

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Popis, testy a zhodnocení 35GHz oblačného FMICW radaru typu PCDR-35
Jakub Čada

Diplomová práce
2020

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Čada**
Osobní číslo: **I17174**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Popis, testy a zhodnocení 35 GHz oblačného FMICW radaru typu PCDR-35**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Nastudujte a popište funkci FMICW oblačného radaru typu PCDR-35 Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd a to včetně software. Software se pokuste zdokonalit a udělejte ho uživatelsky přívětivým. Proveďte s tímto radarem základní laboratorní měření i měření oblačků a srážek popř. cvičných cílů (koutové odražeče). Možnosti a funkci radaru zhodnoťte. K radaru zhotovte manuál.

Rozsah grafických prací: **15**
Rozsah pracovní zprávy: **45-80**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

L. Rejtek: Pokročilé metody zpracování signálu z radaru PCDR-35, Dizertační práce FEI UPCE, 2015

M. Ptáčník: Rozbor možností meteorologického radaru PCDR-35 v pásmu 8 mm, Diplomová práce FEI UPCE, 2010

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.**
AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Jan Pídanič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2018

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 18. 5. 2020

Jakub Čada

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc, Ing. Karlu Pitašovi, Ing. Luboši Rejfkovi, Ph.D. za pomoc při tvorbě této práce, dále bych chtěl poděkovat Ing. Vadimu Závodnému, Ph.D. za pomoc s impedančním přizpůsobením a zařízením opravy impedančního transformátoru. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodičům a blízkým, kteří mne v průběhu studia vždy podporovali.

ANOTACE

V této práci byla provedena analýza, popis a zhodnocení funkce oblačného radaru PCDR-35 Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd České republiky. Proběhla analýza a zhodnocení možností zvýšení dosahu radaru. Pro zlepšení funkce radaru byl opraven impedanční transformátor ve firmě Eldis Pardubice s.r.o.. Po opravě transformátoru následně proběhlo měření a funkce transformátoru byla vyhodnocena.

KLÍČOVÁ SLOVA

radarová technika, FMCIW radar, PCDR – 35, meteorologický radar, impedanční přizpůsobení, dosah radaru

TITLE

Description, tests and evaluation of 35 GHz cloud FMCIW radar PCDR-35.

ANNOTATION

The analysis, description and evaluation of the PCDR-35 cloud radar of the Institute of Atmospheric Physics of the Czech Academy of Sciences was performed. Possibilities of increasing radar range was analyzed and evaluated. To improve the function of the radar the impedance transformer was repaired in company Eldis Pardubice Ltd., After the transformer was repaired, the measurement was performed and the function of the transformer was evaluated.

KEYWORDS

radar technology, FMCIW radar, PCDR - 35, meteorological radar, impedance matching, radar range

OBSAH

Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek	11
Seznam zkratk.....	12
Seznam symbolů.....	13
Úvod	15
1 Radar.....	16
1.1 Historie.....	16
1.2 Typy radarů.....	16
1.2.1 Kontinuální radary FMCW.....	17
1.2.2 Pulzní radary	18
1.2.3 Frekvenčně modulované radary s přerušovaným spojitým vysíláním.....	19
1.3 Radar PCDR – 35	20
2 Vývoj radaru PCDR-35.....	21
2.1 Radarová rovnice a koeficienty radarové odrazivosti.....	21
2.1.1 Faktory radarové odrazivosti	22
2.1.2 Radarová odrazivost oblak.....	25
2.1.3 Kompenzace frekvenční závislosti faktoru radarové odrazivosti	29
2.2 Metody modifikace, korekce signálu a jeho vyhodnocení	30
2.2.1 Metody rozboru radarového signálu	30
2.2.2 Metody modifikace a korekce signálu	31
2.3 Stav radaru	32
3 Popis radaru	34
3.1 Anténa.....	34
3.2 Impedanční transformátor.....	35
3.2.1 Impedanční přizpůsobení.....	36
3.3 Popis techniky radaru.....	39
3.3.1 Přijímací část.....	39
3.3.2 Vysílací část.....	40

3.3.3	Kmitočtová ústředna	40
3.3.4	Software radaru	41
4	Metody kalibrace	42
4.1	Hrubá kalibrace	42
4.2	Přesná kalibrace s definovaným cílem.....	43
5	Maximální dosah radaru.....	44
5.1	Minimální detekovatelný výkon	44
5.2	Přijatý výkon.....	44
5.2.1	Integrace.....	47
5.3	Dosah radaru	47
6	Měření radarem PCDR-35.....	49
6.1	První měření	50
6.2	Druhé měření	52
6.3	Závěry z měření	52
	Závěr	54
	Literatura	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Časový diagram FMCW radaru.....	17
Obrázek 2: Časový diagram pulzního radaru.....	19
Obrázek 3: Časový diagram FMICW radaru.....	19
Obrázek 4: Rozptyl elektromagnetického vlnění v atmosféře (normovaná zpětná odrazná plocha σ) pro železnou kouli. [9].....	24
Obrázek 5: Limitní hodnota osy y pro normovanou zpětnou odraznou plochu vodních kapek, jejichž tvar se aproximuje koulí.....	24
Obrázek 6: Reálná a imaginární část permitivity v závislosti na frekvenci při 30 °C [12] ..	26
Obrázek 7: Spektra oblačných kapek.....	28
Obrázek 8: Efektivní odrazná plocha.....	28
Obrázek 9: Faktor radarové odrazivosti pro 35 GHz [10]	29
Obrázek 10: Opravná funkce pro 35,4 GHz.....	30
Obrázek 11: Točna radaru PCDR-35	33
Obrázek 12: Anténa radaru PCDR-35.....	34
Obrázek 13: Impedanční transformátor	35
Obrázek 14: Sledování signálu v reálném čase.....	36
Obrázek 15 - Adaptér vlnovod na koaxiál. [15].....	37
Obrázek 16 - Nákres TRL kitu.....	38
Obrázek 17: Schéma radaru	39
Obrázek 18: Kmitočtová ústředna.....	40
Obrázek 19: Software pro ovládní radaru	41
Obrázek 20: Mapa radarové odrazivosti v dBZ (ČHMU, sloučená radarová informace z radarů Brdy a Skalka u Brna).....	42
Obrázek 21: Výhled z okna GFÚ - Směr Bohdalec.....	49
Obrázek 22: Výhled ve směru Český metrologický institut a umístění radaru při měření. ..	50
Obrázek 23: Odraz od čtyřech cílů.....	51
Obrázek 24: Mapa se čtyřmi cíli	51
Obrázek 25: Odraz od jednoho cíle.....	52
Obrázek 26: Mapa s jedním cílem	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Spektra oblačných kapek a jejich parametry dle [14].....	27
Tabulka 2: Vypočtené hodnoty z , Z a η	27
Tabulka 3: Přijatý výkon P_p [dBm]	46

SEZNAM ZKRATEK

CW	continuous wave
FMCW	frekvenci modulated continuous wave
FMICW	frekvenci modulated interrupted continuous wave
VCO	voltage-controlled oscilátor
DDS	direct digital synthesis
FT	fourier transformation
FFT	fast fourier transformation
DFT	discrete fourier transformation
ÚFA	Ústav fyziky atmosféry AVČRT
AVČR	Akademie věd České republiky
GFU	Geofyzikální ústav AVČR
PSD	power spectral density
DSD	drop size distribution
MMW	milimeter-wave
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
AWIPS	Advanced Weather Interactive Processing System
PCDR - 35	Portable Cloud Doppler Radar na frekvenci 35 GHz
NEXRAD	Next-Generation Radar
CZRAD	Czech Radar network
MAREW	The Microwave and Radio Electronics Week
EuMCE	The European Microwave Conference in Central Europe
Mna	Minimum norm algorithm
AR	Autoregressive
MA	Moving Average
ARMA	Autoregressive Moving Average
MUSIC	Multiple Signal Classification
TRL	Through – reflect – line
TRM	Through – reflect – match
SOLT	Short – open – load – thru
VNA	Vector Network Analyzer

SEZNAM SYMBOLŮ

h	délka pixelu
V	objem
$N(D)$	spektrum kapek v závislosti na průměru kapek
D	průměr dešťových nebo oblačných kapek
ΔF	modulační zdvih
Δf	rozdíl frekvencí
τ	zpoždění
T	perioda/ teplota
c	je rychlost šíření elektromagnetického vlnění
B	šířka pásma signálu
r	vzdálenost
R	intenzita deště
SNR	odstup signál/šum
$P_{P,V,přeslech}$	P - výkon, P_P – přijímaný, P_V – vysílaný, $P_{přeslech}$ – přeslechu
λ	vlnová délka
G	zisk antény radaru
σ	efektivní odrazová plocha cíle/ vodivost
K_r	radarová konstanta
η	radarová odrazivost
z_e, Z_e	ekvivalentní faktor radarové odrazivosti
z, Z	faktor radarové odrazivosti
θ	je vyzařovací úhel anténního svazku,
C_r	je meteorologický potenciál
K	parametr vody (kapky)
\hat{m}	komplexní index lomu dešťové kapky
$\hat{\epsilon}_r$	komplexní relativní permitivita dešťové kapky.
ϵ'	reálná část relativní permitivity
ϵ''	imaginární část relativní permitivity
ϵ_∞	relativní permitivity na vysokých frekvencích
ϵ_s	relativní permitivity na nízkých frekvencích

λ_s	kritický kmitočet (největší dielektrické ztráty)
C_3	kalibrační konstanta radaru PCDR – 35
X	opravná funkce
I	izolace (potlačení proniku vysílání do přijímače)
D_p	odstup signálu od přeslechu
F	šumové číslo přijímače
T_0	šumová teplota
k	Boltzmanova konstanta
N	šum
S_e	efektivní odrazná plocha
r_k	poloměr koule
a	délka strany (obdélníka, trojúhelníka)
k_v	pořadí vzorků
f_{vz}	vzorkovací frekvence
t	doba odpojení vysílače
V	viditelnost
LWC	Liquid water content (obsah kapalné vody)

ÚVOD

Dnešní radary jsou používány k detekci letadel, lodí, měření rychlosti automobilů a také měření vlastností atmosféry nebo oceánů. Principy radaru vedli k vývoji podobných technologií, například sonarů (SOund Navigation And Ranging), lidarů (LIght Detection And Ranging) a Sodarů (SOnic Detection And Ranging). Meteorologické radary zaznamenali velký pokrok ve vývoji za posledních padesát let. Jejich obrovský význam je v detekování a varování před silnými bouřkami, krupobitím nebo tornády. Tímto přináší zvýšení bezpečnosti a efektivity v letecké dopravě, také přispívají k ochraně životů a majetku varováním před povodněmi. Mají svůj význam i v plánování dovolených a jiných aktivit, které ovlivňují změny počasí. Radarová měření přispěla k lepšímu porozumění atmosféry a přesnějším předpovědím počasí.

V posledních letech byly vylepšeny krátkodobé předpovědi, a to díky spojení dat z několika systémů, například: AWIPS (Advanced Weather Interactive Processing System), jež umožňuje přístup z jedné stanice k datům ze sítě NEXRAD, satelitním snímkům, počítačem i člověkem vytvořeným předpovědím a varováním. [1]

V České republice je využívána radarová síť CZRAD Českého Hydrometeorologického Ústavu, která se skládá z dvou impulzních radarů pracujících ve frekvenčním pásmu C (4 až 8 GHz, toto pásmo je využíváno pro meteorologii v Evropě), jejichž stanovišti jsou Skalky u Protivanova a Brdy – kopec „Praha.“

Tato diplomová práce se zabývá základním popisem, analýzou a testováním radaru PCDR – 35 Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd České republiky pracujícím v pásmu 35GHz, které je určené pro meteorologické radary. Radar je navržen k detekci oblaků, dešťových srážek a zkoumání jejich vlastností.

V práci byla provedena analýza dosahu radaru, popis metod rozboru a zpracování signálů z radaru, metody kalibrace radaru nebo rozbor radarové rovnice, koeficientů radarové odrazivosti a radarové odrazivosti oblak. Dále také zhodnocení maximálního dosahu radaru. Oprava imedančního transformátoru a následné měření.

1 RADAR

1.1 Historie

V roce 1864 James Clark Maxwell předpověděl existenci radiových vln a ve své teorii o elektromagnetismu popsal, že tyto vlny se ve vakuu šíří rychlostí 300 tisíc kilometrů za hodinu. Heinrich Rudolf Hertz potvrdil ve svém experimentu mezi lety 1886 až 1887, že elektromagnetické vlny se šíří stejnou rychlostí a mají podobné vlastnosti jako světlo, odrážejí se od vodivých a nevodivých materiálů, vykazují refrakci, difrakci, rušení a polarizaci.

Prvním skutečným radarem bylo zařízení patentované jako „Telemobiscope“ v roce 1904 německým inženýrem Christianem Hülsmeierem. Dalšího rozmachu se radarová technologie dočkala v období druhé světové války, vývoj probíhal nezávisle v zemích jako jsou Spojené Státy Americké, Velká Británie či Německo, ale i v dalších zemích. Radary byly využívány převážně k detekci nepřátelských letadel nebo lodí. Vývoj začínající u kontinuálních (CW) radarů v pásmu stovek MHz, určujících pouze přítomnost objektu, přes pulzní radary umístěné na pobřežích s výkony stovek kilowatů umožňující určování polohy a vzdálenosti, avšak vývoj zahrnoval i palubní radary určené pro detekci jiných letadel. Dalším krokem byla orientace na zmenšování vlnové délky, tedy zvyšování frekvence. V roce 1940 sir John Randall a Harry Boot z Birminghamské Univerzity, otestovali svůj přelomový vynález: „Cavity Magnetron,“ tedy zdroj mikrovlnného záření. U prvního prototypu byla vypočítána frekvence kolem 3GHz (odpovídá vlnové délce 10 centimetrů). V období války byly použity různé kódové označení pro vyvíjené systémy detekce pomocí radiových vln jako je britský RDF tedy *Radio Direction Finding* nebo americký systém *Radio Detection And Ranging*, z kterého vznikla zkratka RADAR. Dnes se radarová technologie používá od monitorování povrchu planet, přes meteorologii, určování rychlosti vozidel, řízení letového provozu až po mikrovlnné trouby (použití magnetronu). [2]

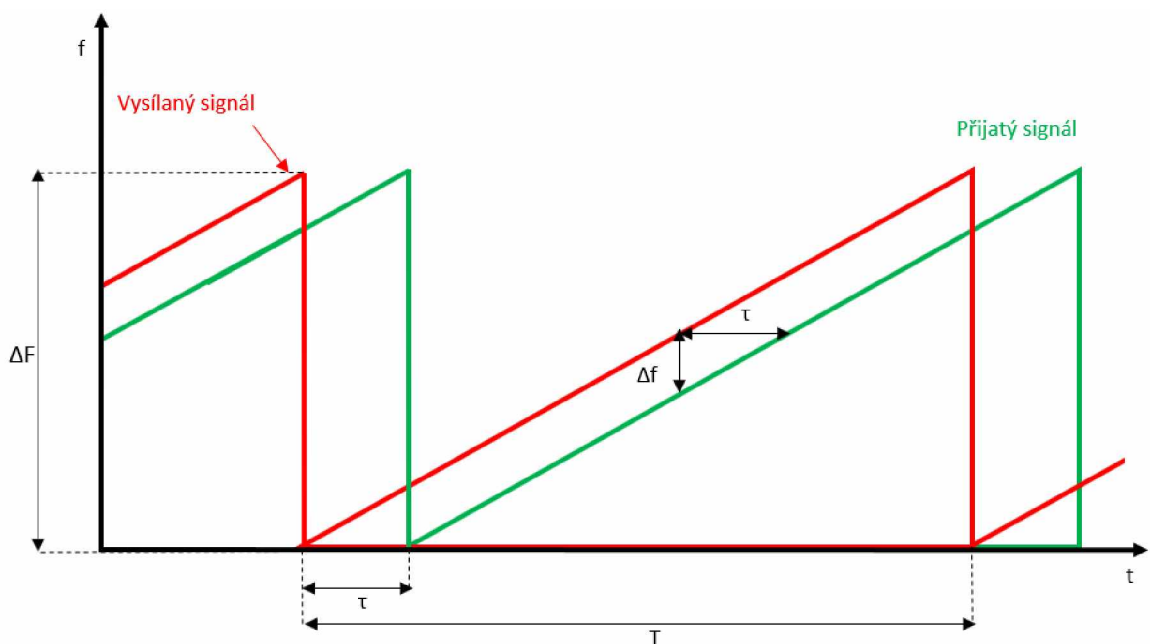
1.2 Typy radarů

Radar je tedy zařízení používané k určení směru, vzdálenosti či rychlosti objektů pomocí elektromagnetického záření. Existují dvě hlavní skupiny radarů: primární (určení polohy nebo rychlosti bez součinnosti sledovaného objektu) a sekundární (sledovaný cíl musí aktivně spolupracovat s radarem). Nás budou zajímat radary primární, ty mohou být bistatické (antény přijímače a vysílače jsou odděleny a mohou se nacházet na různých místech) či monostatické

(používají často pouze jednu anténu pro vysílač i přijímač), další rozdělení je na kontinuální, pulzní a jejich kombinace. Kontinuální radary lze provozovat s nemodulovaným (dopplerovské kontinuální radary) nebo modulovaným signálem (FM CW). [2], [3]

1.2.1 Kontinuální radary FMCW

Dopplerovské kontinuální radary s nemodulovaným signálem vysílají signál s konstantní frekvencí, v důsledku toho mohou tyto radary určovat pouze relativní (v poměru k radaru) rychlost objektu přes Dopplerův posuv. Dopplerovské radary měří pouze radiální složku vektoru rychlosti cíle, není jim tedy možné detekovat vzdálenost cíle. Naproti tomu frekvenčně modulovaný kontinuální radar FMCW, jak již název napovídá, používá pro získání informace o vzdálenosti frekvenční modulaci. S pomocí frekvenční modulace je pak možné měřit zpoždění přijatého odraženého signálu od cíle. V radaru je použit napětově řízený oscilátor (VCO) nebo obvod pro digitální syntézu (DDS) generující ideálně lineární modulaci. FMCW radary mohou mít jednu anténu společnou pro vysílání i přijímání, u těchto radarů je přijatý signál směřován se signálem vysílaným, který projde přes cirkulátor do přijímače. Nebo mohou mít antény dvě, zde je přijímaný signál směřován se signálem z vysílací části. [2], [3], [4]



Obrázek 1: Časový diagram FMCW radaru

Signál v radarech FMCW je frekvenčně modulován, pro různé účely měření lze použít několik modulačních vzorů (pilový, trojúhelníkový, sinusový). Na obrázku 1 je lineární pilový průběh, na kterém je vysvětlen princip určení vzdálenosti z rozdílu frekvence přijatého a vysílaného signálu. Tomuto rozdílu se říká taktovací frekvence. Pokud známe strmost vysílaného signálu, pak lze z rozdílu kmitočtů určit zpoždění a vypočítat vzdálenost cíle R. Určení vzdálenosti je založeno na tzv. podobnosti trojúhelníka.

Dva trojúhelníky jsou podobné, shodují-li se poměry odpovídajících si stran:

$$\frac{\Delta F}{T} = \frac{\Delta f}{\tau}, \quad (1.1)$$

kde ΔF je modulační zdvih, Δf je rozdíl frekvence přijatého a vysílaného signálu, T je modulační perioda a τ je zpoždění mezi přijatým a vysílaným signálem.

Pokud tedy známe šířku pásma, rozdíl frekvencí a modulační periodu, můžeme určit zpoždění τ :

$$\tau = \frac{\Delta f \cdot T}{\Delta F}, \quad (1.2)$$

zpoždění signálu τ je také odpovídá dvojnásobku vzdálenosti, kterou signál urazí od radaru k cíli a zase zpět, vydělené rychlostí světla:

$$\tau = \frac{2 \cdot r}{c}, \quad (1.3)$$

dosazením vzorce (1.2) do vzorce (1.3) dostáváme výraz pro výpočet vzdálenosti cíle r :

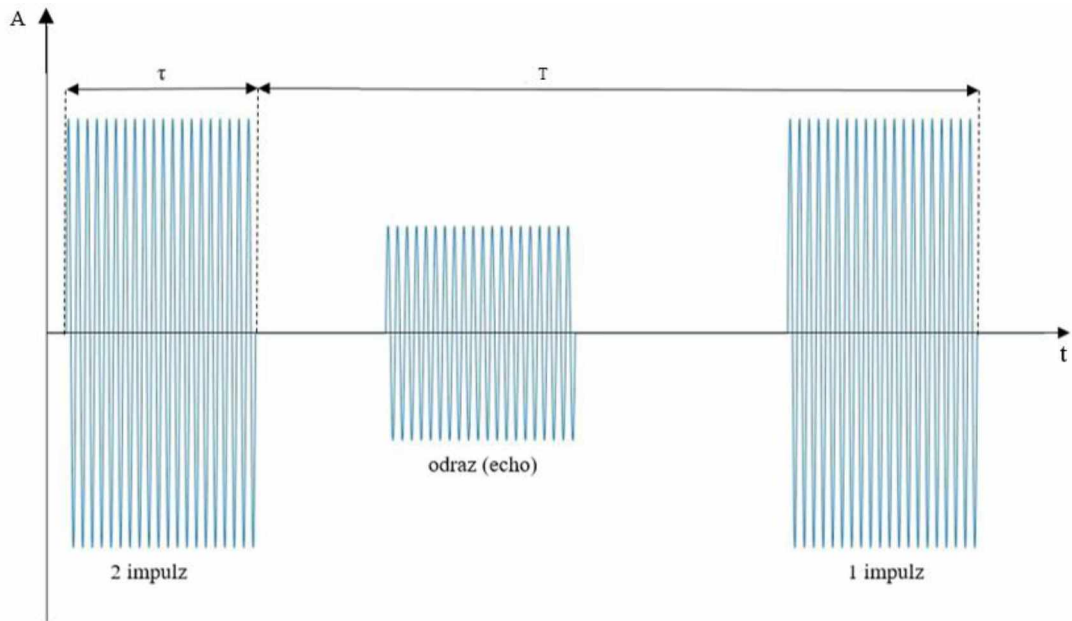
$$r = \frac{\Delta f \cdot c \cdot T}{2 \cdot \Delta F}, \quad (1.4)$$

kde c je rychlost šíření elektromagnetického vlnění.

