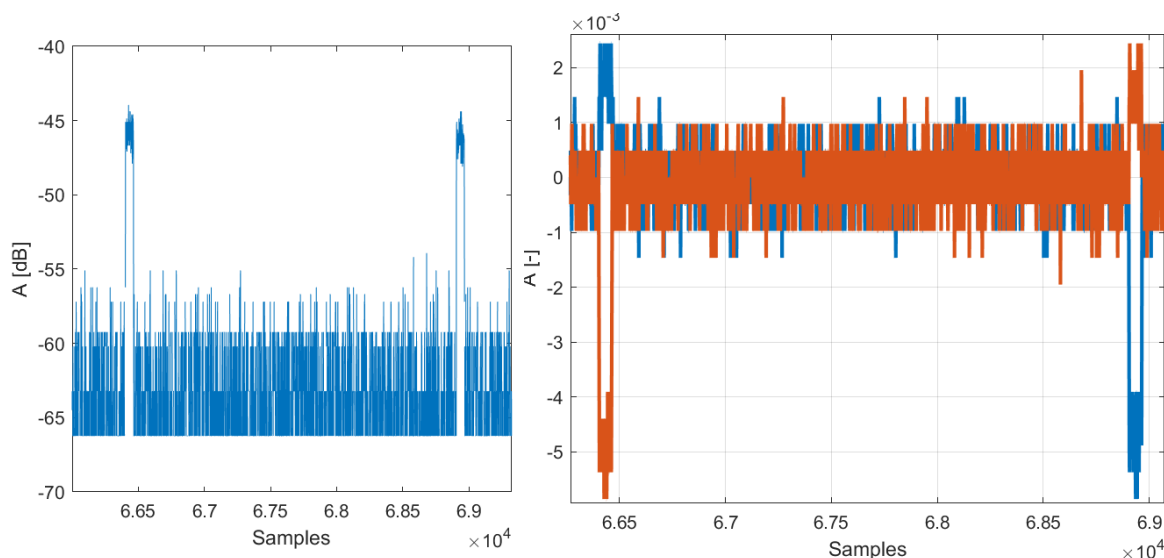
4.7 Sova

Pozemní radar SOVA byl projekt společnosti TESLA Pardubice, jenž měl v tehdejší době přinést spoustu nových inovací a funkcí oproti konkurenčním systémům. Mezi tato vylepšení patřilo například zvýšení odolnosti zařízení pomocí změn modulací, zavedení přeladování kmitočtu a zlepšením selektivity rádia. V roce 1933 nebyly nalezeny odborné kapacity k plnému řešení projektu a došlo pouze k rozpracování licenční dokumentace. Použité parametry plánovaného radiolokátoru SOVA pro praktické měření jsou uvedeny v Tabulce 9. [5]

Tabulka 9 - parametry radaru Sova [5]

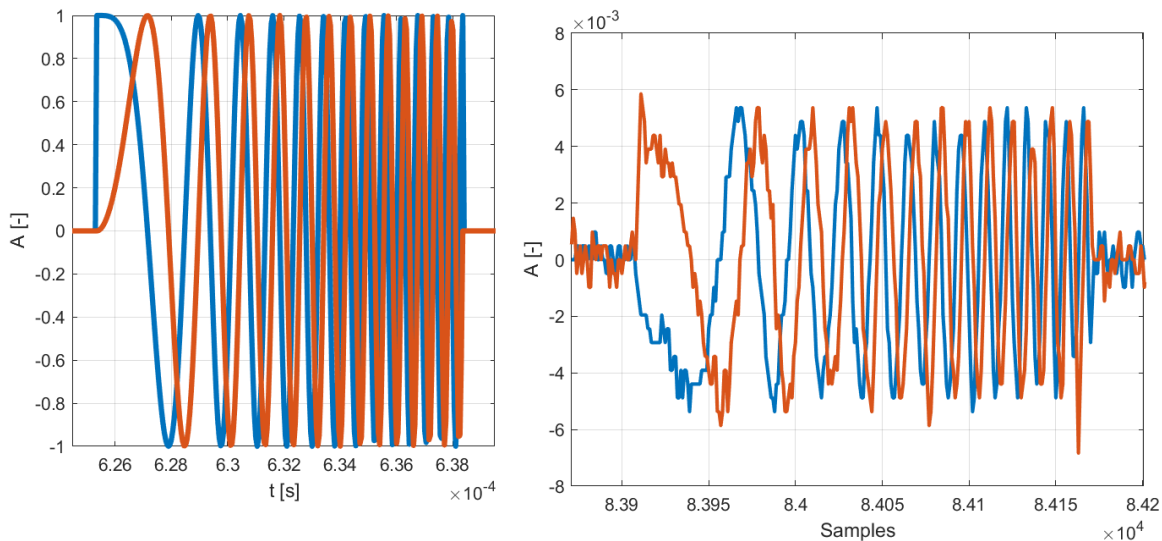
Parametry	Veřejně dostupné parametry		Simulované parametry	
	První pulz	Druhý pulz	První pulz	Druhý pulz
Šířka pulzu [μs]	0,3	1,3	0,3	1,3
PRF [Hz]	-	4000	8000	4000
Modulace	-	-	Žádná	LFM
Hodnota modulace	-	-	-	0,2 MHz
Typ modulace / kódu	-	-	-	Up-chirp
Počet pulzů v burstu	-	-	5	10
Vysílací frekvence	Pásmo X		3GHz / 6 GHz	