1.2.2 Pulzní radary

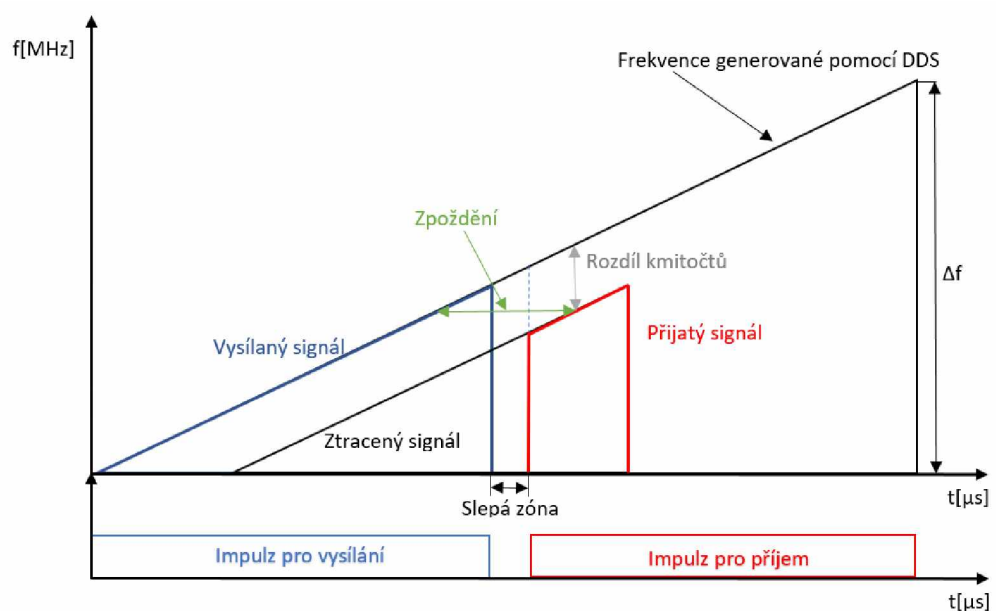
Pulzní radary využívají pro měření vzdálenosti sledovaného cíle, měření zpoždění mezi vysílaným a přijatým signálem (odraženým od cíle). Jedna anténa je střídavě připojována k přijímači a vysílači. Radar vyše velmi krátký pulz s konstantní frekvencí a relativně velkým výkonem, po odvysílání tohoto pulzu je aktivován přijímač a anténa přijímá případný odražený signál. Z důvodů ochrany přijímače před velkým výkonem bývá na jeho vstupu připojen zeslabovač, ten omezuje přijatý signál v závislosti na době ukončení vysílání. Po uplynutí doby určené pro příjem je vysílán další impulz, z rozdílu časů vyslaného a přijatého signálu se vypočítá vzdálenost cíle. Na obrázku 2 lze vidět princip vysílání a příjmu pulzů. Perioda T (doba mezi pulzy) určuje efektivní dosah radaru. Aby bylo možné určit vzdálenost jednoznačně,

musí odražený signál dorazit dříve, než je odvysílán další impuls. Abychom zajistili jednoznačnost, pulzy mohou být modulovány pseudonáhodným kódem, a lze tedy rozlišit, který pulz jsme přijali. [2], [3], [4]



Obrázek 2: Časový diagram pulzního radaru

1.2.3 Frekvenčně modulované radary s přerušovaným spojitým vysíláním



Obrázek 3: Časový diagram FMICW radaru

Tento typ radarů je kombinací výše zmíněného radaru FMCW a radaru pulzního. Určovat vzdálenost cíle lze tedy pomocí rozdílu času mezi vyslaným a přijatým signálem jako u radaru pulzního nebo přes výpočet spektra a následné převedení frekvence na vzdálenost jako u radarů FMCW. Radar FMICW vysílá delší pulzy, než je tomu u pulzního radaru, proto je možné vysílat menším výkonem. Na obrázku 3 je zobrazena funkce FMICW radaru. Modře je znázorněn vysílaný signál a červeně poté přijatý odražený signál od cíle. Odražený signál nemusí být přijat celý, část signálu je ztracena v důsledku nepřipravenosti přijímače. [5], [6]

1.3 Radar PCDR – 35

Příkladem FMICW radaru je i oblačný radar PCDR-35, tento radar byl původně navržen jako radar FMCW, který k radiolokaci používal rozdíl v modulační frekvenci Δf mezi přijatým a vyslaným signálem. Při vyhodnocování funkce radaru bylo překvapivě zjištěno, že FMCW radar s jednou anténou je vhodný pouze pro velmi malé vysílací výkony v řádech mW a to z důvodů nízkého izolačního útlumu cirkulátoru (nereciproký troj-bran, který propouští signál od antény k přijímači a od vysílače k anténě), tento útlum mezi vstupem pro vysílač a přijímač dosahuje hodnoty kolem 30 dB. To způsobuje průchod signálu z vysílače do přijímače a zašumění přijímaného signálu (a v důsledku poté saturaci přijímače), proto není možný kontinuální režim a radar se musel dodatečně předělat a provozovat jako FMICW. To znamená, že radar k radiolokaci stále používá rozdíl frekvencí k určení polohy, již však nevysílá nepřetržitě, toto bylo vysvětleno již dříve. Z toho však plynou určité problémy. Původně byla odhadovaná minimální vzdálenost detekovatelného cíle určena na cca 250 metrů, avšak reálná slepá zóna se pohybuje kolem 450 metrů. To z důvodů odpojení vysílače i přijímače potřebného k ochraně přijímače (1,5 μ s cca 225 metrů) v kombinaci s FFT, která potřebuje minimálně 15 vzorků pro výpočet spektra. [5], [7]

Dalším problémem vyplývajícím z principu FMICW radaru je ztráta jistého intervalu frekvence odraženého signálu. To má za následek změnu v přijatém výkonu a následné špatné odhadnutí odrazné plochy, tedy nesprávné určení typu cíle (oblaka, déšť, kroupy). Tento jev je způsoben rozdílem reálné délky signálu odraženého od cíle a délky signálu, kterou radar přijme. Pokud tedy potřebujeme určit Dopplerův posuv, je nutné použít dvojrozměrnou spektrální analýzu, aby bylo možné provést korekci výkonu přijatého signálu. [8] Pro určení vzdálenosti objektu lze použít pouze jednorozměrné spektrální analýzy. [7]

2 VÝVOJ RADARU PCDR-35

O přidělení prostředků na meteorologický, respektive oblačný radar vznikl požadavek v souladu s výzkumným záměrem ÚFA AVČR AV0Z30420517 „Studium atmosférického obalu Země v interakci s pozemskými a kosmickými vlivy.“ Záměrem bylo vytvoření radaru k detekci oblaků, v souvislosti s tím byl zvolen kmitočet 35,4 GHz tak, aby bylo možné detekovat cíle složené z oblačných kapek. Zakázku na zhotovení radaru získala Německá firma LISTAR GmbH. Tato firma se však dostala do konkurzního řízení, a tak nedodala radar provozuschopný. Dokončení radaru proto probíhalo v České republice na ÚFA ve spolupráci s firmou B plus TV a.s. z Klimkovic, velkým přínosem byla účast mnoha odborníků z oblasti radarové techniky například: prof. Ing. Pavel Bezoušek, CSc., Ing. Vítězslav Krčmář Ph.D., Ing. Petr Svoboda, CSc, pan Jaroslav Zatočil, Ing. Vladimír Brázda, Ph.D. a mnoha dalších. Organizaci a interpretaci dat měl na starosti doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc., který je vedoucí této diplomové práce, byl také vedoucím diplomové práce Ing. Milana Ptáčnick, disertační práce Ing. Luboše Rejčka, Ph.D. a spolupracoval s Ing. Karlem Pitašem na článcích pro MAREW a EuMCE. Tyto články a práce se také zabývaly radarem PCDR – 35 a proto budou v následujících řádcích stručně popsány.

2.1 Radarová rovnice a koeficienty radarové odrazivosti

Prvním popisem radaru se zabýval Milan Ptáčnick ve své diplomové práci „Rozbor možností meteorologického radaru PCDR-35 v pásmu 8 mm“ v roce 2010. [9] V práci byly odvozeny vztahy mezi meteorologickými parametry popisující cíl a parametry měřenými radarem. Především je práce zaměřena na faktor radarové odrazivosti v jednotkách dBZ (decibel v závislosti na faktoru radarové odrazivosti Z), které se běžně používají v meteorologii.

Jelikož má monostatický radar pouze jednu anténu, platí $r_1=r_2=r$ a $G_1=G_2=G$, toto přináší zjednodušení při výpočtech. Radarová rovnice pro monostatický radar pro bodový cíl má poté tvar:

$$P_P = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_V}{(4 \cdot \pi)^3} \cdot \frac{\sigma}{r^4} = C_1 \cdot \frac{\sigma}{r^4} [W], \quad (2.1)$$

kde P_P je přijímaný výkon, λ je vlnová délka, G je zisk antény radaru, P_V je vysílaný výkon, σ je efektivní odrazová plocha cíle, r je vzdálenost cíle a C_1 je radarová konstanta, která má pro radar PCDR – 35 hodnotu 145,587 [W·m²]. [9]

Jelikož radar měří radarovou odrazivost objemového cíle (dešťových kapek, oblačných kapiček), platí:

$$\eta = \frac{\sum \sigma(D)}{V} [mm^2/m^3], \quad (2.2)$$

kde $\sum \sigma(D)$ je součet efektivních odrazných ploch jednotlivých kapek a V je radarový objem (pixel).

Radarovou odrazivost lze také vyjádřit pomocí integrálu, pokud známe rozložení velikosti kapek (DSD):

$$\eta = \int_0^7 \sigma(D) \cdot N(D) \cdot dD [mm^2/m^3], \quad (2.3)$$

kde $N(D) \cdot dD$ je spektrum dešťových kapek, tedy počet kapek o velikostech mezi D a $D + dD$ v jednotce objemu, D průměr dešťových nebo oblačných kapek, V je objem pixelu radaru.

Radarová rovnice v meteorologii má tedy tvar:

$$P_P = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_V \cdot \theta^2 \cdot h}{2^9 \cdot \pi^2 \cdot \ln 2} \cdot \frac{\eta}{r^2} = C_2 \cdot \frac{\eta}{r^2} [W], \quad (2.4)$$

kde P_P je přijímaný výkon, λ je vlnová délka, G je zisk antény radaru, $\frac{1}{2 \cdot \ln 2} \doteq 0,72$ je integrační faktor pro antény s Gaussovským rozložením výkonu svazku, θ je vyzářovací úhel anténního svazku, P_V je vysílaný výkon, η je radarová odrazivost, r je vzdálenost cíle, $h = \frac{r \cdot c}{2}$ je délka pixelu v případě pulzního radaru a C_2 je meteorologický potenciál, který má pro radar PCDR – 35 hodnotu $52,281 \cdot 10^{12} [W \cdot m^3]$. Detailní odvození radarové rovnice v meteorologii lze najít v [9].

2.1.1 Faktory radarové odrazivosti

Jak již bylo řečeno radar měří radarovou odrazivost η , v meteorologii je ovšem zvykem používání faktoru radarové odrazivosti Z v jednotkách [dBZ], ten je však nutné softwarově vypočítat. Ekvivalentní faktor radarové odrazivosti se zavádí, aby se snížil vliv vlnové délky λ na výsledek, vzorec pro výpočet:

$$z_e = \frac{\lambda^4 \cdot \eta}{\pi^5 \cdot |\tilde{K}|^2} [mm^6/m^3], \quad (2.5)$$

logaritmováním (2.5) a násobením deseti dostaneme výraz v jednotkách dBZ:

$$Z_e = 10 \cdot \log_{10}(z_e) [dBZ], \quad (2.6)$$

kde η je radarová odrazivost, λ/mm je vlnová délka, \tilde{K} je konstanta závislosti odrazu na indexu lomu dešťové kapky.

Parametr \widehat{K} vody (kapky) je daný výrazem:

$$K = \left| \frac{\widehat{m}^2 - 1}{\widehat{m}^2 + 2} \right| = \left| \frac{\widehat{\varepsilon}_r - 1}{\widehat{\varepsilon}_r + 2} \right| [-], \quad (2.7)$$

kde \widehat{m} je komplexní index lomu dešťové kapky a $\widehat{\varepsilon}_r$ je komplexní relativní permitivita dešťové kapky.

Dosazením výrazu pro radarovou odrazivost η (2.3), do výrazu pro ekvivalentní faktor radarové odrazivosti z_e (2.5) a s využitím aproximace pro Rayleighovu oblast:

$$\sigma(D) = \frac{\pi^5 \cdot |\widehat{K}|^2}{\lambda^4} D^6 [m^2], \quad (2.8)$$

Dostáváme výraz pro tzv. faktor radarové odrazivosti z (malé z):

$$z = \int_0^7 D^6 \cdot N(D) \cdot dD \left[mm^6 / m^3 \right], \quad (2.9)$$

Tato rovnice je i definicí faktoru radarové odrazivosti. Logaritmováním opět dostaneme výraz v jednotkách [dBZ], tuto veličinu jsou meteorologové zvyklí používat (velké Z):

$$Z = 10 \cdot \log_{10}(z) [dBZ], \quad (2.10)$$

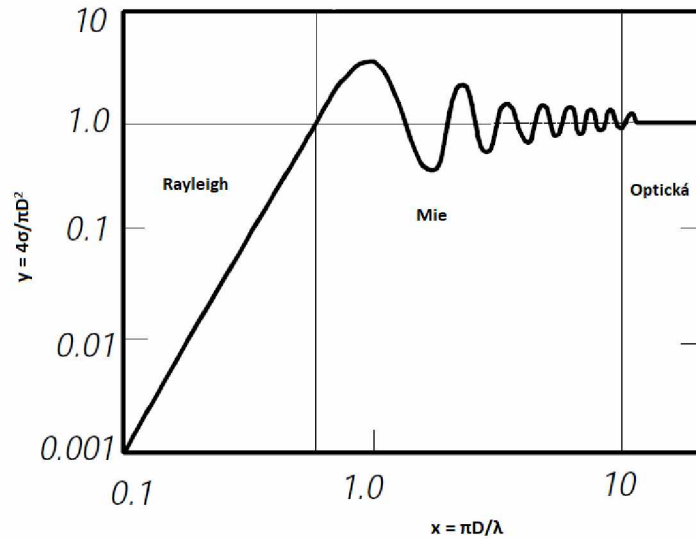
kde $N(D)$ je spektrum oblačných kapiček a D je průměr oblačné kapičky.

Situace je ovšem taková, že radar sám o sobě měří pouze radarovou odrazivost η (2.3). Pak se z rovnice (2.5) se dopočítá ekvivalentní faktor radarové odrazivosti, který se „pouze“ blíží hledanému faktoru radarové odrazivosti, jenž je definován rovnicí (2.9) a nelze je přímo měřit. Detailní rozbor byl proveden v diplomové práci Ing. Marie Kovalchuk [10].

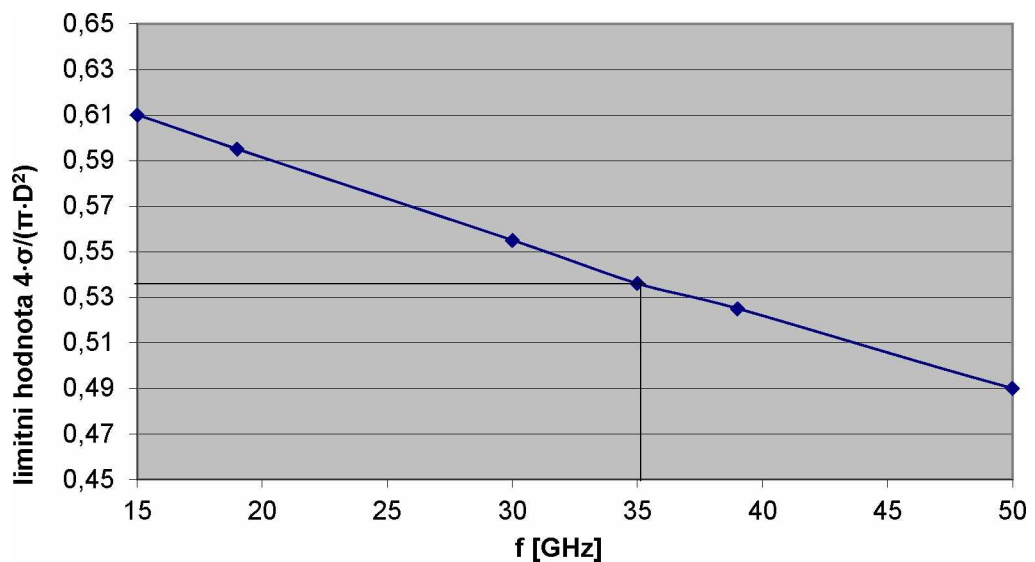
Oblačné kapičky a dešťové kapky se od sebe liší svými spektry. Velikosti spekter jsou závislé na oblasti, ve které se vyskytují. Tyto oblasti jsou zobrazeny na obrázku 4. Zjednodušený výraz pro faktor radarové odrazivosti nebo pro ekvivalentní faktor radarové odrazivosti (jinými slovy $Z \sim Z_e$) platí pouze pro tzv. Rayleighovu oblast, v níž se však v případě kmitočtu radaru 35,4 GHz vyskytují oblačné kapičky (průměr 2 – 70 μ m). Pro velikostní faktor x v Rayleighově oblasti platí:

$$x = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \ll 1. \quad (2.11)$$

Dešťové kapky (0,2 – 7 mm) se vyskytují v oblasti Mie, viz. [5], [9]. Na obrázku 4 jsou na osách pro ilustraci zobrazeny hodnoty rozptylu (normovaná zpětná odrazová plocha σ) elektromagnetického vlnění pro železnou kouli! Pro vodní kapky hodnoty závisí na kmitočtu a pro radar PCDR – 35 pracující na kmitočtu 35,4 GHz, nebude limitní hodnota na ose y rovna jedné, ale je rovna přibližně 0,536 jak je možné vidět na obrázku 5.



Obrázek 4: Rozptyl elektromagnetického vlnění v atmosféře (normovaná zpětná odrazná plocha σ) pro železnou kouli. [9]



Obrázek 5: Limitní hodnota osy y pro normovanou zpětnou odraznou plochu vodních kapek, jejichž tvar se aproximuje koulí.

Za účelem odhadnutí radarové konstanty naladěné na vzdálenost v kilometrech a přijímaný výkon v miliwattech, byly všechny konstanty sjednoceny do konstanty C_3 :

$$z_e = C_3 \cdot P_P \cdot r^2. \quad (2.12)$$

Pro praktické účely je lepší používat výraz v logaritmické formě:

$$Z_e = 10 \cdot \log(C_3) + 20 \cdot \log(r[\text{km}]) + 10 \cdot \log(P_p[\text{mW}]), \quad (2.13)$$

kde C_3 dle [11] má hodnotu:

$$C_3 = \frac{\lambda^4}{\pi^5 \cdot K^2 \cdot C_2} = 2,62 \cdot 10^8 [-], \quad (2.14)$$

kde C_2 je meteorologický potenciál, viz rovnice (2.4).

Pro ekvivalentní faktor radarová odrazivost pro radar PCDR-35 vychází:

$$Z_e = 84,2 + P_p[\text{dBm}] + 20 \cdot \log(r[\text{km}]). \quad (2.15)$$

Intenzita deště odpovídající změřenému faktoru radarové odrazivosti se nejčastěji odhaduje podle Marshall – Palmerova vztahu ($z = 300 \cdot R^{1,5}$) nebo modifikované formy pro síť NEXRAD:

$$R = \left(\frac{z_e}{200}\right)^{0,625}, \quad (2.16)$$

kde R je intenzita deště v [mm/h]. [11]

2.1.2 Radarová odrazivost oblak

Pro názornost jsem z poznatků z předchozí kapitoly vytvořil v programu Matlab skript na výpočet radarové odrazivosti, efektivní odrazné plochy a spektra oblačných kapek. Nejprve je nutné vypočítat index lomu dielektrického média (vody), respektive zjistit komplexní permitivitu vody pro kmitočet 35,4 GHz. Index lomu souvisí s permitivitou dle rovnice:

$$m = \sqrt{\hat{\epsilon}_r}. \quad (2.17)$$

Komplexní relativní permitivita je složena z reálné a imaginární části:

$$\hat{\epsilon}_r = \epsilon' + j\epsilon''. \quad (2.18)$$

Permitivita vody je závislá na kmitočtu. Reálná a imaginární část je dle [12] vypočtena podle Debyeho modelu, kde je reálná část permitivity:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \cdot \left[1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \sin\frac{\alpha\pi}{2}\right]}{1 + 2 \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \cdot \sin\frac{\alpha\pi}{2} + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{2 \cdot (1-\alpha)}}, \quad (2.19)$$

a imaginární část permitivity:

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \sin\frac{\alpha\pi}{2}}{1 + 2 \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{1-\alpha} \cdot \sin\frac{\alpha\pi}{2} + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^{2 \cdot (1-\alpha)}} + \frac{\sigma \cdot \lambda}{18.8496 \cdot 10^{10}}, \quad (2.20)$$

s použitím vodivosti $\sigma = 12,5664 \cdot 10^8 \text{ 1/m}$, parametru rozptření $\alpha(T)$ a kritické vlnové délky $\lambda_s(T)$. Některé parametry, které jsou zde použity jsou částečně závislé na teplotě, jako parametr rozptření se uvádí:

$$\alpha(T) = -\frac{16,8129}{T+273} + 0,0609265. \quad (2.21)$$

Relativní permitivita pro vysoké kmitočty (optická permitivita):

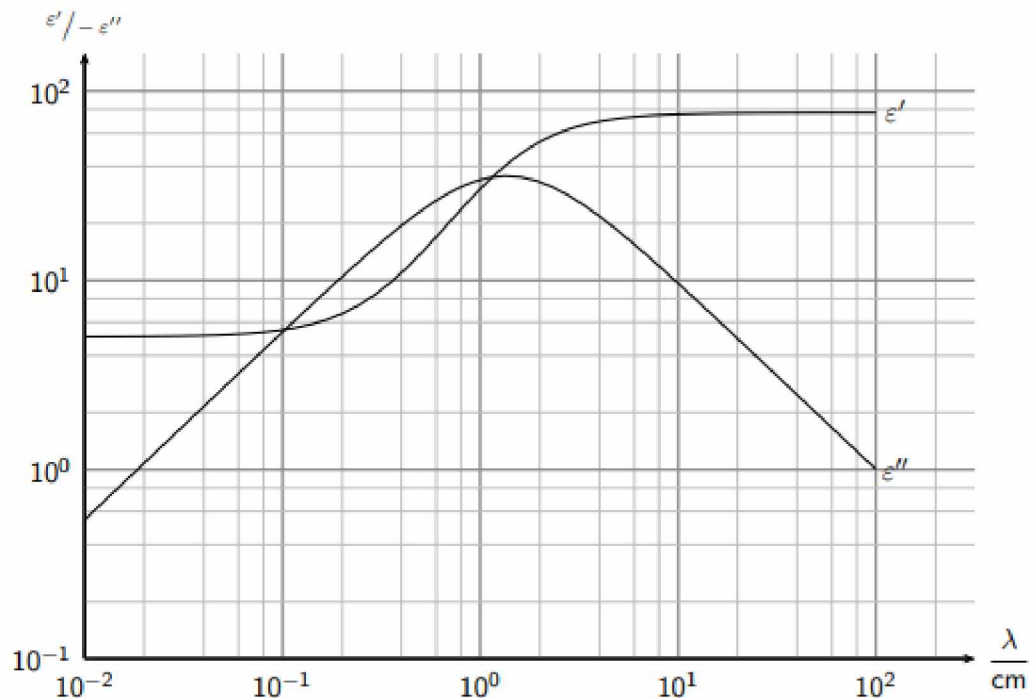
$$\varepsilon_\infty(T) = 5,27137 + 0,0216474 \cdot T - 0,00131198 \cdot T^2. \quad (2.22)$$

Relativní permitivita pro nízké kmitočty (statický region):

$$\varepsilon_s(T) = 78,54 \cdot [1 - 4,579 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 25) + 1,19 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 25)^2]. \quad (2.23)$$

Kritická vlnová délka (při maximálních dielektrických ztrátách).

$$\lambda_s(T) = 3,3836 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\frac{2513,98}{T+279}} [\text{cm}], \quad (2.24)$$



Obrázek 6: Reálná a imaginární část permitivity v závislosti na frekvenci při 30 °C [12]

Relativní permitivitu je možné také vypočítat pomocí zjednodušeného vzorce, tímto vzorcem ovšem dostáváme pouze absolutní hodnotu relativní permitivity [13]:

$$\varepsilon_r = |\hat{\varepsilon}_r| = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2} + \varepsilon_\infty [-]. \quad (2.25)$$

Z vypočtené komplexní relativní permitivity následně můžeme vypočítat pomocný parametr \hat{K} vody (kapky) pomocí vzorce (2.7), který budeme potřebovat v dalších výpočtech.