Šířky pulzů byly pro simulaci vysílání inspirovány plánovanými parametry v odborných materiálech. Frekvence vysílání pulzů byla pro první pulz zvýšena o dvojnásobek PRF druhého pulzu. S ohledem na běžně používané modulace nebyla pro první kratší pulz zvolena žádná modulace a pro druhý pulz modulace LFM s lineárně rostoucí frekvencí přes celý pulz s frekvenčním zdvihem 0,2 MHz. Vysílací frekvence musela být snížena nejprve na 6 GHz v prvním měření a následně na 3 GHz s ohledem na použitý hardware. Pro simulaci vysílání byly použity dvě zařízení Adalm-Pluto a UWB antény s rozestupem 1,5 až 2 metry. Zisk vysílače byl nastaven na hodnotu 0 a zisk přijímače na hodnotu 2.

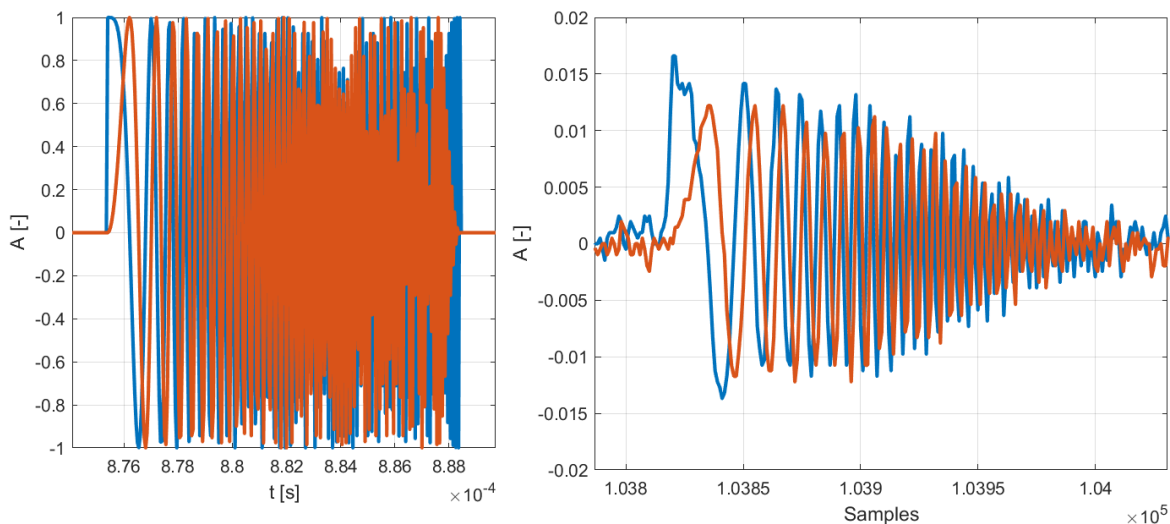


Obrázek 47 – Vlevo průběh absolutní hodnoty a vpravo průběh I/Q dat obdélníkového pulzu

Na obrázku 47 je znázorněn příjem dat s odlišnými fázemi přijatého komplexního signálu, přičemž ve výsledném průběhu absolutní hodnoty jsou všechny pulzy zobrazeny s vyšší úrovní oproti šumu. Tento jev může být způsoben neznámou nosnou frekvencí radaru.