Na dalších stránkách již můžeme začít se samotným výpočtem radarové odrazivosti. Nejprve je nutné vypočítat spektrum oblačných kapek. Rozložení spektra pro mlhu (oblaka) je většinou popsáno gamma rozdělením [14]:

$$N(r) = a \cdot r^\alpha \cdot e^{-b \cdot r} \left[\frac{1}{\mu\text{m} \cdot \text{cm}^3} \right]. \quad (2.26)$$

Parametry rozložení pro dva typy spekter jsou v tabulce 1. Tyto parametry jsou uvedeny v doporučení ITU-R [14].

	α	a	b	$N (\text{cm}^{-3})$	$LWC (\text{g}/\text{m}^3)$	$r_m (\mu\text{m})$	$V (\text{m})$
Hustá advekční mlha	3	0.027	0.3	20	0.37	10	130
Mírná radiační mlha	6	607.5	3	200	0.02	2	450

Tabulka 1: Spektra oblačných kapek a jejich parametry dle [14].

kde a , b a α jsou parametry rozložení, $N(r)$ je počet částic na jednotku objemu a poloměr oblačné kapky r , LWC je obsah kapalné vody, r_m je modální poloměr (poloměr pro který vykazuje rozložení maximum), V je viditelnost.

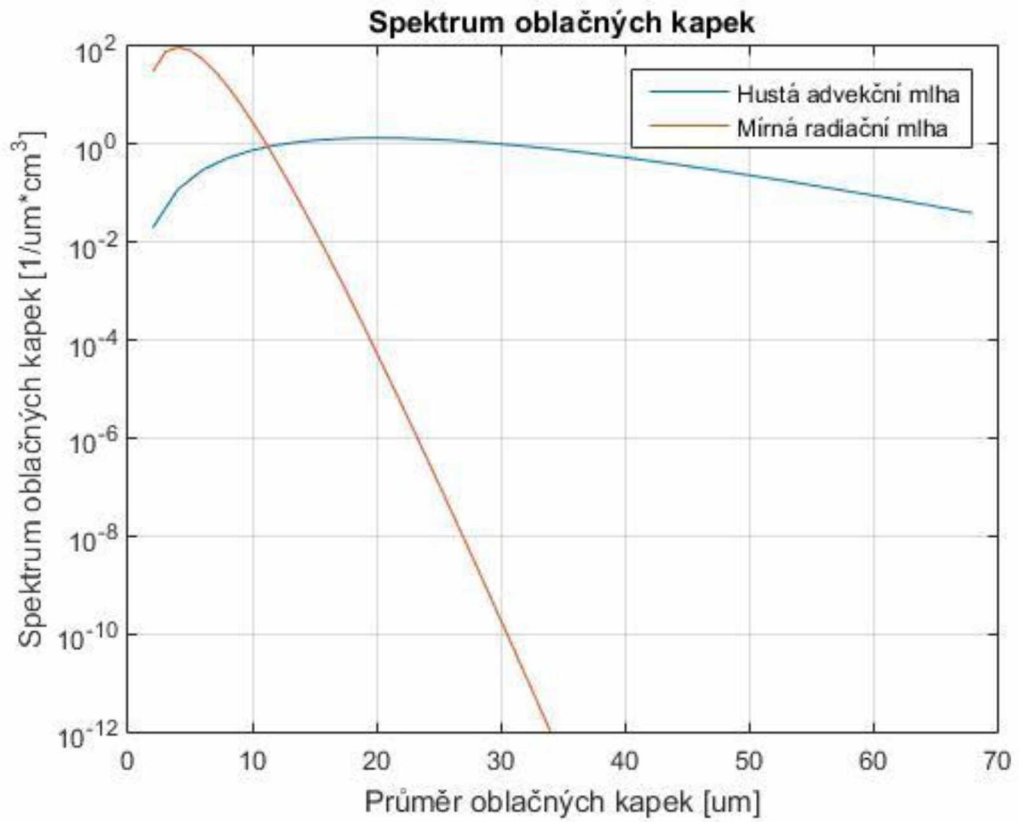
Podle parametrů z tabulky 1 jsou vypočteny hodnoty spekter závislých na průměru oblačných kapiček v jednotkách $\left[\frac{1}{\mu\text{m} \cdot \text{cm}^3} \right]$, tyto hodnoty jsou vykresleny do grafu na obrázku 7.

Nyní již můžeme vypočítat faktor radarové odrazivosti z (malé z) v jednotkách $\left[\frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3} \right]$ pomocí vzorce (2.9), popřípadě je možné logaritmováním získat hodnoty faktoru radarové odrazivosti Z (velké Z) v jednotkách dBZ ze vzorce 2.10. Efektivní odraznou plochu $\sigma(D)$ podle vzorce (2.8). Graf z vypočtených hodnot efektivní odrazné plochy pro spektra vypočtena pomocí parametrů z tabulky 1 jsou zobrazeny na obrázku 8.

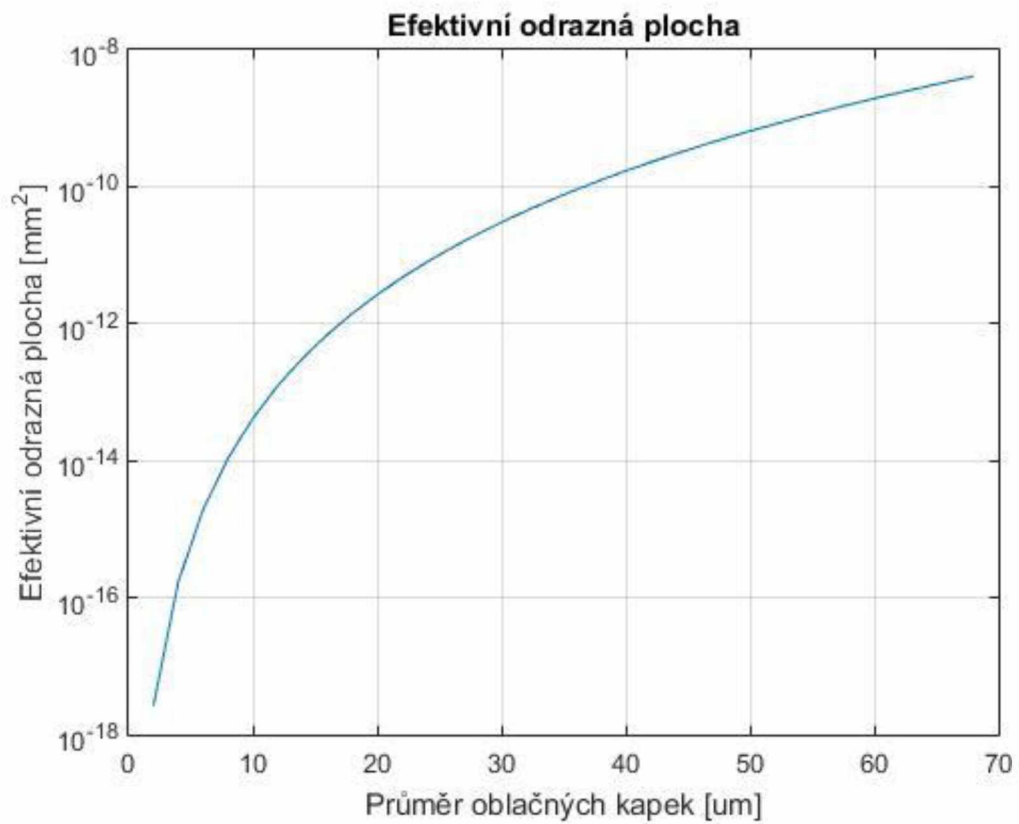
	$z \left[\frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3} \right]$	$Z [\text{dBZ}]$	$\eta \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{m}^3} \right]$	$r_m [\mu\text{m}]$
Hustá advekční mlha	0,0621	-12,07	$5,183 \cdot 10^{-4}$	10
Mírná radiační mlha	$1,168 \cdot 10^{-5}$	-49,33	$9,323 \cdot 10^{-4}$	2

Tabulka 2: Vypočtené hodnoty z , Z a η

Z výpočtů v tabulce 2 můžeme vidět, že se hodnoty faktoru radarové odrazivosti pro oblačné kapky pohybují od -12 dBZ do -50 dBZ.

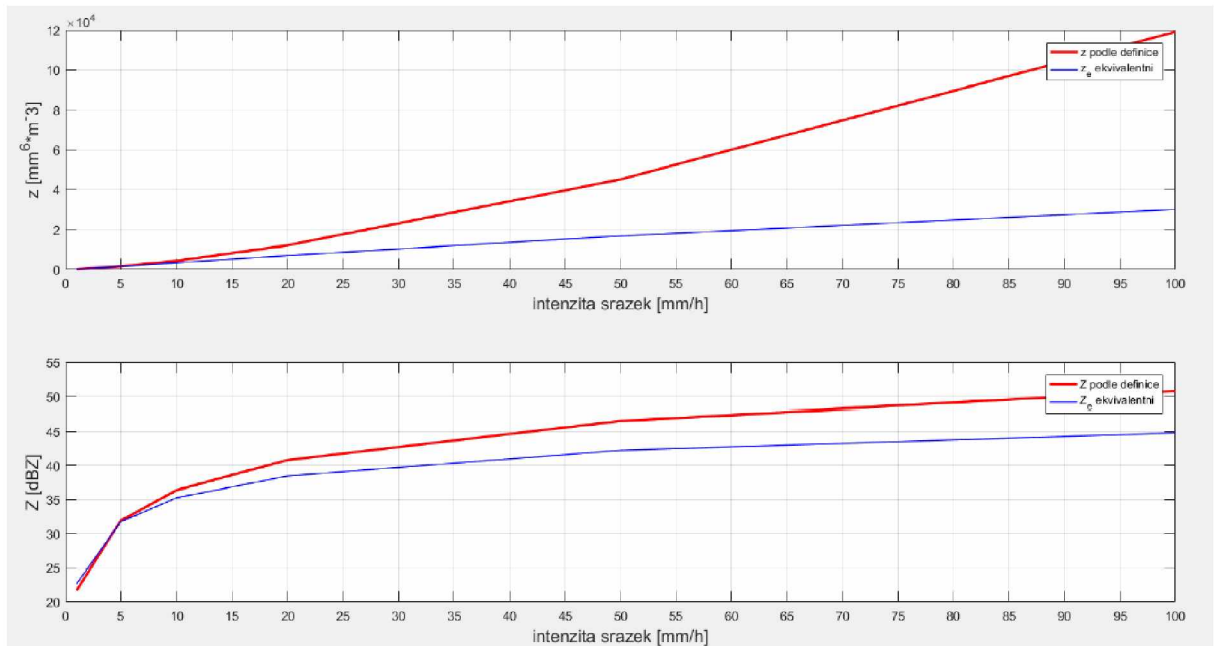


Obrázek 7: Spektra oblačných kapek



Obrázek 8: Efektivní odrazná plocha

2.1.3 Kompenzace frekvenční závislosti faktoru radarové odrazivosti



Obrázek 9: Faktor radarové odrazivosti pro 35 GHz [10].

Vztah pro ekvivalentní faktor radarové odrazivosti je přesný pouze pro tzv. Rayleighovu oblast, používá se však i mimo tuto oblast, to však zavádí do výpočtů pro kmitočty vyšší než 19 GHz nepřijatelnou odchylku, kterou je nutné vykompenzovat. Odchylka faktoru radarové odrazivosti v závislosti na intenzitě deště pro kmitočet 35 GHz v jednotkách $\left[\frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3}\right]$ i [dBZ] je vidět na obrázku 9. Proto byla vypočtena opravná funkce, kterou se vynásobí efektivní faktor radarové odrazivosti, aby byla kompenzována jeho frekvenční závislost [10].

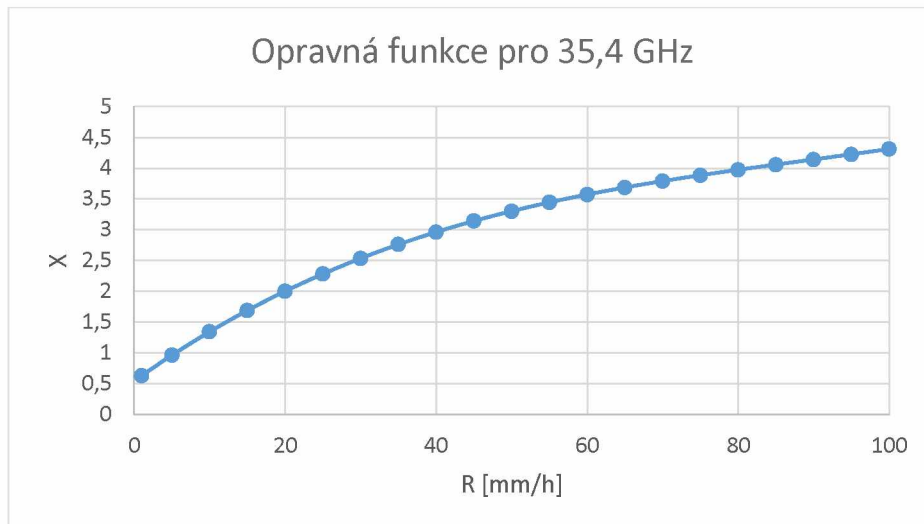
Aproximace opravné funkce X pro 35,4 GHz v závislosti na intenzitě srážek je dána polynomem třetího stupně:

$$X = 3 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 - 0,0008 \cdot R^2 + 0,0877 \cdot R + 0,541 \quad (2.27)$$

kde R je intenzita deště v $\left[\frac{\text{mm}}{\text{h}}\right]$.

Rovnicí (2.27) se vynásobí ekvivalentní faktor radarové odrazivosti z_e a tím bychom měli dle [10] dostat, konstantní průběh ekvivalentního faktoru radarové odrazivosti v závislosti na frekvenci, respektive na intenzitě srážek.

Ještě jednou je nutné zdůraznit, že radar PCDR-35 faktory odrazivosti neměří, měří pouze radarovou odrazivost η a faktory se z ní více či méně přesně počítají.



Obrázek 10: Opravná funkce pro 35,4 GHz

2.2 Metody modifikace, korekce signálu a jeho vyhodnocení

Dalšími úpravami, které na radaru probíhali se zabýval ve své disertační práci „Pokročilé metody zpracování signálu z radaru PCDR-35“ z roku 2017 Ing. Luboše Rejčka, Ph.D. [5] V práci byly rozebrány, mimo vlastností meteorologických cílů, také moderní i klasické metody pro výpočet spektra a pseudo-spektra signálu, tak aby bylo možné analyzovat signály z radaru PCDR-35. Následné modifikace se týkaly zlepšení vlastností radarového systému a rozboru dalších možných měření - např.: dopplerovského měření. Dále byl navrhnut experimentální generátor cvičných cílů a jeho funkce byla ověřena měřením. Pro jednodušší obsluhu radaru byl navrhnut algoritmus automatické detekce cílů.

2.2.1 Metody rozboru radarového signálu

Rozbor vlastností radarového signálu z FMICW radaru se provádí pomocí výpočtu výkonové spektrální hustoty výstupního signálu (PSD). To je možné provádět některou ze dvou skupin metod: parametrickou (výstupem je přímo spektrum) a ne-parametrickou (výstupem pseudo-spektrum).

Ne-parametrické metody neboli periodogramy jsou metody na odhad výkonové spektrální hustoty signálu založené na Fourierově transformaci (FT), respektive rychlé Fourierově transformaci (FFT), která se používá v počítači pro výpočet FT. Výkonovou spektrální hustotu lze získat přímou metodou definovanou vztahem:

$$P_{xx}(e^{j2\omega}) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^N x[n] \cdot e^{-j\omega n} \right|^2, \quad (2.28)$$

nebo nepřímou metodou z autokorelační funkce signálu:

$$P_{xx}(e^{j2\omega}) = \frac{1}{N} \sum_{m=-(N-1)}^{N-1} \sum_{n=N-[m]}^{N-1} x^*[n] \cdot x[n+m] \cdot e^{-j\omega n}. \quad (2.29)$$

Pomocí FFT se ze segmentů signálu vypočítá výkonová spektrální hustota každého segmentu a následně se počítá průměr těchto spekter. Příklady ne-parametrických metod jsou Bartlettův a Welschův periodogram využívající přímé metody nebo Blackman-Tuckey periodogram využívající nepřímé metody.

Parametrické metody založené na rozkladu signálové autokovarianční matice bez střední hodnoty, na vlastní čísla a vektory, následné seřazení od největšího po nejmenší. Seřazená vlastní čísla poté tvoří signálový a šumový podprostor. Pseudo-spektra se následně počítají z vlastních vektorů pro signálový, respektive šumový podprostor. Parametrické metody jsou například metoda MUSIC (vypočítávají se spektra jednotlivých vlastních vektorů pomocí FFT algoritmu), Algoritmus vlastního vektoru (EVA – založen na metodě MUSIC, ale spektra vlastních vektorů jsou vážena vlastními čísly), Algoritmus minimální normy (Mna – velmi podobná metodě MUSIC).

Parametrické metody používající číslicové filtry, využívají modely se zpětnou, postupnou a kombinovanou vazbou. Používané filtry jsou ARMA (Autoregressive Moving Average – konstruován z MA a AR filtru, je druhý nejpoužívanější a efektivnější z hlediska parametrů, ale rovnice pro výpočet koeficientů filtru jsou nelineární). MA (Moving Average – nejméně využívaný – nutné použití mnohem více koeficientů pro spektra s úzkými rezonančními vrcholy). AR (Autoregressive – nejpoužívanější model, výpočet koeficientů pomocí jednoduchých lineárních rovnic.) [5]

2.2.2 Metody modifikace a korekce signálu

Při výpočtu spektra se používají metody upravující signál, ať už před výpočtem spektra nebo po výpočtu, tyto metody se používají pro potlačení šumu nebo prokládání spektra. Pro potlačení šumu se používá například metoda na potlačení vlivu pozadí. To se provádí vyhodnocením pozadí cíle (clutter). Pokud se jedná o nehybné cíle, pozadí se zaměří a je možné jej poté od spektra odečíst. Další metodou pro potlačení šumu je nekoherentní integrace signálu tzn. sledování signálu po delší časový interval, při měření však objekt nesmí výrazně změnit svoji polohu.

Metody prokládání spektra jsou například násobení signálu oknem (např.: Hammingovo okno), které se používá pro eliminaci velkých postranních laloků obdélníkového okna, jež by mohly zamaskovat slabší cíle. Další metodou je metoda Zero – Padding, která se používá

pouze u metod založených na FFT algoritmu. Jde o doplnění signálu nulami do potřebné délky. Například mocninu dvou, což vyžadují některé algoritmy. Tento postup nepřidá žádnou novou informaci, pouze se spektrum bude skládat z více bodů.

Z principu výpočtu spektra je určování odrazné plochy cíle pomocí FMICW radaru ovlivněno vzdáleností cíle. Z tohoto důvodu je výkon spektra závislý na délce užitečného signálu, pro přesnější určení vlastností cíle se korekcí výkonu koriguje odhadovaná odrazná plocha cíle. Korekce přijatého výkonu se liší pro 1D a 2D spektrum. U 1D spektra se určuje přijatý výkon pomocí výkonu spektrálních složek. Je nutné nejprve detekovat cíl a následně provést korekci, jelikož při korekci dochází i ke zdvihu šumu. Korekční koeficient se počítá z rychlosti frekvenčního zdvihu a vzdálenosti cíle. 2D spektrum sloužící k měření rychlosti cíle se počítá pomocí 2D FFT. Ta je prováděna ve 4 krocích: násobení signálu oknem (ovlivňuje tvar postranních laloků ve spektru), spektrální analýza v závislosti na vzdálenosti (FFT). Tato spektra se seskupí do matice a provede se výpočet spektra pro jednotlivé vzdálenosti, nakonec se spodní polovina spekter přesune podle svislé osy na pozici vrchní poloviny a naopak. U 2D spektra je korekce nutná z důvodů násobení signálu oknem, korekce je prováděna tzv.: bělícím filtrem a v uvedené disertační práci byly nalezeny funkce, na jejichž základě byly vypočítány korekční koeficienty pro jednotlivá okna.

Pro zjednodušené práce obsluhy byly v práci popsány 2 algoritmy pro automatickou detekci cílů. Automatická detekce pracuje přímo s čísly, proto je přesnější a zpracování je rychlejší. Obsluha provádí pouze dodatečnou kontrolu. [5]

2.3 Stav radaru

V současné době je radar provozuschopný, avšak zatím není zakomponovaný ve svém stojanu a točně. Jelikož radar není voděodolný, je nutné pro venkovní měření jeho zakomponování do točny, ve které je možné radar překrýt plachtou tzv. radomem. Točnu a plachtu můžeme vidět na obrázku 11. Plachta má na frekvenci 35 GHz útlum pouze 0,5 dB. Aby byl radar chráněn před vnějšími vlivy, lze jej radomem zakrýt a celkový útlum pro průchod signálu je pak pouze 1 dB.



Obrázek 11: Točna radaru PCDR-35

Provozuschopnost radaru byla dokázána v protokolu studenta FEI Karla Pitaše v létě roku 2017, jež byl zhotoven na základě žádosti ředitele ÚFA. S radarem PCDR-35 bylo provedeno celkem deset měření. Měření probíhalo v areálu ÚFA, přesněji ve třetím patře budovy GFU, kde byl zajištěn nejlepší možný výhled z okna, tak aby bylo možné měření mraků a srážek. Z průběhu měření vyplývá, že je radar schopen bezpečně detekovat a určovat vzdálenost výrazných pozemních cílů jako jsou komíny, památníky a další. Bouřka s deštěm se vyskytla v průběhu měření pouze jednou a trvala několik hodin, radar ji bezpečně identifikoval a určil její vzdálenost – toto bylo ověřeno s mapou radarové odrazivosti, která je dostupná na internetu. Během měření se často vyskytovala oblačnost, avšak radar ji zachytil asi ve třetině případů. Z toho lze odvodit, že radar oblačnost dokáže detekovat, to bylo prokázáno i při měření v BTV Klímkovice v roce 2015.

Radar byl při měření umístěn na stole, ze kterého byl v době, kdy měření neprobíhalo sundáván a změna elevace probíhala manuálně, přemísťováním mechanické zábrany. To znamená, že na radar působily otřesy s touto manipulací spojené. Tyto otřesy s největší pravděpodobností způsobovaly změnu impedančního přizpůsobení mezi cirkulátorem a vlnovodem antény. Impedanční přizpůsobení je prováděno třemi šrouby, které jsou však ve svém uložení volné a každý otřes může způsobit jejich pohyb, zhoršení impedančního přizpůsobení a s tím spojené zhoršení vlastností radaru – tímto problémem se budeme dále zabývat. Impedanční přizpůsobení je nutné provádět po každém rozebrání radaru, ve speciálním režimu pro nastavování impedančního přizpůsobení, ve kterém je vidět účinek jednotlivých šroubů, a to nejlépe plastovým šroubovákem. Dále by bylo vhodné pro polohování s radarem používat elektromotor, který je součástí stojanu. Tato metoda by způsobovala výrazně nižší otřesy.

3 POPIS RADARU

3.1 Anténa

Radar PCDR-35 je vybaven směrovou anténou typu Cassegrain složenou z odrazné parabolické plochy o průměru 90 cm a eliptického sub-reflektoru vyrobeného z hliníku o průměru 10 cm. Anténa má zisk 47,3 dBi a šířku svazku $0,672^\circ$ a umožňuje použití lineární vertikální polarizace. Nízké útlumové ztráty (1 dB) jsou zajištěny díky krátkému vlno-vodnému úseku, k ozařovači, jež je vyroben z mosazi a je pozlacený. V primárním ozařovači vede vlnovod, který přechází z obdélníkového na kruhový a je zakončený speciální folií z teflonu.



Obrázek 12: Anténa radaru PCDR-35

Přechod mezi WR-28 vlnovodem u milimetrové (MMW) techniky a $\frac{1}{4}$ " kruhovým vlnovodem u antény je opatřen krátkým úsekem vlnovodu s ladícími šrouby, zajišťujícími impedanční přizpůsobení.

3.2 Impedanční transformátor



Obrázek 13: Impedanční transformátor

Na obrázku 13 je vyobrazen vlnovodní impedanční transformátor se třemi kolíky, používaný k přizpůsobení antény a milimetrové techniky. Změnou hloubky, do které je šroub (kolík) zašroubován se mění reaktance napříč vlnovodem. Pokud se šrouby nedotýkají druhého konce vlnovodu, poskytují změnu kapacitní reaktance. Jakmile se šroub dotýká i opačné stěny, chová se jako reaktance induktivní. Průměr vlnovodu je 6,6 mm a dlouhý je 24,4 mm, kolíky jsou od sebe vzdáleny přibližně 4,1 mm.

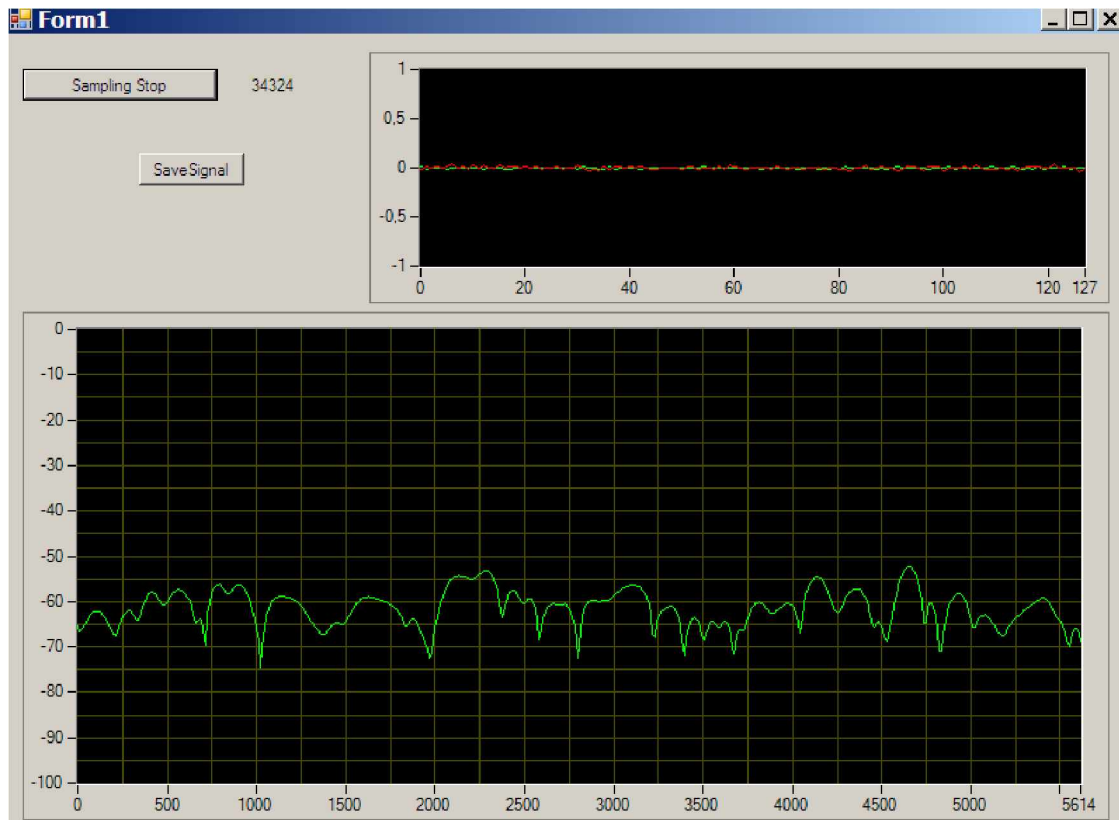
Tyto šrouby (kolíky) byly ovšem volné ve svém uložení a při otřesech se nastavené přizpůsobení rozladilo, radar poté neměřil správně. Proto jsem navrhl, aby se uložení šroubů převrtalo a byly použity šrouby se stejným průměrem závitu. Opravu vlnovodu jsem zajistil za pomoci Ing. Vadima Závodného, Ph.D. ve firmě ELDIS Pardubice, s.r.o..

Na obrázku 13 je vyfocen impedanční transformátor, který je již opravený a má převrtané závity na průměr 2,5 mm, je osazen novými šrouby jejichž závity odpovídají vyvrtaným závitům a nastavování impedančního přizpůsobování by nyní mělo být přesné. Hlavy šroubů musely být obrobena tak, aby je bylo možné umístit vedle sebe. V příloze F je technický výkres zpracovaný firmou ELDIS Pardubice, s.r.o. při opravě impedančního transformátoru.

3.2.1 Impedanční přizpůsobení

Impedanční přizpůsobení probíhá postupnou změnou hloubky zašroubování, respektive vyšroubování jednotlivých šroubů, a to několika způsoby. Při této činnosti je vhodné využít upravený program pro záznam měření, tento program je na obrázku 14.

První možností je namíření radaru na zdroj šumu (například slunce), následné nastavování šroubů, dokud v programu nebude úroveň šumu nejnižší možná.



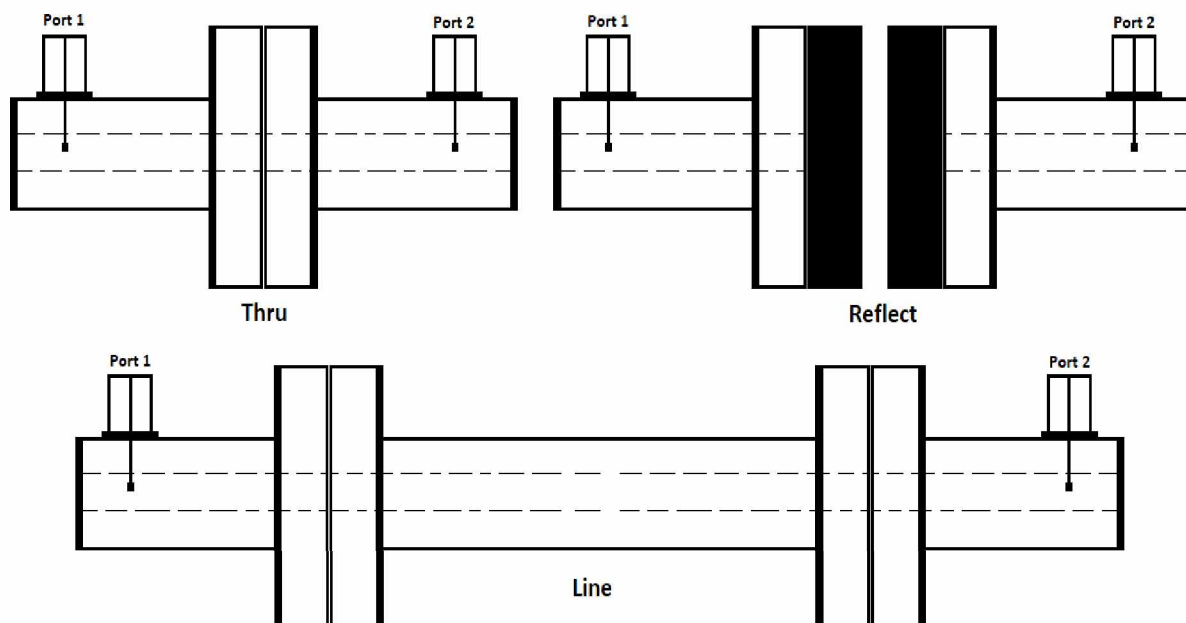
Obrázek 14: Sledování signálu v reálném čase

Další, přesnější metodou lze nastavit impedanční přizpůsobení v „laboratorních podmínkách“ změřením impedance radaru a antény a následné nastavení impedančního transformátoru pomocí vektorového analyzátoru obvodů (VNA). K měření S-parametrů kruhového vlnovodu jako je impedanční transformátor, je nutné vytvoření několika součástí. V laboratořích bývá standardem přechod z koaxiálního kabelu na obdélníkový vlnovod, proto je nutné vyrobit přechod z obdélníkového vlnovodu na kruhový. Na obrázku 15 je uveden příklad přechodu z koaxiálního kabelu na obdélníkový vlnovod.



Obrázek 15 - Adaptér vlnovod na koaxiál. [15]

Tímto je možné připojit vlnovod k VNA, avšak vzniká nutnost kalibrace. Dvouportová kalibrace slouží k odstranění systematických chyb měřicího systému. Pro dvouportovou kalibraci existuje několik metod, například metody SOLT (Short – open – load – thru), TRL (Thru – reflect – line) nebo TRM (Thru – reflect – match), popřípadě další, které jsou z těchto metod odvozené. Metody TRL a TRM jsou založeny na stejném principu jako metoda SOLT (Short – open – load – thru), rozdílem je počet standardů, u metody SOLT jsou to čtyři, oproti TRL, kde stačí standardy pouze tři. Pro účely měření je tedy potřeba vytvořit TRL kalibrační kit, jenž se skládá ze standardů: THRU to je ideálně „obvod s nulovou délkou“, kdy se napřímo propojí oba měřicí vstupy, naproti tomu LINE je obvod s nenulovou délkou – vnitřní impedance LINE a THRU nastavují referenční impedanci měření, elektrická délka standardu LINE a THRU nesmí být stejná. REFLECT může být „jakýkoliv obvod“ s vysokou odrazivostí, povětšinou zkrat či rozpojený obvod, velikost odrazu nemusí být známá, avšak fázi odrazu je nutné znát v rámci $\frac{1}{4}$ vlnové délky. [16] Schematický náčrt TRL přizpůsobovacího kitu je na obrázku 16.



Obrázek 16 - Nákres TRL kitu

Pro přechody z kruhového vlnovodu na vlnovod obdélníkový jsem spolu s Ing. Vadimem Závodným, Ph.D, vypočetl rozměry obdélníkového vlnovodu. Nejprve byla pomocí programu CST studio zjištěna fázová konstanta β , která je pro kruhový vlnovod o průměru 6,6 mm rovna $\beta = 28011,448 \text{ }^\circ/\text{m}$. Z toho vyplývá, že signál při průchodu změní svou fázi o 90° v délce 3,21297 mm. Následně byly zjištěny rozměry obdélníkového vlnovodu WR28 se stejnou fázovou konstantou, jako má kruhový vlnovod. Rozměr pro stranu a je roven 7,112 mm a rozměr strany b je roven 3,556 mm.

Bohužel pro karanténu způsobenou pandemií koronaviru a celorepublikový nouzový stav na jaře 2020 a pro odchod Ing. Závodného, Ph.D. z Eldisu mimo Pardubice nebylo možné v termínu zorganizovat výrobu zmíněných přechodů.

3.3.2 Vysílací část

Signál ve vysílači prochází pásmovou propustí (9), následně cirkulátorem a PIN diodou (10). Cirkulátor slouží k blokadě odrazů od PIN diody zpět do kmitočtové ústředny, následně je vynásoben (4x) v násobičce na kmitočet 35,4 GHz (11). Pak signál prochází PIN diodou (12), a přes nízko šumový zesilovač (13) a výkonový zesilovač (14) je veden na cirkulátor (1). Druhá PIN dioda slouží pro ochranu přijímače. Napájení výkonového zesilovače bylo nutno připojit na vybíjecí obvod z důvodu velké kapacity. Při měření totiž zvyšoval útlum až o 30 dB. Obě PIN diody také slouží ke klíčování vysílače. Vysílaný výkon radaru je 4 W po dobu 66 μ s a perioda opakování vysílání je nastavitelná (nejčastěji 1 ms).



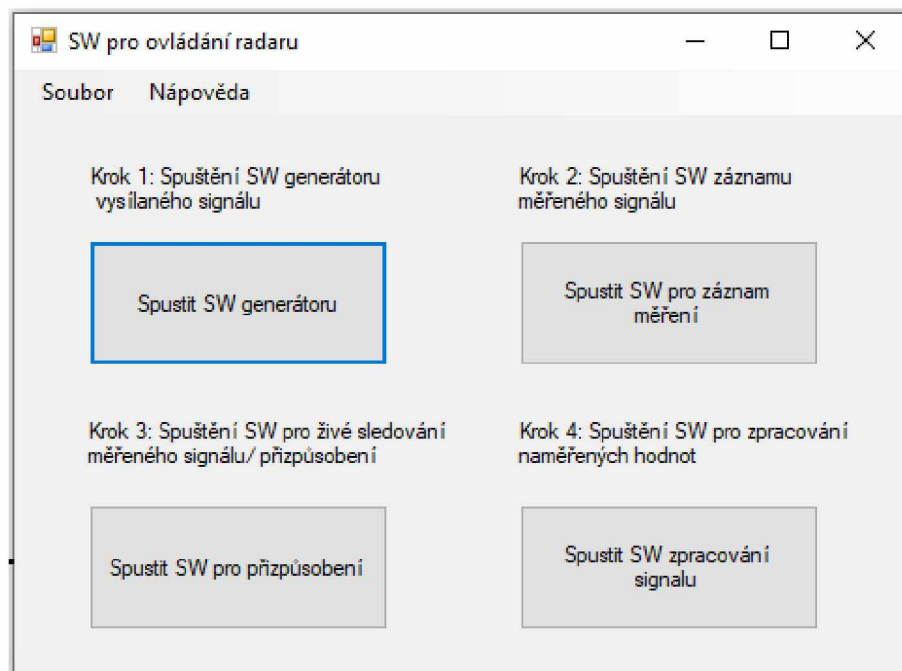
Obrázek 18: Kmitočtová ústředna

3.3.3 Kmitočtová ústředna

Řídící signály a kmitočtově rozmítaný signál modulovaný na 35,4 GHz, použitý pro radar založený na principu FMICW, jsou generovány v kmitočtové ústředně (5). Ta je implementována na hradlovém poli. Část radaru s ústřednou je zobrazena na obrázku 18. Ústředna tedy generuje kmitočty 250 MHz s kmitočtovým zdvihem 87 MHz. Z těchto kmitočtů ve směšovači (15) poté dostáváme základní kmitočet 8,85 GHz. Tento signál se po filtraci a zesílení (16) dostává na výkonovou děličku (6) odkud dále pokračuje do vysílací a přijímací části. Dále také ústředna generuje řídicí signály Tx a Rx (signály pro spouštění záznamové jednotky), která při příjmu povelu provede 660 hodnot záznamu se vzorkovací frekvencí 10 MHz a řídí také odpojování vysílače a přijímače z důvodů ochrany přijímače před zničením.

3.3.4 Software radaru

Pro ovládání radaru slouží čtyři samostatné aplikace, které bylo nutné vyhledávat ve složkách a následně je samostatně spouštět. Proto jsem vytvořil program umožňující spouštět všechny tyto programy z jediného okna. Program tedy slouží pro větší přehlednost a rychlejší ovládání radaru. Je z něj také možné otevřít složky (folder), do kterých jsou ukládána naměřená, respektive zpracovaná data. Je zde také možné otevřít manuál pro práci s radarem, který byl vytvořen jako součást této diplomové práce, viz příloha I.



Obrázek 19: Software pro ovládání radaru

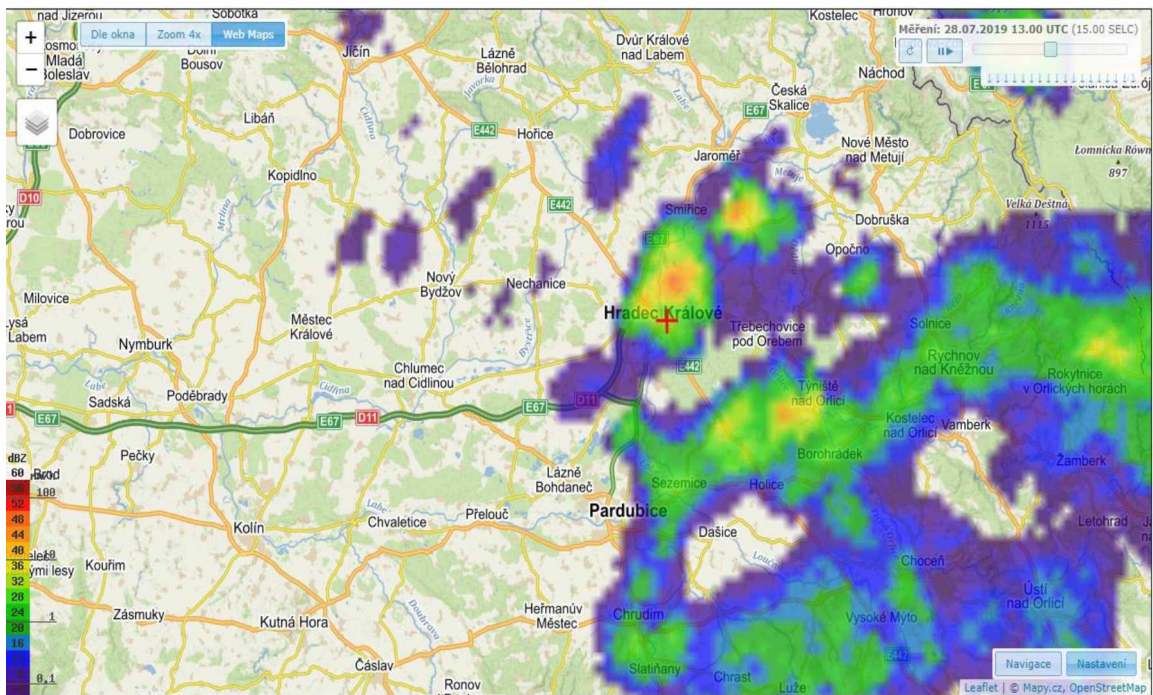
Na obrázku 19 je okno vytvořeného programu. V programu jsou čtyři tlačítka, první spouští software generátoru, druhé tlačítko spouští software pro spouštění záznamu měření, třetím tlačítkem je spustitelný program, který byl vytvořen pro sledování signálu v reálném čase (obrázek 14) a poslední, čtvrté tlačítko slouží k otevření programu na zpracování naměřených dat. Dále je v programu možné na liště se záložkami spustit manuál – záložka „Nápověda“. V záložce „Soubor“ je možné zvolit jednu z několika možností: otevření složky se „Zaznamenanými hodnotami“ nebo složku se „Zpracovanými hodnotami“. Ovládání radaru a popis jednotlivých softwarů lze nalézt v dizertační práci Ing. Luboš Rejfk, Ph.D v kapitole 8.3 na stranách 70 až 73. [5]

4 METODY KALIBRACE

Metody kalibrace radaru je možné rozdělit na dvě skupiny: přesnou, která se provádí s definovaným cílem a hrubou, kdy se radar kalibruje pomocí známé radarové odrazivosti v pixelu.

4.1 Hrubá kalibrace

Hrubou kalibraci lze provádět při měření radarem, pouze pokud známe přesnou radarovou odrazivost. Například z meteorologických radarů ČHMÚ, ve stejném pixelu jako je prováděno měření radarem PCDR - 35. Na obrázku 20 je zobrazena mapa kde je možné Z_e odečíst. Radar v této době zobrazuje přijatý výkon [dBm], proto by bylo vhodné upravit výstup radaru na jednotky [dBZ]. Převod na [dBZ] lze provést podle rovnice (2.13) Pro tyto účely byla vypočítána konstanta C_3 , kdy se podle rovnice (2.6) převede ekvivalentní faktor radarová odrazivosti v [dBZ] na jednotku [$\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$] a pokud známe přijatý výkon P_p [mW] a změřenou vzdálenost r [km], můžeme vypočítat kalibrační konstantu C_3 dle rovnice (2.10), respektive (2.12).