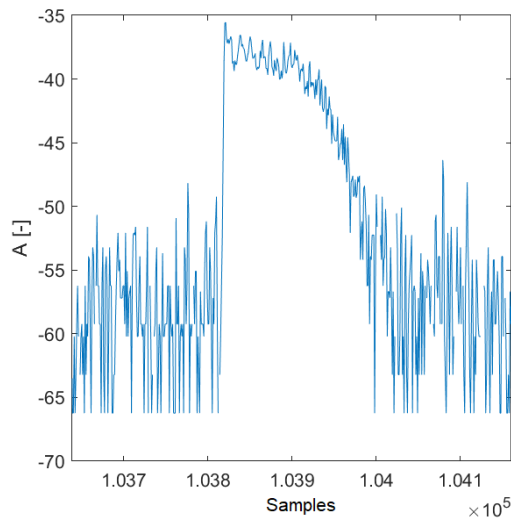


Obrázek 48 – Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) radaru SOVA s F_c 3 GHz, vlevo simulovaný a vpravo naměřený



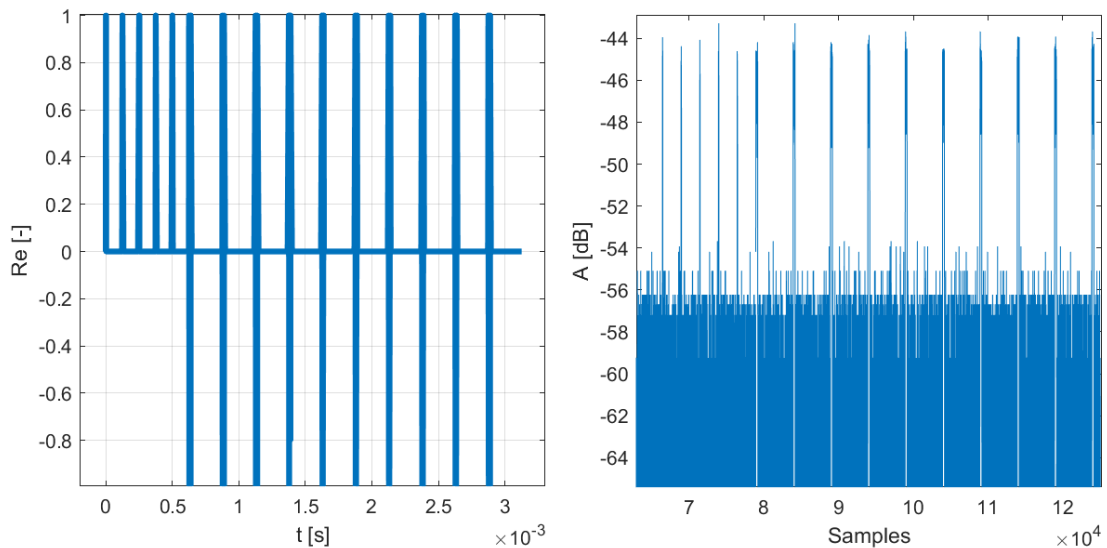
Obrázek 49 – Průběhy I/Q dat 2. pulzu (LFM) radaru SOVA s F_c 6 GHz, vlevo simulovaný a vpravo naměřený

S odlišnou vzdáleností mezi vysílací a přijímací anténou dochází ke změně útlumu přijatého signálu. Ze získaných poznatků je vhodné na vyšších frekvencích volit kratší vzdálenosti z důvodu menšího útlumu a zkrácení přijatého signálu. Pro konkrétní případ byla zvolena vzdálenost 1,5 metru mezi anténami. Na obrázku 48 jsou znázorněny pulzy s frekvenčním zdvihem 1 MHz a vysílací frekvencí 3 GHz. Stejný pulz (viz. Obrázek 49) byl změřen s vyšším frekvenčním zdvihem a amplituda komplexních složek přijatého pulzu byla s rostoucí frekvencí přes pulz tlumena.



Obrázek 50 – Tlumená obálka 2. naměřeného pulzu (LFM) radaru SOVA

Po zvolení frekvenčního zdvihu byl signál změřen na téměř nejvyšší operační frekvenci rádia 6 GHz. Absolutní hodnota naměřeného signálu byla přes pulz postupně tlumena. Přestože by zařízení mělo správně fungovat i s takto vysokou frekvencí, došlo k chybnému příjmu a bylo dokázáno, že systém nedokáže na těchto frekvencích spolehlivě pracovat.



Obrázek 51 – Ukázka časových průběhů simulované reálné složky a absolutní hodnoty naměřeného signálu v burstech

Jako názorná ukázka byly zvoleny větší počty pulzů v burstech. Krátkých pulzů je v burstu 5 a dlouhých pulzů v dalším burstu 10. Šířka přijatých vzorků musí být dostatečně velká, aby bylo možno správně zachytit celý signál a nedošlo k oříznutí jednoho nebo více pulzů. Na obrázku 52 je pro porovnání uveden nasimulovaný průběh celého signálu a průběh obálky přijatého signálu.