Obrázek 20: Mapa radarové odrazivosti v dBZ (ČHMU, sloučená radarová informace z radarů Brdy a Skalka u Brna)

4.2 Přesná kalibrace s definovaným cílem

K přesné kalibraci je potřeba cíl s přesně definovanou odraznou plochou (například koutový odražeč), jež patří mezi takzvané umělé cíle. Pro trojúhelníkový koutový odražeč se maximální efektivní odrazná plocha vypočítá podle rovnice:

$$S_{e\ max} = \frac{4 \cdot \pi \cdot a^4}{3 \cdot \lambda^2}, \quad (4.1)$$

kde λ je vlnová délka, a je délka strany. [17]

Pro čtvercový odražeč je maximální efektivní odrazná plocha devětkrát větší než pro trojúhelníkový odražeč, tedy pokud jsou jejich strany stejně dlouhé a je rovna dle [18]:

$$S_{e\ max} = \frac{12 \cdot \pi \cdot a^4}{\lambda^2}, \quad (4.2)$$

Kovová koule, která spolehlivě napodobuje nesměrový odražeč, je proto vhodná pro použití v kalibraci tam, kde je třeba zjistit účinnou odraznou plochu skutečných cílů. Odrazná plocha je závislá na poměru poloměru koule k vlnové délce. Pro frekvenci 35,4 GHz a vodivé koule o poloměru menším než 1,1 mm platí vztah [18]:

$$S_e = \frac{144 \cdot \pi^5 \cdot r^6}{\lambda^4}. \quad (4.3)$$

kde r je poloměr koule.

Pokud bude poloměr koule větší než 8,47 mm, efektivní odrazná plocha na poměru vlnové délky a poloměru koule již nezávisí a je rovna dle [18]:

$$S_e = \pi \cdot r^2, \quad (4.4)$$

Kalibraci lze provádět tak, že umístíme koutový odražeč na místo se známou vzdáleností. Radar nastavíme tak, aby směr hlavního laloku mířil přesně na koutový odražeč. Pro jednodušší zaměření lze použít navigační maják, který vysílá na frekvenci radaru, jelikož anténa radaru má velmi úzkou šířku svazku. Při tomto zaměřování je vysílač a klíčování vypnuto. Následně proběhne měření koutového odražeče a z přijatého signálu lze vypočítat vzdálenost pomocí rovnice (4.5) a poté je podle rovnice (4.6) možné vypočítat odraznou plochu nejslabšího detekovatelného cíle v této vzdálenosti.

$$R = \frac{c \cdot k_v}{2 \cdot f_{vz}} + \frac{c \cdot t}{2}, \quad (4.5)$$

$$10 \cdot \log(\sigma_{min}) = 10 \cdot \log(\sigma) - (SNR - SNR_{min}) \quad (4.6)$$

kde f_{vz} je vzorkovací frekvence, k_v je pořadí vzorků, c je rychlost světla, t je doba odpojení vysílače, σ je odrazná plocha koutového odražeče, SNR je změřený odstup signál/šum, SNR_{min} je minimální odstup signál/šum (10 dB). [5]

5 MAXIMÁLNÍ DOSAH RADARU

FMCW radary používají zpravidla dvě antény, aby se zvýšilo odstínění přeslechů mezi vysílačem a přijímačem. Radar PCDR-35 používá anténu pouze jednu. To znamená, že vysílaný i přijímaný signál musí procházet přes cirkulátor, který má však mezi porty separaci kolem 30 dB. Toto způsobovalo saturaci přijímače. Proto byly přidány PIN diody a radar tedy pracuje v režimu FMICW. Proto jsem provedl analýzu odražených výkonů od různých intenzit deště a oblak obsahujících různé střední průměry oblačných kapek. Z této analýzy jsem následně vytvořil kód v programu Matlab, který počítá přijaté výkony od těchto cílů.

5.1 Minimální detekovatelný výkon

Minimální potřebný výkon signálu na vstupu přijímače je udáván definicí šumového čísla:

$$P_p \geq F \cdot N_1 \cdot \left(\frac{S_2}{N_2}\right) = F \cdot k \cdot T_0 \cdot B \cdot \left(\frac{S}{N}\right)_{min}, \quad (5.1)$$

kde F je šumové číslo přijímače, výrobce udává $F = 4$ dB, k je Boltzmannova konstanta $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \approx -228$ dB, T_0 je šumová teplota $T_0 \approx 290 \text{ K} \approx 24$ dB, (S_2/N_2) je potřebný odstup signálu od šumu na výstupu z přijímače $(S/N)_{min}$ uvažujeme 10 dB, B je efektivní šumová šířka přijímače $B = 25 \text{ MHz} \approx 74$ dB, N_1 je výkon šumu na vstupu přijímače.

Pro jednodušší výpočet lze vztah (5.1) převést do formy pro počítání s decibely:

$$P_{p_{min}} = F_{dB} + k_{dB} + T_{0_{dB}} + B_{dB} + \left(\frac{S}{N}\right)_{min_{dB}}, \quad (5.2)$$

$$P_{p_{min}} = 4 - 228 + 24 + 74 + 10 = -116 \text{ dBW} = -86 \text{ dBm}, \quad (5.3)$$

minimální potřebný výkon na vstupu přijímače je tedy -86 dBm neboli 2,5 pW.

5.2 Přijatý výkon

Jak již bylo popsáno v kapitole 2, meteorologické cíle nejsou cíle bodové, nýbrž objemové. Jejich radarová odrazivost je součet odrazových ploch jednotlivých kapek na jednotkový objem, jak je ukázáno na rovnici (5.4):

$$\eta = \frac{\sum \sigma(D)}{V}, \quad (5.4)$$

Objemem je myšlena velikost oblasti skenované radarem - tzv. pixel, který je závislý na vzdálenosti a délce pixelu:

$$V = \frac{\pi \cdot \theta^2 \cdot r^2 \cdot h}{4}, \quad (5.5)$$

kde θ je šířka svazku, R je vzdálenost, h je délka pixelu.

Délku pixelu, která je závislá na délce vysílaného impulsu τ , respektive šířce pásma vysílaného signálu B (kmitočtový zdvih), lze vypočítat:

$$h = \frac{\tau \cdot c}{2} = \frac{c}{2 \cdot B}, \quad (5.6)$$

Pokud tedy tyto skutečnosti implementujeme do radarové rovnice, dostaneme rovnici pro výpočet výkonu přijatého signálu odraženého od objemového cíle, dle rovnice (5.6) používané v meteorologii:

$$P_P = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_v \cdot \theta^2 \cdot h}{2^9 \cdot \pi^2 \cdot \ln 2} \cdot \frac{\eta}{r^2}, \quad (5.7)$$

kde $\lambda = \frac{c}{f}$ vlnová délka, G je zisk antény radaru, P_v je vysílaný výkon radarem, θ je šířka svazku vysílací antény, r je vzdálenost cíle, h je délka pixelu, η je radarová odrazivost.

Na další stránce v tabulce 3 jsou vypsány některé vypočítané přijaté výkony dle rovnice (5.7) pro intenzity deště od 0,5 mm/h až po 128 mm/h, střední průměry oblačných kapek od 6 μm do 14 μm , vzdálenosti pohybující se od 1 km do 10 km a délky pixelu od 15 m do 150 m. Kód v aplikaci Matlab pro výpočty a celé tabulky s výkony jsou přiloženy v příloze této práce.

Pokud porovnáme vypočtené výkony z tabulky 3 a vypočítaný minimální přijatelný výkon radarem z rovnice (5.2), můžeme pozorovat, že silný déšť je možné detekovat s velmi dobrým rozlišením v dálce ($h = 15$ m) i ve vzdálenostech větších než 10 kilometrů. Ovšem jak je také vidět, čím vyšší je rozlišení v dálce, tím roste frekvenční zdvih, klesá objem radarového pixelu a zmenšuje se radarová odrazivost, která je na objemu pixelu závislá a tím klesá dosah radaru, protože se zmenšuje odražený výkon. To platí také pro oblačnost, avšak oblaka jsou mnohem hůře detekovatelná. V rovnici (5.7) však není počítáno s přeslechy a ztrátami vzniklými při zpracování, tyto ztráty mohou způsobit, že slabší cíle se nepodaří detekovat.

Vzdálenost	1 km	5 km	10 km	Vzdálenost	1 km	5 km	10 km
R [mm/h]	$\Delta F = 1 \text{ MHz} \Rightarrow h = 150 \text{ m}$			Dstřední [mm]	$\Delta F = 1 \text{ MHz} \Rightarrow h = 150 \text{ m}$		
0,5	-18,11	-32,09	-38,11	6	-60,59	-74,57	-80,59
2	-8,65	-22,63	-28,65	10	-47,28	-61,26	-67,28
8	-0,45	-14,43	-20,45	14	-38,66	-52,64	-58,66
32	6,44	-7,54	-13,56	Dstřední [mm]	$\Delta F = 2 \text{ MHz} \Rightarrow h = 75 \text{ m}$		
128	12,12	-1,86	-7,88	6	-63,60	-77,58	-83,60
R [mm/h]	$\Delta F = 3 \text{ MHz} \Rightarrow h = 50 \text{ m}$			10	-50,29	-64,27	-70,29
0,5	-22,88	-36,86	-42,88	14	-41,67	-55,65	-61,67
2	-13,43	-27,40	-33,43	Vzdálenost	500 m	700 m	900 m
8	-5,22	-19,20	-25,22	Dstřední [mm]	$\Delta F = 1 \text{ MHz} \Rightarrow h = 150 \text{ m}$		
32	1,67	-12,31	-18,33	6	-54,57	-57,49	-59,67
128	7,34	-6,64	-12,66	10	-41,26	-44,18	-46,37
R [mm/h]	$\Delta F = 5 \text{ MHz} \Rightarrow h = 30 \text{ m}$			14	-32,64	-35,56	-37,74
0,5	-25,10	-39,08	-45,10	Dstřední [mm]	$\Delta F = 2 \text{ MHz} \Rightarrow h = 75 \text{ m}$		
2	-15,64	-29,62	-35,64	6	-57,58	-60,50	-62,68
8	-7,44	-21,41	-27,44	10	-44,27	-47,19	-49,38
32	-0,55	-14,52	-20,55	14	-35,65	-38,57	-40,75
128	5,13	-8,85	-14,87	Dstřední [mm]	$\Delta F = 3 \text{ MHz} \Rightarrow h = 50 \text{ m}$		
R [mm/h]	$\Delta F = 7 \text{ MHz} \Rightarrow h = 21 \text{ m}$			6	-59,34	-62,26	-64,44
0,5	-26,56	-40,54	-46,56	10	-46,03	-48,95	-51,14
2	-17,11	-31,08	-37,11	14	-37,41	-40,33	-42,51
8	-8,90	-22,88	-28,90				
32	-2,01	-15,99	-22,01				
128	3,66	-10,32	-16,34				
R [mm/h]	$\Delta F = 9 \text{ MHz} \Rightarrow h = 16 \text{ m}$						
0,5	-27,65	-41,63	-47,65				
2	-18,20	-32,18	-38,20				
8	-9,99	-23,97	-29,99				
32	-3,10	-17,08	-23,10				
128	2,57	-11,41	-17,43				

Tabulka 3: Přijatý výkon Pp [dBm]

5.2.1 Integrace

V předchozích řádcích ovšem není počítáno s integrací signálu, která může opět zvýšit dosah radaru. Tzv. improvement factor pro nekoherentní integraci SNi (zvýšení odstup signálu od šumu pomocí integrace signálu) se vypočítá podle rovnice:

$$SNi = 5 * \log_{10}(N), \quad (5.8)$$

kde N je počet vzorků signálu.

Jedno měření radarem se skládá z 660 vzorků, ze kterých budeme provádět integraci. Pokud je tedy zaznamenán celý signál, nekoherentní integrací se zvýší odstup signálu od šumu přibližně o 14 dB. Pokud by signál obsahoval pouze 20 vzorků to odpovídá vzdálenosti 500 metrů – odstup signál šum se zvýší jen o cca 6,5 dB.

Pro vypočet zlepšení odstup signálu od šumu pro radar pracující v režimu FMCW budeme předpokládat, že se počet vzorků zvýší dvojnásobně – to znamená 1320 vzorků. Dle rovnice (5.8) vyjde zlepšení odstup signálu od šumu cca 15,6 dB. To znamená změnu oproti současnému počtu vzorků pouze o 1,6 dB tímto způsobem tedy s největší pravděpodobností nedojde k výraznému zvýšení dosahu radaru. Nyní radar zpracovává samostatně složku I a složku Q. Použitím obou složek, jejich umocněním, sečtením a následným odmocněním. A použitím nekoherentní integrace. By teoreticky bylo dle [19] možné další zvýšení odstup signálu od šumu. Tuto metodu by bylo vhodné důkladněji prostudovat.

$$S(i) = \sqrt{I(i)^2 + Q(i)^2} \quad (5.9)$$

5.3 Dosah radaru

Dalším mým úkolem bylo zjistit, jak se změní dosah radaru PCDR-35, kdyby byl přebudovaný z FMICW na FMCW, tedy s oddělenou vysílací a přijímací anténou a kontinuálním vysílání i přijímání. Separace mezi anténami se předpokládá 90 dB. Pro tyto účely byl vypočítán minimální detekovatelný výkon na přijímači radaru a přijímané výkony odražené od oblak a deště. Tento výkon ovšem prochází ještě skrz cirkulátor. Pokud chceme vypočítat, jaký je rozdíl mezi dosahem radaru s jednou anténou oproti radaru, který má antény dvě, je nutné k minimálnímu přijímanému výkonu připočítat také přeslechy z vysílače na přijímač.

$$P_P = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_v \cdot \theta^2 \cdot h}{2^9 \cdot \pi^2 \cdot \ln 2} \cdot \frac{\eta}{r^2} \geq F \cdot k \cdot T_0 \cdot B \cdot \left(\frac{S}{N}\right)_{min} + P_{preslech} \cdot D_p, \quad (5.10)$$

kde $P_{preslech}$ je výkon přenesený z vysílače na přijímač, D_p je nezbytný odstup signálu od přeslechu (budeme uvažovat nejméně 5 dB).

Na levé straně nerovnice (5.10) je radarová rovnice (5.7), kterou jsme použili pro výpočet přijatých výkonů od meteorologických cílů, na pravé straně nerovnice je rovnice (5.1), jež je použita pro výpočet minimálního přijatého výkonu. Ovšem zde máme navíc přičteny přeslechy mezi vysílačem a přijímačem.

Výkon přeslechu se vypočítá pomocí rovnice:

$$P_{\text{přeslech}} = \frac{P_v}{I \cdot L}, \quad (5.11)$$

kde P_v je vysílaný výkon, I je izolace (potlačení proniku vysílání do přijímače), L je potlačení postranních laloků a pevných cílů pomocí DFT.

Do této rovnice dosadíme známou hodnotu vysílaného výkonu $P_v = 4 \text{ W} \approx 36 \text{ dBm}$ a hodnotu potlačení signálu pro případ, kdy je použita jedna anténa I_1 , respektive I_2 , pokud by byly použity antény dvě. Hodnota izolace jedné antény I_1 je 30 dB, izolace při použití dvou antén I_2 je 90 dB. Jelikož hodnoty potlačení postranních laloků a pevných cílů nejsou známy budeme tedy uvažovat, že jsou rovny 0 dB a neuplatní se. Výkon přeslechu tedy bude pro jednu anténu vycházet:

$$P_{1\text{přeslech}_{dB}} = P_{v_{dB}} - (I_{1_{dB}} + L_{dB}) = 36 - (30 + 0) = 6 \text{ dBm} \approx 4 \text{ mW}. \quad (5.12)$$

Pokud by byly použity antény dvě, vycházel by výkon přeslechu:

$$P_{2\text{přeslech}_{dB}} = P_{v_{dB}} - (I_{2_{dB}} + L_{dB}) = 36 - (90 + 0) = -54 \text{ dBm} \approx 4 \text{ nW}. \quad (5.13)$$

Nyní tyto hodnoty dosadíme do rovnice (5.8) a vyjde nám tedy minimální přijatelný výkon na výstupu antény:

$$P_{p1_{min}} \geq F \cdot k \cdot T_0 \cdot B \cdot \left(\frac{S}{N}\right)_{min} + P_{\text{přeslech}1} \cdot D_p = 2,5 \cdot 10^{-9} + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 3,16 \cdot 10^{-3} = 12,6425 \mu\text{W} \approx -19 \text{ dBm}, \quad (5.14)$$

z rovnice (5.14) a tabulky 4, lze vyzpozorovat, že provoz radaru jako FMCW s jednou anténou není možný, protože přeslech z vysílače by příjem účinně zlikvidoval. Toto se ukázalo i v praxi.

Minimální přijatelný výkon při použití dvou antén vychází:

$$P_{p2_{min}} \geq F \cdot k \cdot T_0 \cdot B \cdot \left(\frac{S}{N}\right)_{min} + P_{\text{přeslech}2} \cdot D_p = 2,5 \cdot 10^{-9} + 7,9 \cdot 10^{-9} \cdot 3,16 \cdot 10^{-3} = 2,52496 \text{ nW} \approx -55,97 \text{ dBm}, \quad (5.15)$$

porovnáním výsledku v rovnici (5.15) a tabulky 4, můžeme konstatovat, že v konfiguraci radaru se samostatnou anténou pro vysílání a samostatnou anténou pro příjem je izolace radaru již postačující a provoz v režimu FMCW by mohl být teoreticky možný.

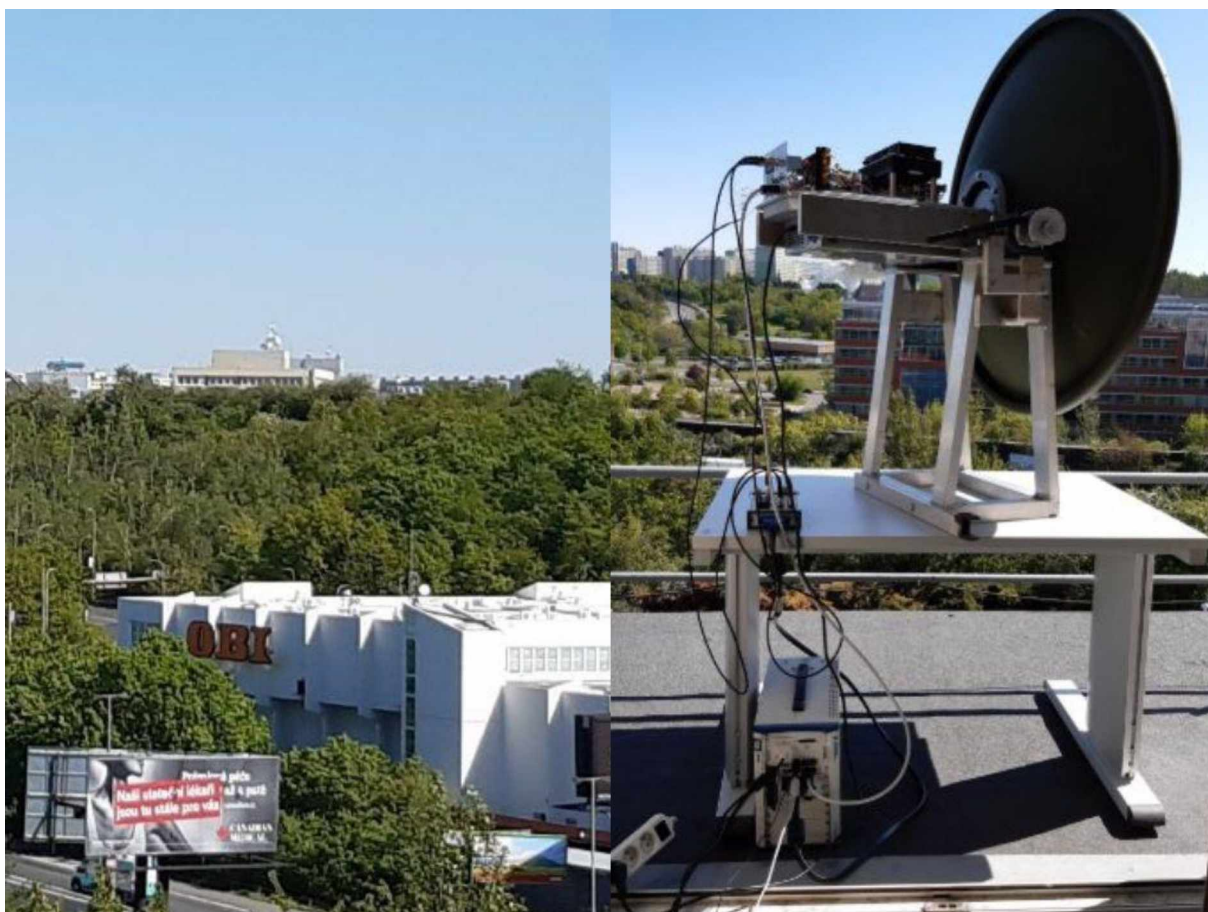
6 MĚŘENÍ RADAREM PCDR-35

V rámci této diplomové práce proběhlo s radarem PCDR-35 měření, za účelem otestování opraveného impedančního transformátoru. Toto měření se konalo ve dvou místnostech Geofyzikálního ústavu Akademie věd České republiky z okna i plošiny s volným výhledem na Prahu z relativní výšky. Jako první radar byl nainstalován v okně s výhledem na malé pražské návrší Bohdalec (obrázek 21). Druhým místem měření byla plošina u kanceláře na opačné straně GFU. Radar byl na tomto místě namířen směrem na Český Metrologický Institut (obrázek 22 vlevo).



Obrázek 21: Výhled z okna GFÚ – Směr Bohdalec

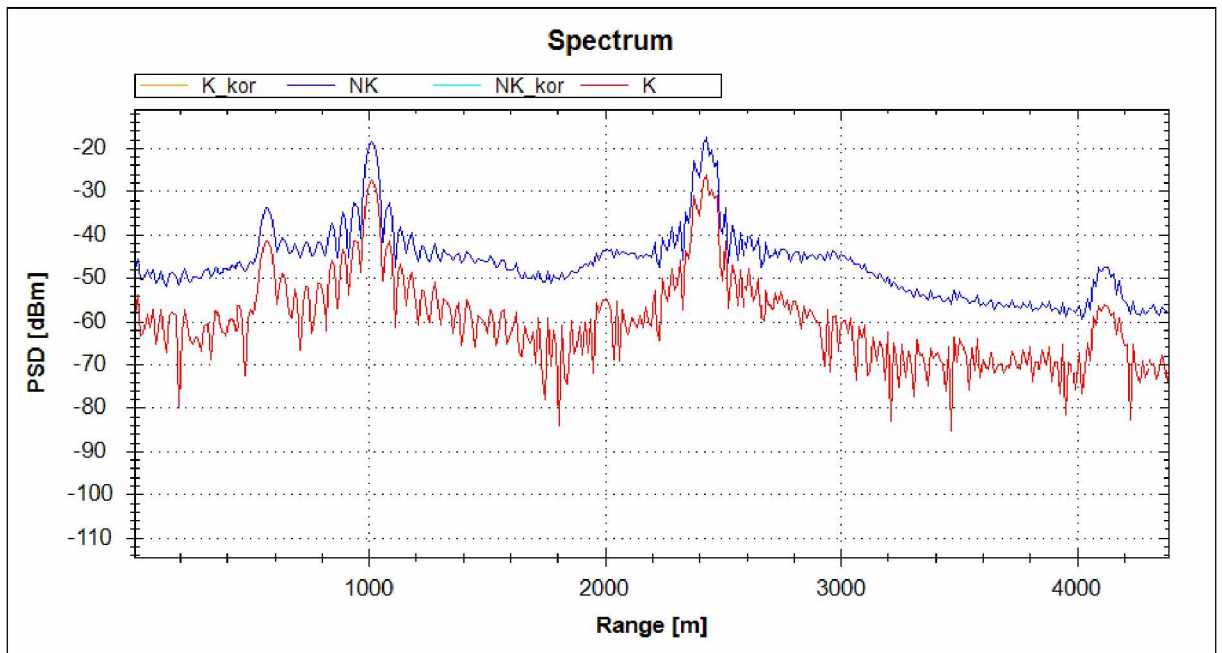
Radar byl při měření vložen do stojanu, který slouží jako rám pro složení radaru a jeho antény. Stojan s radarem byl položen na stole tak aby měl radar „volný výhled“ z okna kanceláře. Při druhém měření, kdy radar byl ve volném prostranství, sloužil stůl k lepší manipulaci. Sestavený radar při druhém měření je vidět na obrázku 22 vpravo.



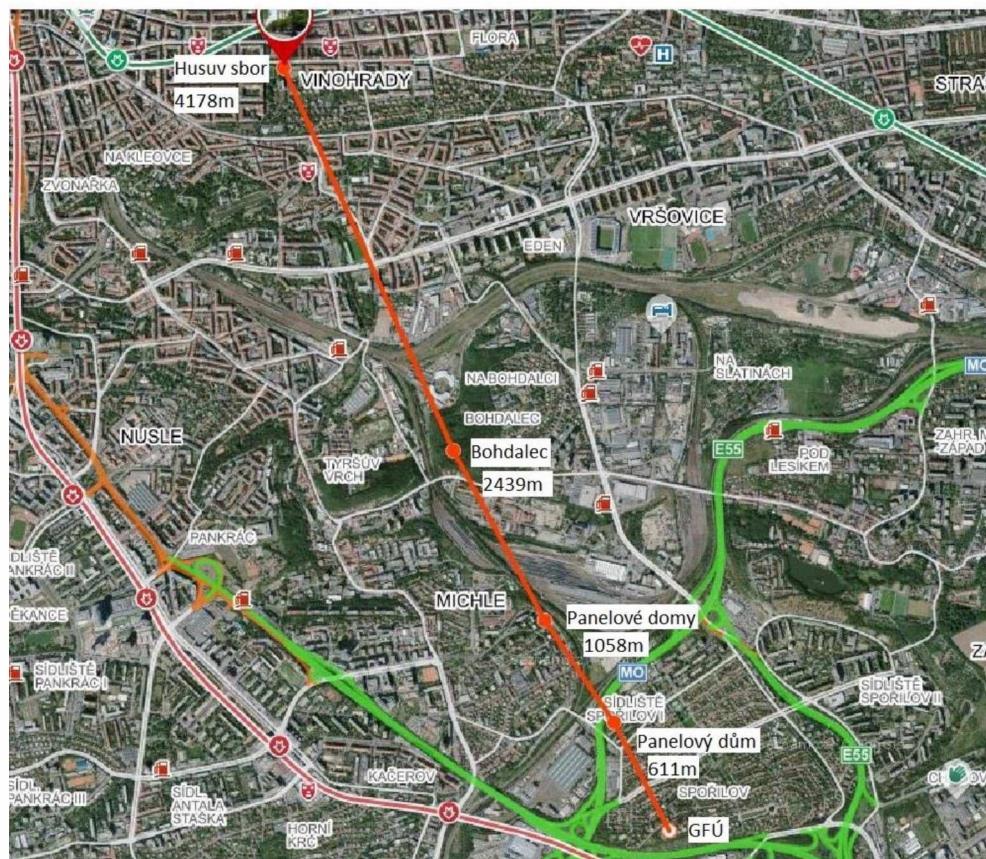
Obrázek 22: Výhled ve směru Český metrologický institut a umístění radaru při měření.

6.1 První měření

Jak již bylo řečeno v úvodu první měření probíhalo v kanceláři s výhledem na návrší Bohdalec. Radar jsme sestavili a umístili k oknu na stůl, následně jsme provedli impedanční přizpůsobení pomocí námi navrženého impedančního transformátoru a programu k tomu účelu určenému, viz kapitola 3.2.1. Zde jsme provedli s doktorandem Ing. Karlem Pitašem sérii měření. Z těchto měření jsem zpracoval výsledky. Na obrázku 23 můžeme vidět již zpracovaný signál na kterém se vyskytují čtyři cíle. První cíl se nachází ve vzdálenosti 600 m, jedná se o oranžový panelový dům. Druhý cíl je ve vzdálenosti 1000 metrů a jedná se o panelové domy. Třetím cílem je návrší Bohdalec ve vzdálenosti cca 2500 metrů a posledním cílem je na 4100 metrech vodárenská věž ve Vinohradech. Tyto cíle jsou částečně pozorovatelný i na obrázku 21 a na obrázku 24 jsou vyznačeny na mapě.



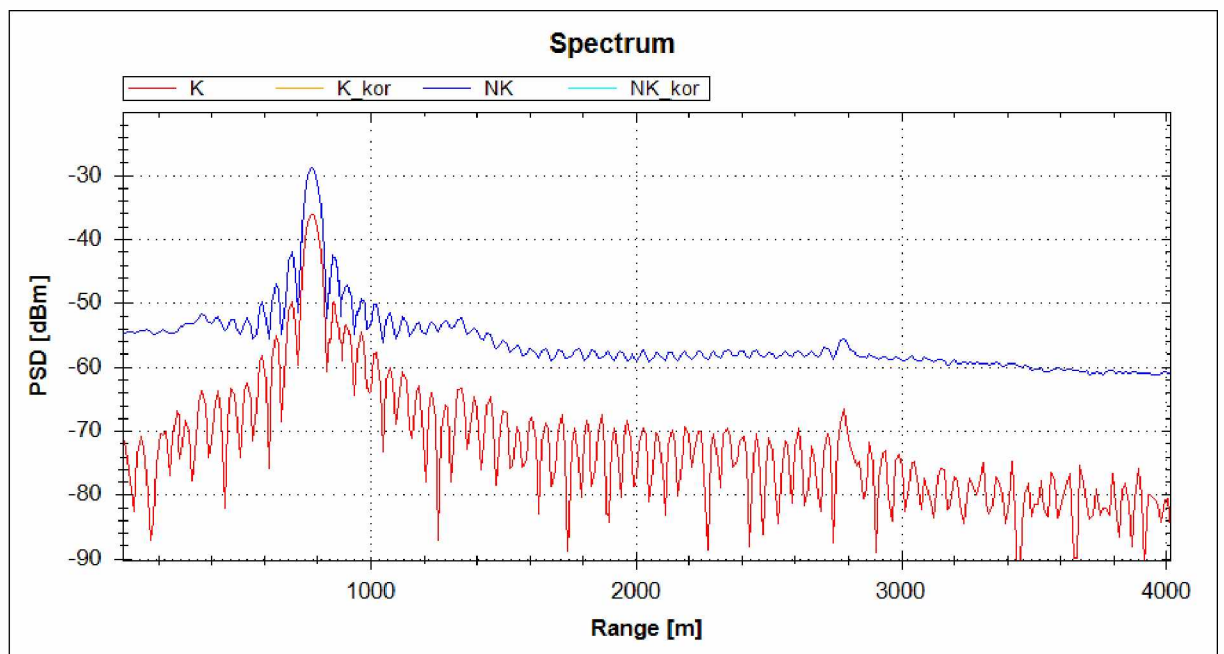
Obrázek 23: Odraz od čtyřech cílů



Obrázek 24: Mapa se čtyřmi cíli

6.2 Druhé měření

V úvodu kapitoly bylo uvedeno, že při druhém měření byl radar umístěn na opačné (jižní) straně GFÚ. Zde již radar nebyl umístěn v okně. Namísto toho jsme radar umístili na malý balkón, který se u kanceláře nachází. Umístění radaru je na obrázku 19. Na tomto obrázku je vidět i cíl měřený radarem. Tímto cílem je budova Českého Metrologického Institutu. Zpracovaný signál z radaru je na obrázku 25. Budova se nachází 800 metrů od místa měření. Toto bylo ověřeno orientačním měřením na mapě viz obrázek 26.



Obrázek 25: Odraz od jednoho cíle

6.3 Závěry z měření

Z měření můžeme vyvodit, že radar spolehlivě měří pevné cíle (například budovy), jako již bylo prokázáno při dřívějších měření Ing. Karlem Pitašem, popřípadě Ing. Lubošem Rejfkem, Ph.D. Avšak cílem tohoto měření bylo ověření vlastností impedančního transformátoru. Při měření jsme nepozorovali výrazné zlepšení odstupu signálu od šumu, respektive kvalitnější nastavení impedančního přizpůsobení radaru a antény. Můžeme však s jistotou říci, že nastavení pomocí kolíků je mnohem přesnější a nastavování je velmi citlivé na pohyby jednotlivých kolíků. Ovšem uložení šroubů není stále dokonalé a nejvhodnějším řešením by byla výroba nového impedančního transformátoru, který bude mít uložení šroubů velmi těsné. Usnadněním měření s radarem by bylo přidání „zaměřovače,“ kterým by bylo možné pozorovat přibližné místo, které radar skenuje. Díky úzkému svazku je zaměření i například budov velmi náročná a

zdlouhavá činnost. Ovšem měření budov slouží spíše k ověřování vlastností radaru, než že by se jednalo o jeho primární funkci. Primární funkcí radaru je měření oblak a dešťových jader či oblaků. Zvýšení komfortu při zaměřování by mohlo přinést i zprovoznění již namontovaného elektromotoru, kterým by bylo možné radar nastavovat v elevaci. Tento elektromotor je součástí stojanu radaru. Avšak při takovýchto „terénních“ měřeních by nutnost jeho napájení s nejvyšší pravděpodobností nepřinesla dostatečnou přidanou hodnotu.



Obrázek 26: Mapa s jedním cílem

ZÁVĚR

V průběhu této diplomové práce jsem se seznámil s oblačným radarem PCDR-35, Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd České republiky pracujícím na kmitočtu 35,4 GHz a provedl jsem jeho analýzu. Podrobně jsem se také seznámil s dizertační prací Ing. Luboše Rejčka, Ph.D. a diplomovými pracemi Ing. Milana Ptáčníka a Ing. Marie Kovalchuk (všichni za FEI UPCE), které se zmíněnému radaru věnují. Navrhl jsem a za pomoci Ing. Vadima Závodného, Ph.D. jsem zařídil opravu impedančního transformátoru ve firmě ELDIS Pardubice, s.r.o. Následně jsem společně s doc. Ing. Ondřejem Fišerem, CSc a Ing. Karlem Pitašem, provedl „terénní“ měření za účelem ověření vlastností opraveného impedančního transformátoru. Měření také sloužilo k nastudování práce s radarem a následné vytvoření manuálu k ovládání radaru, jež bylo jedním z cílů této diplomové práce, vytvořený manuál je k nahlédnutí v příloze I této diplomové práce. V plánu bylo i laboratorní měření impedančního transformátoru. Toto měření ovšem nebylo možné vzhledem k pandemii koronaviru zorganizovat.

V první kapitole je stručně popsána historie radarů, základní radarové systémy a jejich principy.

Druhá kapitola je věnovaná již samotnému radaru PCDR-35, je zde popsáno odvození radarové rovnice nejprve pro bodový cíl (letadla, auta, lodě) a poté radarové rovnice používané v meteorologii pro cíle objemové (děšť oblaka, smog), které nás zajímají. Dále jsou v této kapitole popsány faktory radarové odrazivosti v jednotkách [dBZ], které jsou používány v meteorologii při radarových měřeních. Za tímto účelem jsou zde také vypočteny radarové konstanty kalibrující ekvivalentní faktor radarové odrazivosti přímo pro tento radar. Faktory radarové odrazivosti jsou částečně závislé na kmitočtu, proto je zde podle diplomové práce Ing. Marie Kovalchuk rozebrána opravná funkce, která tuto závislost kompenzuje. Kapitola pokračuje stručným popisem rozboru signálu a metod pro modifikaci a korekci signálu, popsán je také současný stav radaru. V kapitole se též nachází výpočet radarové odrazivosti oblak.

Ve třetí kapitole jsou rozebrány jednotlivé součásti nutné pro fungování radaru. Radar je zde popsán od kmitočtové ústředny po anténu a software. Velká pozornost je zde věnována impedančnímu transformátoru, který způsoboval problémy při měření, proto jsem zorganizoval a podílel se na jeho předělání. Po opravě s ním bylo provedeno měření. Výsledky měření jsou popsány v kapitole šest.

Následující kapitola se zabývá hrubou a přesnou kalibrací radaru.

V páté kapitole jsem provedl analýzu možných úprav radaru v souvislosti s maximální dosahem radaru. Vypočten byl minimální výkon, který dokáže radar ještě detekovat. Následně

bylo nutné teoreticky vypočítat přijatý odražený výkon od oblak a deště pro různé vzdálenosti z těchto hodnot jsou vyvozeny výsledky analýzy dosahu radaru.

Po důkladném seznámení se s radarem, analýzou jeho vlastností a provedení měření musím konstatovat, že radar velmi dobře dokáže detekovat velké statické objekty, jako jsou budovy či komíny a velmi přesně určí jejich vzdálenost od radaru. Radar také dokáže spolehlivě detekovat déšť. Nicméně měření oblačných kapiček není dokonalé, ne vždy totiž radar dokáže oblaka detekovat. Proto bych navrhl několik možných zdokonalení, které by v tomto směru mohli měření oblak zefektivnit. Nejprve by bylo vhodné vyrobit nový impedanční transformátor, jehož kolíky budou ve svých uloženích, těsné a nebudou se při pohybech s radarem rozladovat. S tímto bych spojil i výrobu přechodů a TRL kalibračního kitu, následně bych provedl měření a nastavení impedančního transformátoru. Největší efekt by však přinesla větší izolace vysílací a přijímací části radaru a s ní spojené snížení přeslechů. Tímto bychom mohli dosáhnout velmi dobré detekovatelnosti oblak, toto řešení by však bylo s největší pravděpodobností dosti nákladné. Další možností je úprava radaru tak, aby měl samostatnou anténu pro příjem a samostatnou anténu pro vysílání, toto by mohlo přinést další zvýšení izolace. Ovšem i toto řešení by bylo velmi nákladné, a proto je nutné před dalšími úpravami provést důkladnější analýzu. Je velmi pravděpodobné, že přidáním druhé antény, by se snížil vlastní šum přenášený do přijímací části. Tímto by bylo teoreticky možné dosáhnout větší citlivosti a zdokonalit detekci oblak v režimu FMICW.

Domnívám se, že jsem zadání diplomové práce splnil v plném rozsahu.

LITERATURA

- [1] Weather radar technology beyond NEXRAD. Washington, D.C.: National Academy Press, 2002. Compass series (Washington, D.C.). ISBN 9780309084666.
- [2] DEVINE, P. Radar Level Measurement: The User's Guide: The User's Guide. Vega Controls, 2000. ISBN 9780953892006. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=t1DnAAAACAAJ>
- [3] KISSINGER, Dietmar. Millimeter-Wave Receiver Concepts for 77 GHz Automotive Radar in Silicon-Germanium Technology [online]. Boston, MA: Springer US, 2012 [cit. 2019-03-24]. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. ISBN 978-1-4614-2289-1.
- [4] DUDÁČEK, Luděk. Radarové měření vzdálenosti. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. FEL ZCU.
- [5] REJFEK, Luboš. Pokročilé metody zpracování signálu z radaru PCDR35. Pardubice, 2017. Disertační práce. FEI UPCE.
- [6] MANDLIK, Michal a Vladimír BRAZDA. FMICW radar simulator. In: 2015 25th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA) [online]. Pardubice: IEEE, 2015, s. 317-320 [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2015.7129054. ISBN 978-1-4799-8117-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7129054/>
- [7] REJFEK, Lubos, Ladislav BERAN a Ondrej FISER. Correction of radar received signal. In: 2015 25th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA) [online]. Pardubice: IEEE, 2015, s. 191-194 [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2015.7129006. ISBN 978-1-4799-8117-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7129006/>
- [8] REJFEK, Lubos, Ondrej FISER, David MATOUSEK, Ladislav BERAN a Pavel CHMELAR. Correction of received power for Doppler measurements by FMICW radars. In: 2017 International Symposium ELMAR [online]. Pardubice: IEEE, 2017, s. 104-110 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.23919/ELMAR.2017.8124446. ISBN 978-953-184-225-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8124446/>

- [9] PTÁČNÍK, Milan. Rozbor možností meteorologického radaru PDCR-35 v pásmu 8 mm. Pardubice, 2010. Diplomová práce. FEI UPCE.
- [10] KOVALCHUK, Maria. Analýza průběhů, porovnání metod výpočtu a použití rozptylových funkcí k popisu interakce elektromagnetické vlny s kapkami deště. Pardubice, 2019. Diplomová práce. FEI UPCE.
- [11] FISER, Ondrej a Karel PITAS. Simple Calibration of FMCIW 35 GHz Meteorological Radar "PCDR 35". In: 2019 29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA) [online]. Pardubice: IEEE, 2019, s. 1-4 [cit. 2019-04-20]. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2019.8733461. ISBN 978-1-5386-9322-3. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8733461/>
- [12] HIPPEL, Susanne. Electromagnetic Drop Scale Scattering Modelling for Dynamic Statistical Rain Fields: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1207580/1207580.pdf> [online]. München, 2015 [cit. 2020-05-18]. Disertační práce. Technischen Universität München.
- [13] CHAPLIN, Martin. Water Complex Dielectric and Polarization. Water Structure and Science [online]. 2001 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html#microw
- [14] Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links [online]. ITU-R, 2008 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1817-0-200708-S!!PDF-E.pdf
- [15] Waveguide to Coax Adapters – QWA. In: <https://quinstar.com/> [online]. Torrance: QuinStar Technology, Inc [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://quinstar.com/shop/waveguides-related-products/transitions-adapters/waveguide-to-coax-adapters-qwa/>
- [16] TRL Calibration [online]. Santa Rosa: Keysight Technologies, 2016 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: na.support.keysight.com/pna/help/latest/S3_Cals/TRL_Calibration.htm
- [17] EM.Illumina Tutorial Lesson 1: Analyzing The Scattering From Metal Targets. In: Emagtech Wiki [online]. Ann Arbor: EMAG Technologies Inc., 2016 [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <http://www.emagtech.com/wiki/index.php/File:PHO299.png>

- [18] Radiolokace a radionavigace [online]. In: . s. 12 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/RAR/literatura/Radiolokace_a_radionavigace_2004.pdf
- [19] VAN DIGGELEN, Frank Stephen Tromp. *A-GPS: assisted GPS, GNSS, and SBAS*. Boston: Artech House, 2009. The GNSS technology and applications series (Artech House). ISBN 978-1596933743.

PŘÍLOHY

Příloha A – Přijaté výkony odražené od deště	60
Příloha B – Přijatý výkon odražený od oblak	61
Příloha C – Program v matlabu na výpočet přijatého výkonu	62
Příloha D – Technická výkres impedančního transformátoru	63
Příloha E – Výpočet permitivity, radarové odrazivosti, faktor radarové odrazivosti	64
Příloha F – Manuál k radaru	66

PŘÍLOHA A – PŘIJATÉ VÝKONY ODRAŽENÉ OD DEŠTĚ

Počítané výkony v příloze A i B jsou uvedeny v dBm.