Závěr

Účelem bakalářské práce bylo seznámit se signály, užívaných v pulzních radarech a s obsluhou softwarově definovaného rádia Adalm-Pluto SDR v programovacím prostředí MATLAB a jeho limity. Na základě simulovatelných parametrů s ohledem na použitý hardware následoval vývoj simulačního programu pro simulaci vysílání radiolokátorů. Výstupem práce je simulační program a realizovaná praktická měření společně s jejich zhodnocením.

V teoretické části byl popsán úvod do radarové techniky včetně popisu jednotlivých druhů radiolokátorů dle principu jejich funkce a režimu činnosti vysílání. Dále je zde rozebrán princip pulzních radarů společně s popisem časových průběhů pulzních signálů a jejich podstatou v radiolokaci. V neposlední řadě je popsána komprese pulzu s rozбором vybraných vnitropulzních modulací, které se běžně používají v praxi. Mezi popsané vnitropulzní modulace patří LFM společně s NLFM a BPSK s využitím Barkerových kódů. Dále následoval popis softwarově definovaných rádií a některé projevy vysílání pulzních radiolokátorů, mezi které patří vysílání pulzů v burstech, vysílání krátkého a dlouhého pulzu a přeladování nosné frekvence. Zmíněné metody jsou simulovatelné a je možné s nimi pracovat v simulačním programu. Doplnkovým parametrem, který by se dal zařadit do simulovatelných parametrů v simulačním programu, může být střídání délky opakovací frekvence pulzů (stagger), přičemž z důvodu omezené paměti rádia byla upřednostněna funkce přeladování nosné frekvence. Vzhledem k použitému hardwaru nebylo možné nasimulovat otáčení svazku antény, agilní reakci na okolí.

Praktická část je věnována popisu použitého hardwaru a vývoji simulačního programu. Pro simulaci vysílání bylo použito softwarově definované rádio Adalm-Pluto, jež dovoluje použít vzorkovací frekvenci s maximální hodnotou 61,44 MSPS a vysílací frekvenci v rozsahu 325 MHz až 3,8 GHz s maximální šířkou pásma 20 MHz. Úpravou firmwaru je možné jednotlivé specifikace rádia ladit mimo původní hodnoty. Rozsah vysílací frekvence se může pohybovat v rozmezí 70 MHz až 6 GHz s šířkou pásma 56 MHz, nicméně během měření bylo zjištěno, že rádio nedokáže spolehlivě pracovat s takto upravenými specifikacemi. Kmitočtový rozsah použitého zařízení omezuje různorodost simulovatelných radiolokátorů na ty, které vysílají pásmech VHF až S. Pokud se průběh přijatého signálu lišil od nasimulovaných průběhů i přes vhodně zvolenou vzorkovací frekvenci a ostatní parametry, bylo potřeba přenastavit zisk vysílače a přijímače. Paměť rádia byla jedním z omezovacích faktorů při návrhu simulací a implementaci simulovatelných parametrů. Simulační program je schopen na základě šířky pulzu a frekvence vysílání pulzu sestavit pulzní signál, jehož jednotlivé pulzy mohou být modulovány, přeladovány a skládány do burstů. Mezi použitelné modulace patří LFM se čtyřmi možnými průběhy frekvence přes pulz, NLFM s průběhem frekvence podle tangens a BPSK (Barkerovy kódy). Algoritmus přeladování probíhá čtením konkrétních hodnot a jejich použitím při výpočtu I/Q dat uvnitř simulačního programu. V závěru práce byla popsána jednotlivá měření simulací vysílání konkrétních radiolokátorů. Uskutečněná měření byla prováděna ve vhodném prostředí z důvodu minimalizace rušivých vlivů a vícecestného šíření signálu v prostoru.

Literatura

- [1] BEZOUŠEK, Pavel a Pavel ŠEDIVÝ. *Radarová technika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3036-9.
- [2] ELDIS Pardubice, s.r.o. [online katalogový list]. *RL-2000 PRIMÁRNÍ PŘEHLEDOVÝ RADAR* [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.eldis.cz/radarove-systemy/rl-2000-primarni-prehledovy-radar/rl-2000-primarni-prehledovy-radar-pdf-en/>
- [3] Bosch Automotive Aftermarket [online katalogový list]. DAS 3000 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/equipment/adas_driver_assistance_system/das_3000/adas_das_3000_brochure_en_85287.pdf
- [4] Český hydrometeorologický ústav [online katalogový list]. *Radarová síť CZRAD*, 2010 - 2011 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/index.html
- [5] BEZOUŠEK, Pavel a Václav ŠPÁS. *Historie radiolokační techniky v Československu*. Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-807395-693-6.
- [6] ERA a.s. [online katalogový list]. VERA-NG. Pardubice, 2021 [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: <https://www.era.aero/cs/military-security/vera-ng>
- [7] *IEEE 521-2002 - IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002 [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: <https://standards.ieee.org/standard/521-2002.html>
- [8] RETIA, a.s. [online katalogový list]. ReTWis-CZ [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: <https://retwis.cz/>
- [9] WOLFF, Christian. *Radar Basics : Waves and Frequency Ranges* [online]. Radartutorial.eu [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/07.waves/Waves%20and%20Frequency%20Ranges.en.html>
- [10] WOLFF, Christian. *Radar Basics: Pulse Radar* [online]. Radartutorial.eu [cit. 2021-3-14]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Pulse%20Radar.en.html>
- [11] RICHARDS, Mark A. *Fundamentals of radar signal processing*. New York: McGraw-Hill, 2005. ISBN 00-714-4474-2.