Vzdálenost	1 km	5 km	10 km		1 km	5 km	10 km
R [mm/h]	$\Delta F = 1 \text{ MHz} \Rightarrow h = 150 \text{ m}$			R [mm/h]	$\Delta F = 6 \text{ MHz} \Rightarrow h = 25 \text{ m}$		
0,5	-18,11	-32,09	-38,11	0,5	-25,89	-39,87	-45,89
2	-8,65	-22,63	-28,65	2	-16,44	-30,42	-36,44
8	-0,45	-14,43	-20,45	8	-8,23	-22,21	-28,23
32	6,44	-7,54	-13,56	32	-1,34	-15,32	-21,34
128	12,12	-1,86	-7,88	128	4,33	-9,65	-15,67
R [mm/h]	$\Delta F = 2 \text{ MHz} \Rightarrow h = 75 \text{ m}$			R [mm/h]	$\Delta F = 7 \text{ MHz} \Rightarrow h = 21 \text{ m}$		
0,5	-21,12	-35,10	-41,12	0,5	-26,56	-40,54	-46,56
2	-11,66	-25,64	-31,66	2	-17,11	-31,08	-37,11
8	-3,46	-17,44	-23,46	8	-8,90	-22,88	-28,90
32	3,43	-10,55	-16,57	32	-2,01	-15,99	-22,01
128	9,10	-4,87	-10,90	128	3,66	-10,32	-16,34
R [mm/h]	$\Delta F = 3 \text{ MHz} \Rightarrow h = 50 \text{ m}$			R [mm/h]	$\Delta F = 8 \text{ MHz} \Rightarrow h = 18 \text{ m}$		
0,5	-22,88	-36,86	-42,88	0,5	-27,14	-41,12	-47,14
2	-13,43	-27,40	-33,43	2	-17,69	-31,66	-37,69
8	-5,22	-19,20	-25,22	8	-9,48	-23,46	-29,48
32	1,67	-12,31	-18,33	32	-2,59	-16,57	-22,59
128	7,34	-6,64	-12,66	128	3,08	-10,90	-16,92
R [mm/h]	$\Delta F = 4 \text{ MHz} \Rightarrow h = 37 \text{ m}$			R [mm/h]	$\Delta F = 9 \text{ MHz} \Rightarrow h = 16 \text{ m}$		
0,5	-24,13	-38,11	-44,13	0,5	-27,65	-41,63	-47,65
2	-14,67	-28,65	-34,67	2	-18,20	-32,18	-38,20
8	-6,47	-20,45	-26,47	8	-9,99	-23,97	-29,99
32	0,42	-13,56	-19,58	32	-3,10	-17,08	-23,10
128	6,09	-7,88	-13,91	128	2,57	-11,41	-17,43
R [mm/h]	$\Delta F = 5 \text{ MHz} \Rightarrow h = 30 \text{ m}$			R [mm/h]	$\Delta F = 10 \text{ MHz} \Rightarrow h = 15 \text{ m}$		
0,5	-25,10	-39,08	-45,10	0,5	-28,11	-42,09	-48,11
2	-15,64	-29,62	-35,64	2	-18,65	-32,63	-38,65
8	-7,44	-21,41	-27,44	8	-10,45	-24,43	-30,45
32	-0,55	-14,52	-20,55	32	-3,56	-17,54	-23,56
128	5,13	-8,85	-14,87	128	2,12	-11,86	-17,88

PŘÍLOHA B – PŘIJATÝ VÝKON ODRAŽENÝ OD OBLAK

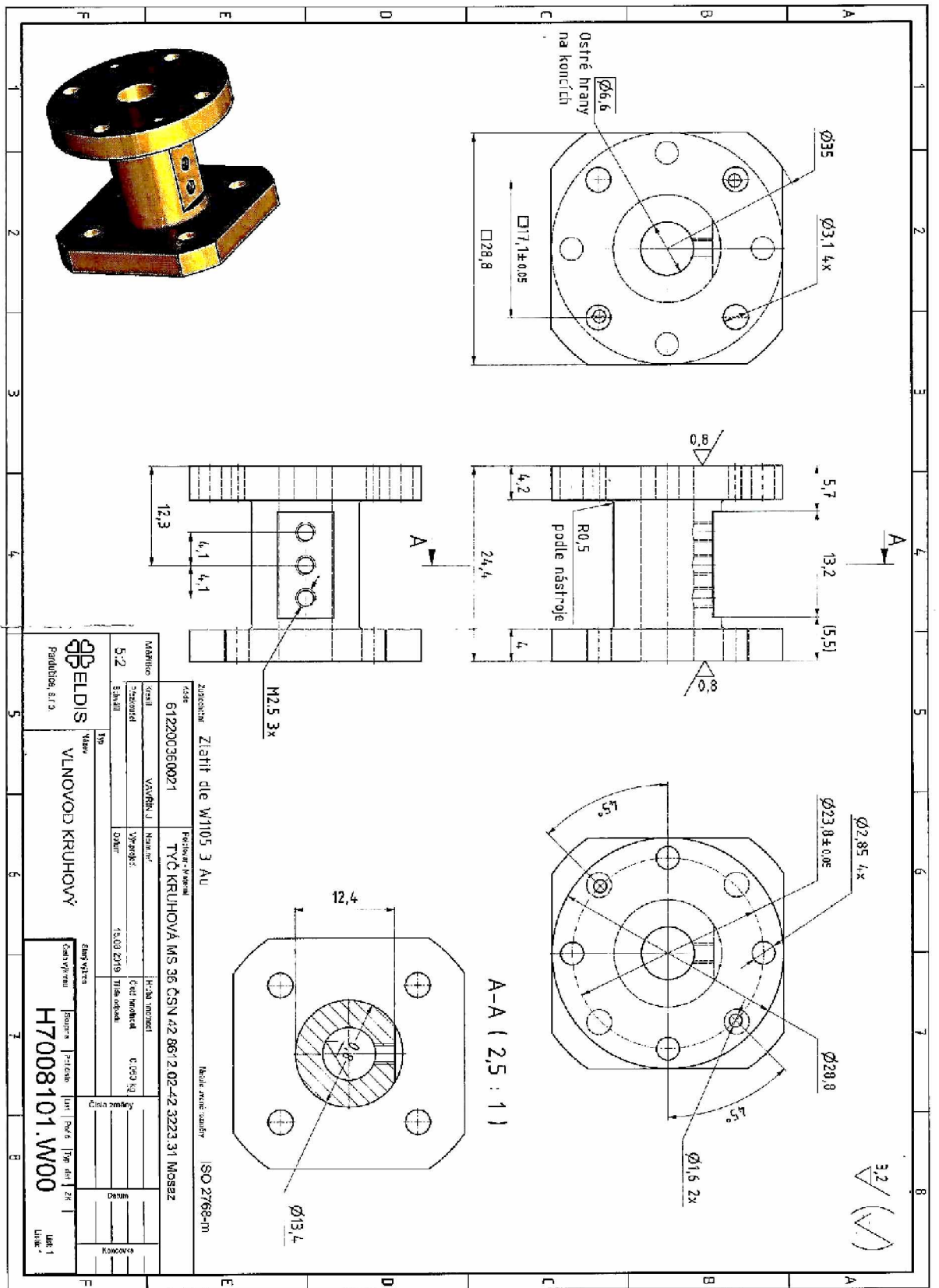
Vzdálenost	500 m	700 m	900 m	1 km	5 km	10 km
Dstřední [mm]	$\Delta F = 1 \text{ MHz} \Rightarrow h = 150 \text{ m}$					
6	-54,57	-57,49	-59,67	-60,59	-74,57	-80,59
10	-41,26	-44,18	-46,37	-47,28	-61,26	-67,28
14	-32,64	-35,56	-37,74	-38,66	-52,64	-58,66
Dstřední [mm]	$\Delta F = 2 \text{ MHz} \Rightarrow h = 75 \text{ m}$					
6	-57,58	-60,50	-62,68	-63,60	-77,58	-83,60
10	-44,27	-47,19	-49,38	-50,29	-64,27	-70,29
14	-35,65	-38,57	-40,75	-41,67	-55,65	-61,67
Dstřední [mm]	$\Delta F = 3 \text{ MHz} \Rightarrow h = 50 \text{ m}$					
6	-59,34	-62,26	-64,44	-65,36	-79,34	-85,36
10	-46,03	-48,95	-51,14	-52,05	-66,03	-72,05
14	-37,41	-40,33	-42,51	-43,43	-57,41	-63,43
Dstřední [mm]	$\Delta F = 4 \text{ MHz} \Rightarrow h = 37 \text{ m}$					
6	-60,59	-63,51	-65,69	-66,61	-80,59	-86,61
10	-47,28	-50,20	-52,39	-53,30	-67,28	-73,30
14	-38,66	-41,58	-43,76	-44,68	-58,66	-64,68
Dstřední [mm]	$\Delta F = 5 \text{ MHz} \Rightarrow h = 30 \text{ m}$					
6	-61,56	-64,48	-66,66	-67,58	-81,56	-87,58
10	-48,25	-51,17	-53,36	-54,27	-68,25	-74,27
14	-39,63	-42,55	-44,73	-45,65	-59,63	-65,65
Dstřední [mm]	$\Delta F = 6 \text{ MHz} \Rightarrow h = 25 \text{ m}$					
6	-62,35	-65,27	-67,45	-68,37	-82,35	-88,37
10	-49,04	-51,96	-54,15	-55,06	-69,04	-75,06
14	-40,42	-43,34	-45,52	-46,44	-60,42	-66,44
Dstřední [mm]	$\Delta F = 7 \text{ MHz} \Rightarrow h = 21 \text{ m}$					
6	-63,02	-65,94	-68,12	-69,04	-83,02	-89,04
10	-49,71	-52,63	-54,82	-55,73	-69,71	-75,73
14	-41,09	-44,01	-46,19	-47,11	-61,09	-67,11
Dstřední [mm]	$\Delta F = 8 \text{ MHz} \Rightarrow h = 18 \text{ m}$					
6	-63,60	-66,52	-68,70	-69,62	-83,60	-89,62
10	-50,29	-53,21	-55,40	-56,31	-70,29	-76,31
14	-41,67	-44,59	-46,77	-47,69	-61,67	-67,69
Dstřední [mm]	$\Delta F = 9 \text{ MHz} \Rightarrow h = 16 \text{ m}$					
6	-64,11	-67,03	-69,22	-70,13	-84,11	-90,13
10	-50,80	-53,73	-55,91	-56,82	-70,80	-76,82
14	-42,18	-45,10	-47,28	-48,20	-62,18	-68,20
Dstřední [mm]	$\Delta F = 10 \text{ MHz} \Rightarrow h = 15 \text{ m}$					
6	-64,57	-67,49	-69,67	-70,59	-84,57	-90,59
10	-51,26	-54,18	-56,37	-57,28	-71,26	-77,28
14	-42,64	-45,56	-47,74	-48,66	-62,64	-68,66

PŘÍLOHA C – PROGRAM V MATLABU NA VÝPOČET PŘIJATÉHO VÝKONU

Vstupnímu parametry jsou: šířka pásma (frekvenční zdvih) B, délka pixelu h, zisk G, vyzařovací úhel theta, vysílaný výkon P_v a kmitočet na kterém radar vysílá f, radarová odrazivost eta a vzdálenost cíle r. Výstupními parametry jsou přijatý výkon od deště P_{pd} a přijatý výkon od oblak P_{po} .

```
clc;clear;close all;
f = 35.4*10^9; %kmitočet radaru v Hz
G = 10^(45/10); % zisk vysilací/přijímací antény v poměrných jednotkách
theta = deg2rad(0.672); %šířka anténního svazku v rad
Pv = 4*10^3; %vysílaný výkon mW
c = 300*10^6; %rychlost světla v m/s
lambda = c/f; %vlnová délka v metrech
j= 1;h = 1;i = 1;k=1; %pomocné proměnné
for B = 1*10^6:1*10^6:10*10^6; %šířka pásma (frekvenční zdvih)
    h = c/(2*B); %délka pixelu
    for r = [1000,5000,10000]; %vzdálenost
        for eta = [9.137,80.558,533.259,2605.877,9616.992]; %radarová odrazivost deště
            Ppd(i,k,j) = 10*log(((lambda^2)*(G^2)*Pv*(theta^2)*h)/...
                ((2^9)*(pi^2)*log(2))*(eta/r^2)); %přijatý výkon od deště
            i = i+1;
        end
        k = k+1;
        i=1;
    end
    i = 1; k=1;
    for r = [500, 700, 900, 1000, 5000, 1000]; %vzdálenosti
        for eta = [5.160960*10^-4,1.105171*10^-2,8.050625*10^-2]; %radarová odrazivost oblak
            Ppo(i,k,j) = 10*log(((lambda^2)*(G^2)*Pv*(theta^2)*h)/...
                ((2^9)*(pi^2)*log(2))*(eta/r^2)); %přijatý výkon od oblak
            i = i+1;
        end
        k = k+1;
        i=1;
    end
    k =1;
    j=j+1;
end
```

PŘÍLOHA D – TECHNICKÁ VÝKRES IMPEDANČNÍHO TRANSFORMÁTORU



PŘÍLOHA E – VÝPOČET PERMITIVITY, RADAROVÉ ODRAZIVOSTI, FAKTOR RADAROVÉ ODRAZIVOSTI

Vstupními parametry jsou teplota T, rychlost světla frekvence, na které vysílá radar f, vodivost dielektrika. Dále parametry navrhnuté pro spektra dvou druhů mlhy z doporučení ITU - R, viz kapitola 2.1.2. Výstupními parametry jsou: parametr vody K, komplexní relativní permitivita vody EPSr, efektivní odrazná plocha EOP, radarová odrazivost ETA, faktory radarové odrazivosti z (malé z) a Z (velké Z).

```
clc; clear; close all;

T = 15; % teplota ve stupních Celsia
c = 300*10^6; % rychlost světla v m/s
f = 35.4*10^9; % frekvence radaru v Hz
LAMBDA = c/f*100; % vlnová délka v cm

%vodivost dielektrika
sigma = 12.5664*10^8; %1/m
%parametr rozprostření
alfa = -(18.8129/(T+273))+0.0609265;
%relativní permitivita na nízkých frekvencích
EPSs = 78.54*(1-((4.5979*10^-3)*(T-25))+((1.19*10^-5)*(T-25)^2)-((2.8*10^-8)*((T-25)^3)));
%relativní permitivita na vysokých frekvencích
EPSinf = 5.27137 + 0.0216474*T - 0.00131198*(T^2);
%kritická vlnová délka (maximální dielektrické ztráty) v cm
LAMBDAc=0.00033836*exp(2513.98/(T+273));
%výpočet komplexní relativní permitivity
Ereal = EPSinf + (((EPSs-EPSinf)*(1+((LAMBDAc/LAMBDA)^(1-alfa))*sin((alfa*pi)/2)))/...
(1+2*((LAMBDAc/LAMBDA)^(1-alfa))*sin((alfa*pi)/2)+(LAMBDAc/LAMBDA)^(2*(1-alfa))));
Eim = (((EPSs-EPSinf)*((LAMBDAc/LAMBDA)^(1-alfa))*cos((alfa*pi)/2))/...
(1+2*((LAMBDAc/LAMBDA)^(1-alfa))*sin((alfa*pi)/2)+(LAMBDAc/LAMBDA)^(2*(1-
alfa)))+(sigma*LAMBDA)/(18.8496*10^10));
%komplexní relativní permitivita
EPSr = Ereal - 1i*Eim;
%absolutní hodnota komplexní relativní permitivity
EPSr1 = EPSinf+(EPSs-EPSinf)/(1+(LAMBDAc/LAMBDA)^2);
%Parametr K vody
K = abs((EPSr1-1)/(EPSr1+2));

%% Hustá advekční mlha - modální poloměr r = 10um

D1 = 2:2:70; % um
z = 0; ETA = 0;
N1 = zeros(1,length(D1));
EOP = zeros(1,length(D1)-1);
a = 0.027; b = 0.3; ALFA1 = 3;

for i=1:length(D1)-1
    N1(i) = a*((D1(i)/2)^ALFA1)*exp(-(b*(D1(i)/2))); %spektrum oblačných kapek 1/um*cm3
    z = z + (((D1(i+1)^6)*N1(i+1))+((D1(i)^6)*N1(i)))/2*(D1(i+1)-D1(i)); %faktor radarové
odrazivosti um^6/cm^3
    EOP(i) = ((K^2)*(pi^5)*(D1(i)*10^-3)^6)/((LAMBDA*10)^4); %efektivní odrazná plocha mm^2
end

for k=1:length(EOP)-1
ETA = ETA + (((EOP(k+1)*N1(k+1))+ (D1(k)*N1(k)))/2)*(D1(k+1)-D1(k)); %radarová odrazivost
mm^2/cm^3
end
ETA = ETA*10^-6; %radarová odrazivost mm^2/m^3

z = z*10^-12; %faktor radarové odrazivosti mm6/m3
Z = 10*log10(z); %faktor radarové odrazivosti dBz

%% Mírná radiační mlha - modální poloměr r = 2um
```

```

D2 = 2:1:35; % um
z2 = 0; ETA2 = 0;
N2 = zeros(1,length(D2));
EOP2 = zeros(1,length(D2)-1);
a2 = 607.5; b2 = 3; ALFA2 = 6;

for ii=1:1:length(D2)-1
    N2(ii) = a2*((D2(ii)/2)^ALFA2)*exp(-(b2*(D2(ii)/2))); %spektrum oblačných kapek 1/um*cm3
    z2 = z2 + (((D2(ii+1)^6)*N2(ii+1)) + ((D2(ii)^6)*N2(ii)))/2 * (D2(ii+1)-D2(ii)); %faktor
    radarové odrazivosti um^6/cm^3
    EOP2(ii) = ((K^2)*(pi^5)*((D2(ii)*10^-3)^6))/((LAMBDA*10)^4); %efektivní odrazná plocha
    mm^2
end

for kk=1:1:length(EOP2)-1
    ETA2 = ETA2 + ((EOP2(kk+1)*N2(kk+1)) + (D2(kk)*N2(kk)))/2 * (D2(kk+1)-D2(kk)); %radarová
    odrazivost mm^2/cm^3
end
ETA2 = ETA2*10^-6; %radarová odrazivost mm^2/m^3

z2 = z2*10^-12; %faktor radarové odrazivosti mm6/m3
Z2 = 10*log10(z2); %faktor radarové odrazivosti dBz

figure(1);
semilogy(D1, N1, D2,N2);
xlabel('Průměr oblačných kapek [um]');
ylabel('Spektrum oblačných kapek [1/um*cm^3]');
title('Spektrum oblačných kapek');
legend('Hustá advekční mlha','Mírná radiační mlha');
grid on

figure(2);
semilogy(2:2:69,EOP);
xlabel('Průměr oblačných kapek [um]');
ylabel('Efektivní odrazná plocha [mm^2]');
title('Efektivní odrazná plocha');
grid on

fprintf ('\n\t z1:%9.4f mm6/m3 \t Z2:%6.2f dBz\n',z,Z);
fprintf ('\n\t z2:%9.4e mm6/m3 \t Z2:%6.2f dBz\n',z2,Z2);
fprintf ('\n\t eta1:%9.4e mm^2/m^3\t eta2: %9.4e mm^2/m^3\n',ETA,ETA2);

```


PŘÍLOHA F – MANUÁL K RADARU

1 SESTAVENÍ RADARU

Radar je vhodné při sestavování umístit na stůl do míst kde je možný výhled do volného prostoru tak, aby při spuštění radaru nedošlo k poškození přijímače radaru vlivem odrazu vysílaného signálu od blízké překážky. Samotný radar je nutné umístit do stojanu, jež je pro tyto účely určený. Stojan je vyobrazen na obrázku 1 a slouží i k elevačnímu pohybu antény.

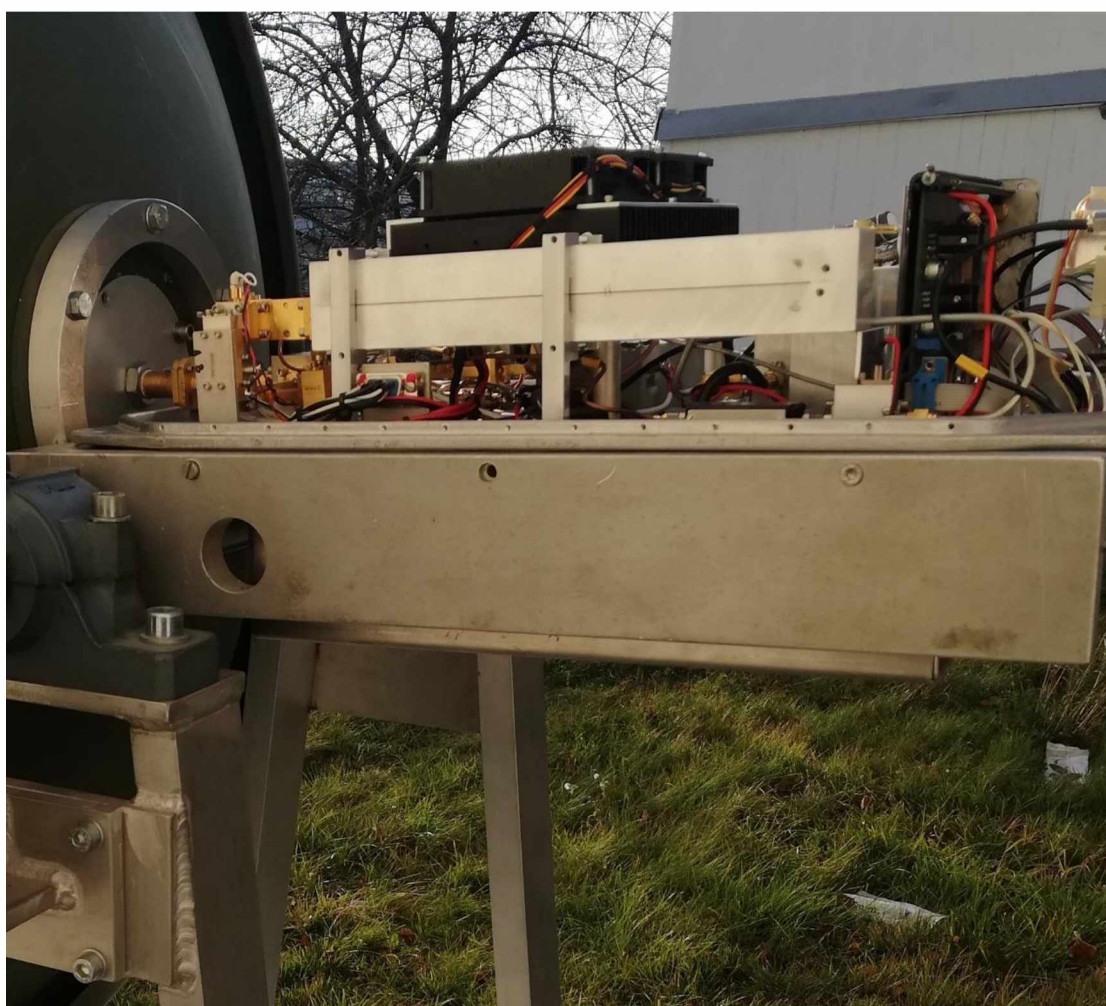


Obrázek 1 - Stojan radaru (elevátor)

Nejprve z radaru sejmeme kryt (šasi) chránící milimetrovou techniku a elektronické obvody. Tento krok lze provést také po vložení radaru do stojanu. Bude tím zajištěna bezpečnost vnitřních obvodů na úkor manipulovatelnosti. Vložíme „tělo“ radaru do držáku, jak můžeme vidět na obrázku 3. A následně radar zajistíme pomocí šroubů umístěných na boku radaru (viz. obrázek 2). Tímto je zajištěno, že radar při naklonění nevypadne ze stojanu.

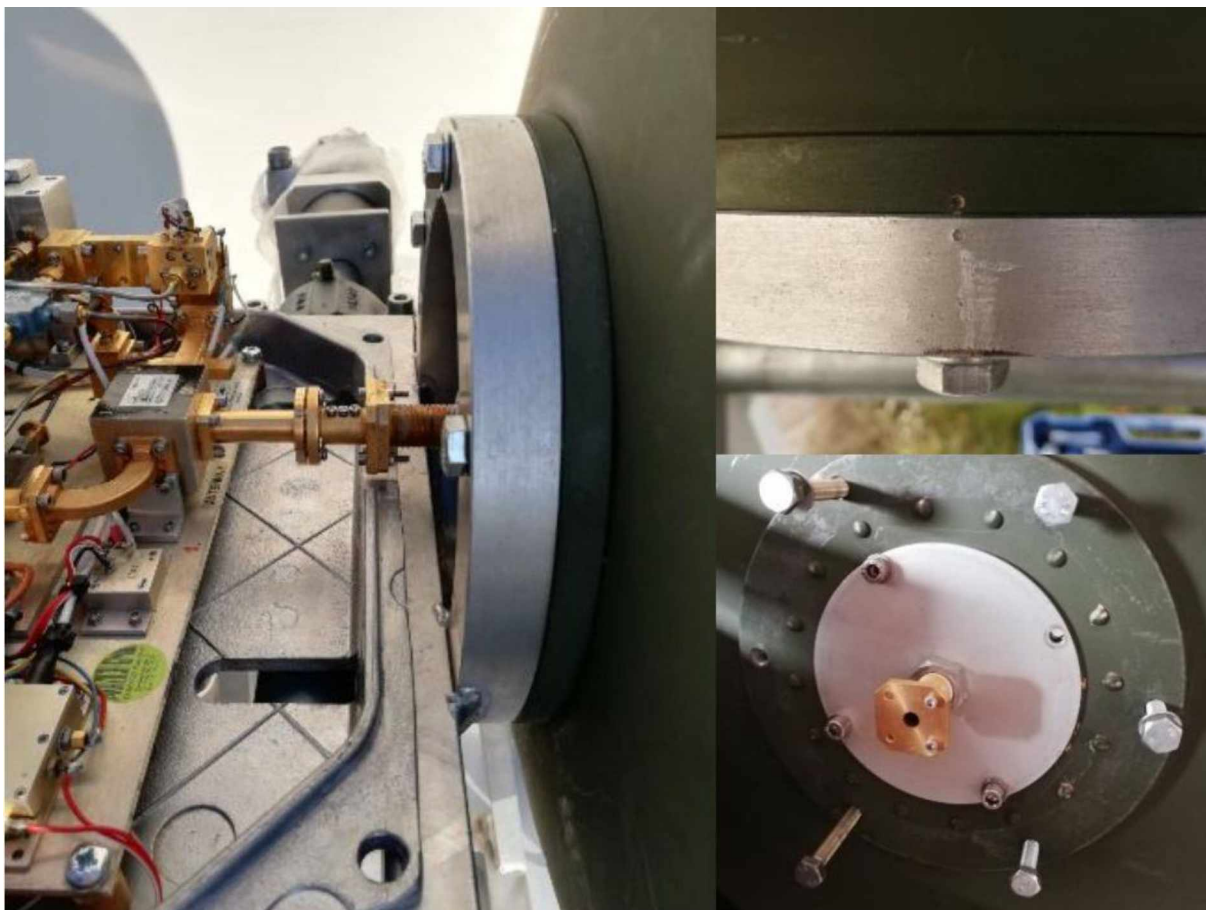


Obrázek 2 - Šrouby pro upevnění do držáku



Obrázek 3 - Uložení radaru v držáku.