- [12] *The Advantages and Disadvantages of PESA Radar vs. AESA Radar* [online]. RADA USA, 2019 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://radausa.com/blog/pesa-radar-vs-aesa-radar>
- [13] WOLFF, Christian. *Radar Basics: Range Resolution* [online]. Radartutorial.eu [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Range%20Resolution.en.html>
- [14] ŠEDIVÝ, Pavel. *Časový plán činnosti radaru, radarové signály a komprese impulsu* [online]. [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=150>
- [15] MICHAEL Q. KUISMA. *I/Q Data for Dummie* [online]. 2021 [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <http://whiteboard.ping.se/SDR/IQ>
- [16] *I/Q Data: Plain and Simple* [online]. National Instruments, 2020 [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/innovations/videos/07/i-q-data--plain-and-simple.html>
- [17] WOLFF, Christian. *Radar Basics: In-phase & Quadrature Procedure* [online]. Radartutorial.eu [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/10.processing/sp06.en.html>
- [18] WOLFF, Christian. *Radar Basics: Intrapulse Modulation and Pulse Compression* [online]. Radartutorial.eu [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Intrapulse%20Modulation.en.html>
- [19] WOLFF, Christian. *Radar Basics: Correlation* [online]. Radartutorial.eu [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/10.processing/sp54.en.html>
- [20] JEEVANMAI, Raghupatruni. *Sidelobe Reduction using Frequency Modulated Pulse Compression Techniques in Radar* [online]. Vol.(7). International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <http://www.ijltet.org/journal//147599079924.1098.pdf>
- [21] WOLFF, Christian. *Radar Basics: Long Range / Short Range* [online]. Radartutorial.eu [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Long-%20and%20Short-Range.en.html>
- [22] J. Akhtar and K. E. Olsen, "Frequency agility radar with overlapping pulses and sparse reconstruction," *2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)*, 2018, pp. 0061-0066, doi: 10.1109/RADAR.2018.8378531.

- [23] ATKINSON, D., R. STEWART, L. CROCKETT a K. BARLEE. *Software Defined Radio Using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*. University of Strathclyde: Strathclyde Academic Media, 2015. ISBN 978-0-9929787-1-6.
- [24] *ADALM-PLUTO* [online]. Analog Devices [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html#eb-overview>
- [25] *JCG401 GSM Antenna* [online]. Zhejiang JC Antenna Co. [cit. 2021-4-4]. Dostupné z: <https://www.jinchanggps.com/JCG401-GSM-Antenna-pd45551675.html>
- [26] *Ultra-wide directional UWB antenna 1.4—10.5GHz, 5W High gain antenna, nominal gain of 7dbi, for UWB positioning, GPS navigation, Wifi, 2.4G and 5.8GHz* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.amazon.co.uk/Ultra-wide-directional-1-4-10-5GHz-positioning-navigation/dp/B08BR4SH8S>
- [27] ADALM-PLUTO Radio Support from Communications Toolbox [online]. MathWorks [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/hardware-support/adalm-pluto-radio.html>
- [28] *P-18ML* [online]. LiTak-Tak [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.litaktak.com/product/radar-systems/P-18ML/>
- [29] WOLFF, Christian. *Radar Basics : P-18 “Spoon Rest D”* [online]. Radartutorial.eu [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/11.ancient/karte049.en.html>
- [30] *Quadrature Tracking* [online]. MathWorks [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/plutoradio/ug/quadrature-tracking.html>
- [31] WOLFF, Christian. *Radar Basics: Chain Home* [online]. Radartutorial.eu [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/11.ancient/karte012.en.html>

Přílohy

Zdrojový kód společně s textovými soubory použitých radiolokátorů a naměřenými hodnotami jsou k dispozici na přiloženém CD.