Dalším krokem sestavení radaru je připevnění antény ke kruhovému držáku a vlnovodu radaru. Na anténě i držáku je vyznačeno, jak má být anténa k držáku přidělána. Značka zajišťuje správné dosednutí vlnovodu antény na impedanční transformátor. Správně přidělána anténa je na obrázku 4, na tomto obrázku jsou vidět i značky a zadní část antény. Je nutné dotáhnout šrouby na držáku pomocí stranového klíče, jako i šrouby spojující vlnovod s impedančním transformátorem spojené šrouby s vnitřním šestihranem „imbusem“ a jsou jištěny maticí. Posledním krokem je přišroubování ozařovače, viz obrázek 5. Tímto je „mechanická“ kompletace hotova, kryt radaru zatím nenasazujeme, bude potřeba přístup k šroubům impedančního transformátoru.



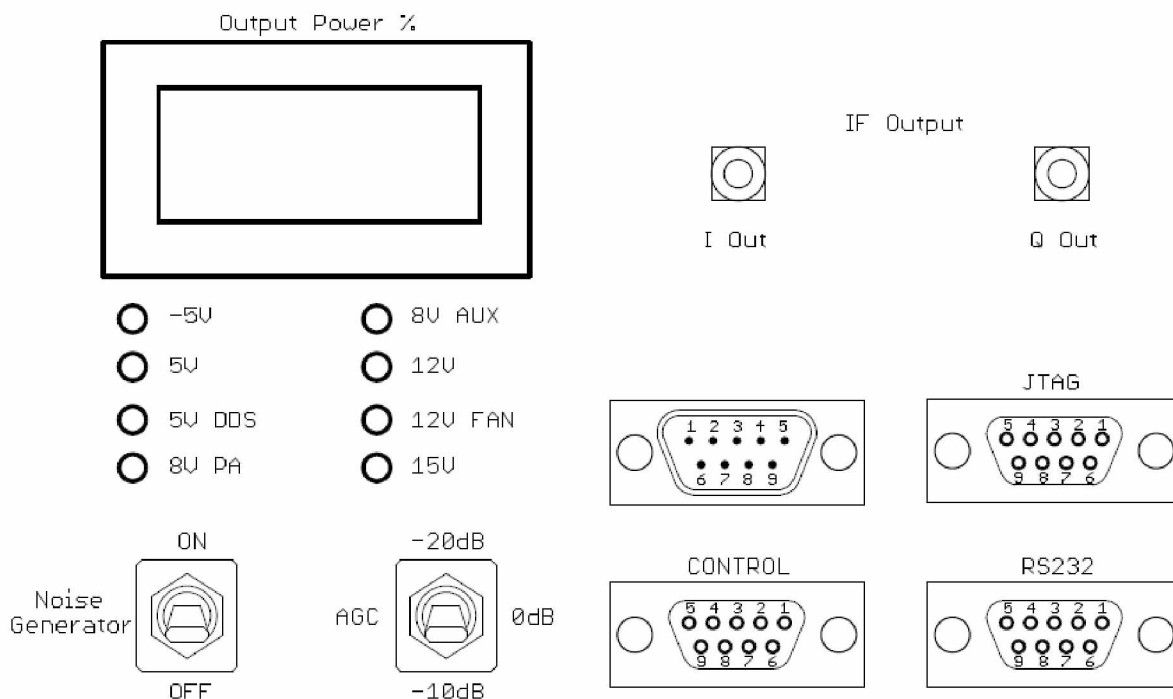
Obrázek 4 - Připevnění antény



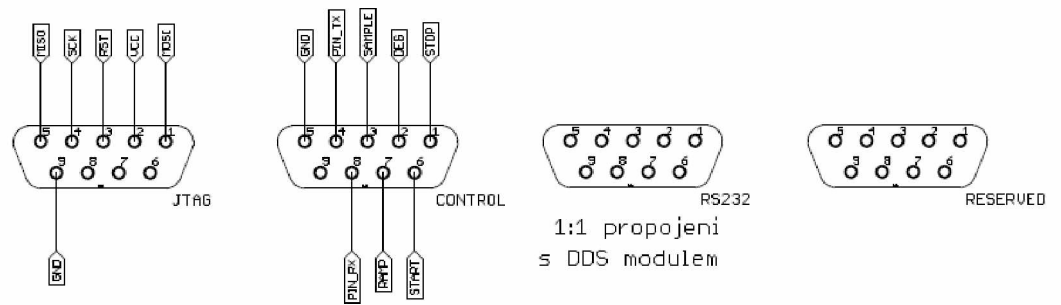
Obrázek 5 - Ozařovač

2 PROPOJENÍ PC A RADARU

Po mechanickém sestavení samotného radaru můžeme začít se zapojováním napájení a ovládání radaru. Na obrázku 6 je schéma rozložení panelu radaru s konektory, displejem, indikačními LED diodami a přepínači. Displej zobrazuje vysílací výkon v procentech, indikační diody signalizují správnost úrovně napětí. Vysvětlivky jsou na obrázku 7. Dvoupolohový přepínač s označením Noise Generator, jak už název napovídá, ovládá šumový generátor. Šumový generátor přes směrovou odbočnici zavádí šum do přijímače hned za trojitým cirkulátorem, přírůstek šumu je asi 4 dB a používá se k hodnocení šumového čísla přijímače během provozu a k orientačnímu impedančnímu přizpůsobení antény. Třípolohový přepínač s názvem AGC ovládá automatické nastavování citlivosti – pokud by byl přijatý signál příliš silný, je možné pomocí tohoto přepínače snížit citlivost o 10 nebo 20 dB. Koaxiální konektory I Out a Q Out jsou výstupy přijatého signálu rozloženého na I a Q složku. Konektor RS-232 s názvem JTAG slouží k připojení počítače umožňující programování radaru. Konektor s názvem CONTROL slouží k ovládání vysílání a příjmu radaru. Konektor s názvem RS232 je sériová linka, ta je napřímo připojena k DDS (Direct Digital Synthesis – Přímá digitální syntéza), tedy přímo na kmitočtovou ústřednu.



Obrázek 6 - Panel radaru



Signalizace správných urovní napeti

-5V - TTL TX, TTL RX, AGC

5V - TTL RX, TTL TX

5V DDS - DDS

8V PA - PA

8V AUX - mikrovlmny díl

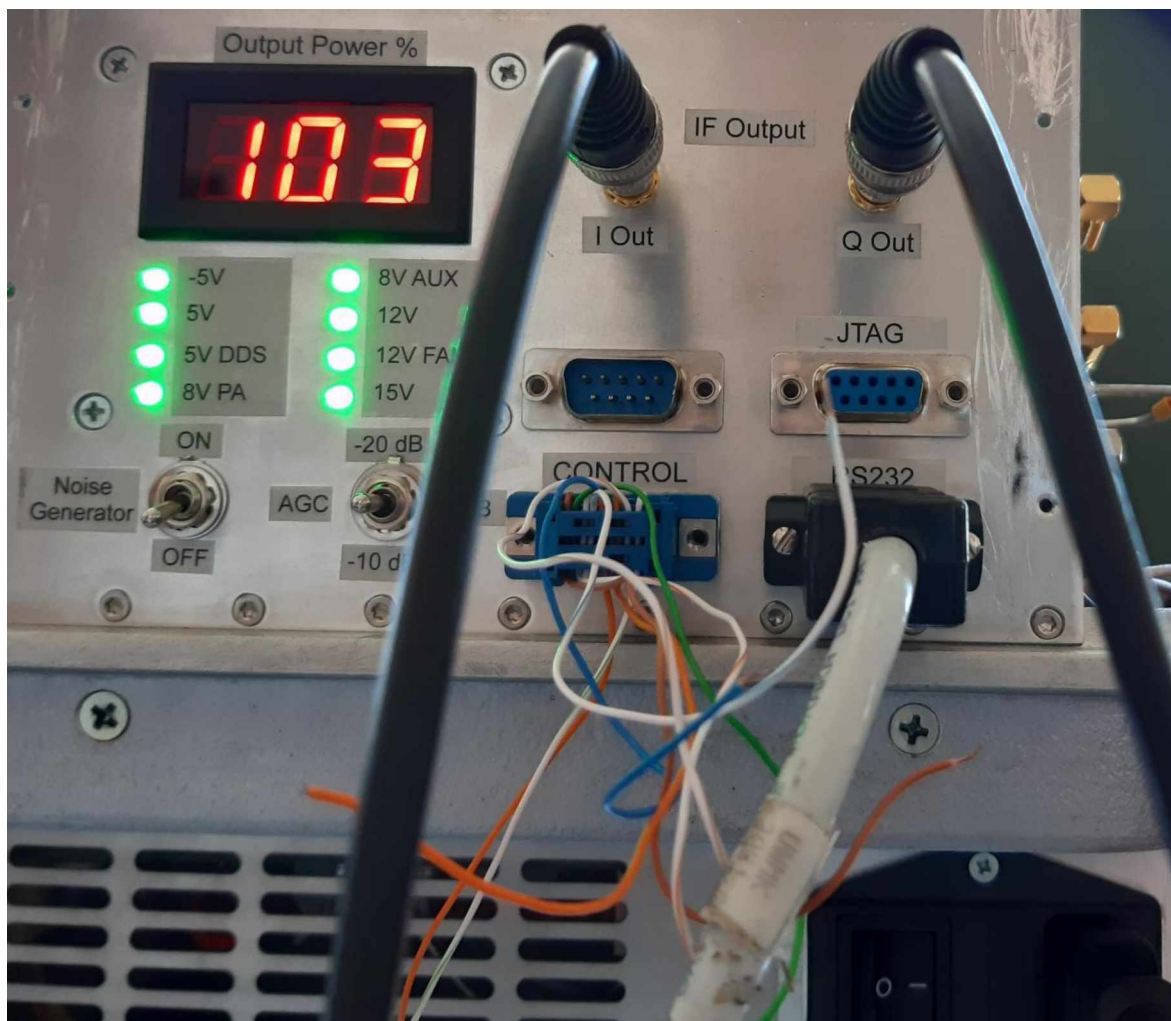
12V - oscilator, predzesilovac 8.85GHz, predzesilovac 35GHz, sumovy generator

12V FAN - ventilatory PA a zdroj

15V - PLL

Obrázek 7 - Zapojení panelu

Na následujících stránkách bude vyobrazeno a popsáno správné zapojení radaru k počítači. Vstupy, respektive výstupy na obrázku 6 a 8 se nachází přímo na „těle“ radaru. I Out a Q Out jsou připojeny pomocí koaxiálních kabelů do bloku stíněných konektorů BNC-2110 na analogové vstupy AI0 => I Out a AI1 => Q Out, přepínač pod analogovým vstupem přepnutý na FS = Floating Source (plovoucí zdroj). Toto se nachází v oblasti ANALOG IN a ANALOG OUT. Dále vede od konektoru CONTROL koaxiální kabel na PFI0/P1.0 v oblasti TRIGGER/COUNTER.

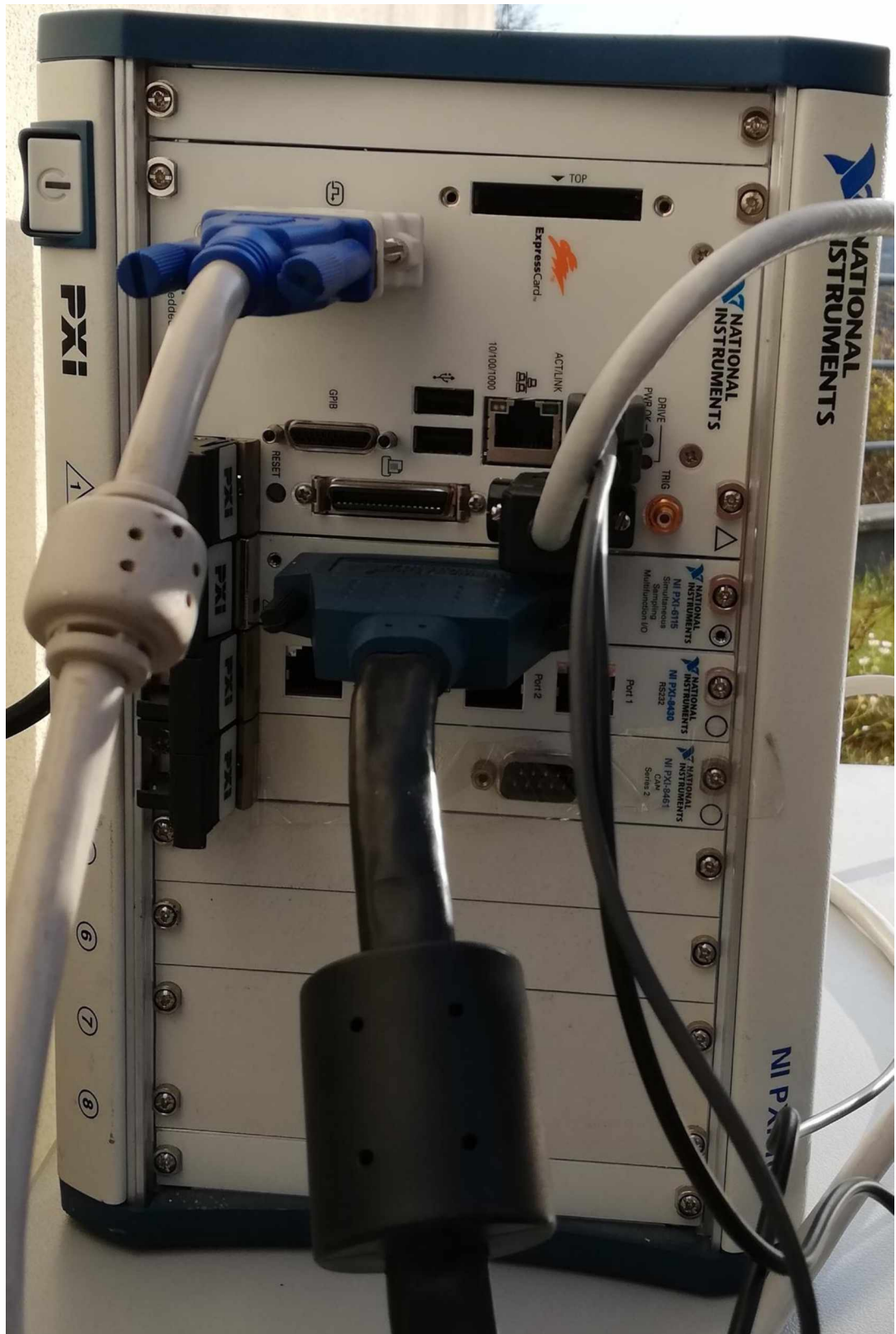


Obrázek 8 - Panel radaru

Radar je s PC propojen nejen pomocí adaptéru BNC-2110 (obrázek 9), ale také pomocí sériové linky z konektoru RS232 do konektoru, jež se nachází na PC pod konektorem ethernetu a USB. Adaptér je připojen na PC do konektoru na kartě dva. Radar je nutné ještě zapojit napájecím kabelem do sítě, poloha zdířky spolu s kolébkovým spínačem pro zapínání radaru je zobrazena ve spodní části na obrázku 8. Tímto máme propojen radar s PC a můžeme začít s připojováním periférií k PC. Konektory zapojené na PC jsou vidět na obrázku 10. Monitor připojíme pomocí VGA kabelu do konektoru, který se na PC nachází vlevo nahoře. Pro ovládání PC připojíme také myš a klávesnici, obojí přes USB.



Obrázek 9 - Adaptér BNC-2110

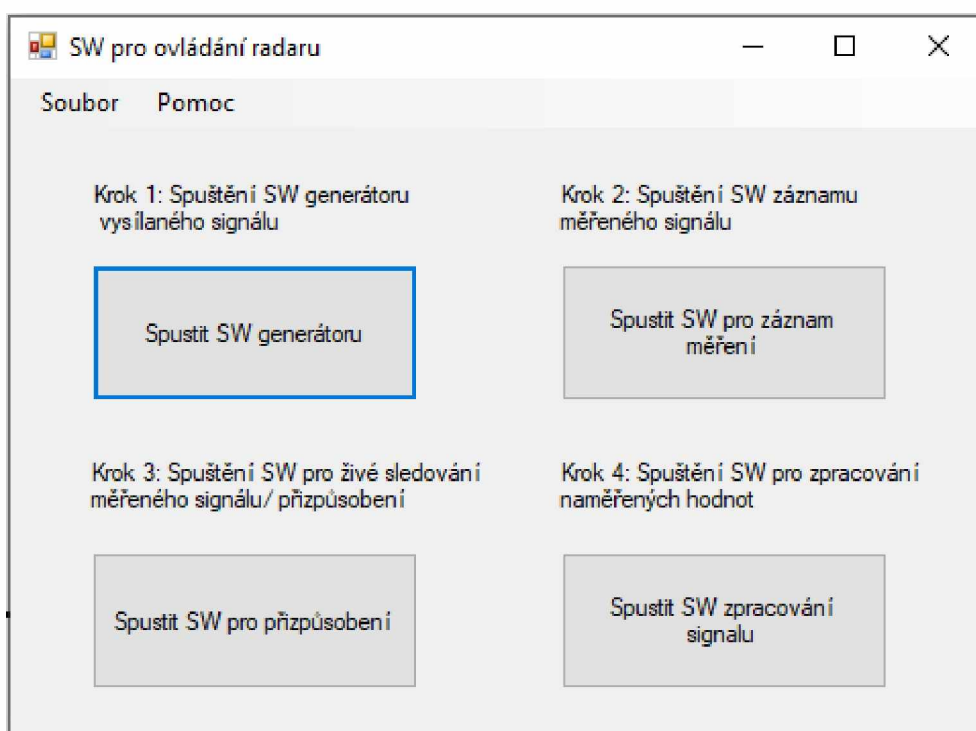


Obrázek 10 - Panel s konektory PC

3 OVLÁDACÍ SW RADARU

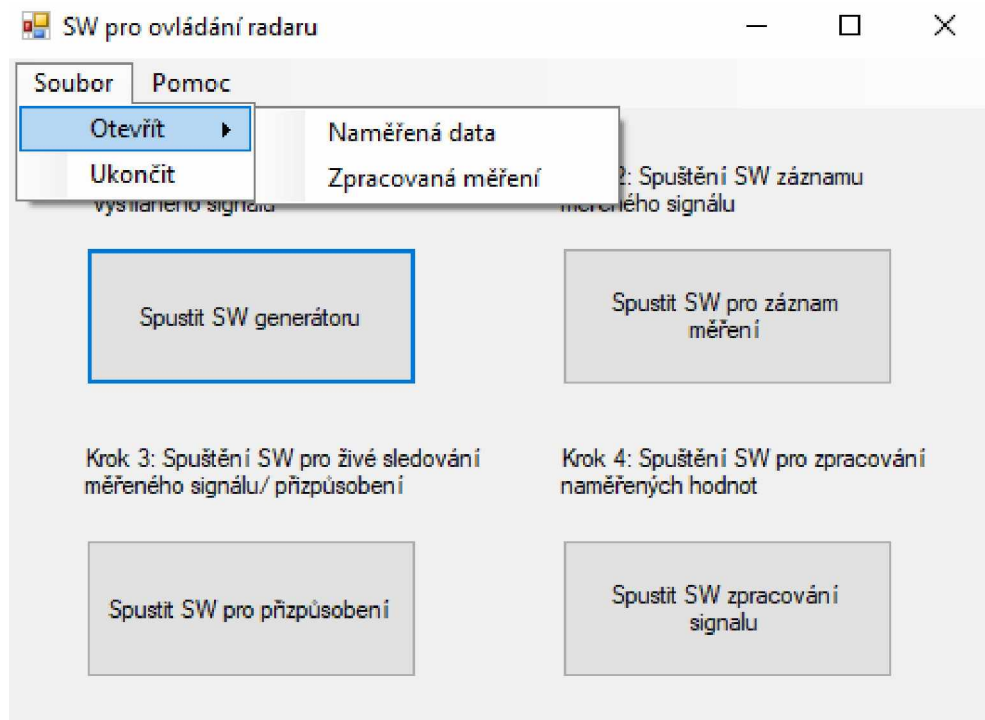
3.1 Hlavní okno programu

Pro ulehčení ovládání radaru jsem vytvořil software, který umožňuje ovládání radaru z jediného okna. Umožňuje také otevření tohoto manuálu k radaru a složek (folderů) do kterých jsou ukládané naměřené hodnoty a také složku se zpracovanými daty. Na obrázku 11 můžeme vidět čtyři ovládací tlačítka: první tlačítko zapíná SW generátoru, druhé tlačítko zapíná SW pro záznam, třetí tlačítko zapíná SW pro živé sledování měření a čtvrté tlačítko spouští SW pro zpracování naměřených hodnot.



Obrázek 11 - První okno ovládacího SW

Na obrázku 12 je vidět menu se záložkami „**Soubor**“ a „**Nápověda**“. V záložce Soubor je rozbalovací seznam se záložkami „**Naměřená data**“ a „**Zpracovaná měření**“. Záložka „**Naměřená data**“ otevírá složku „zmerena_data/IQ“ s naměřenými složkami I a Q. Záložka „**Zpracovaná měření**“ otevře složku „zpracovana_data/puvodni“. Záložka „**Nápověda**“ otevírá tento manuál.

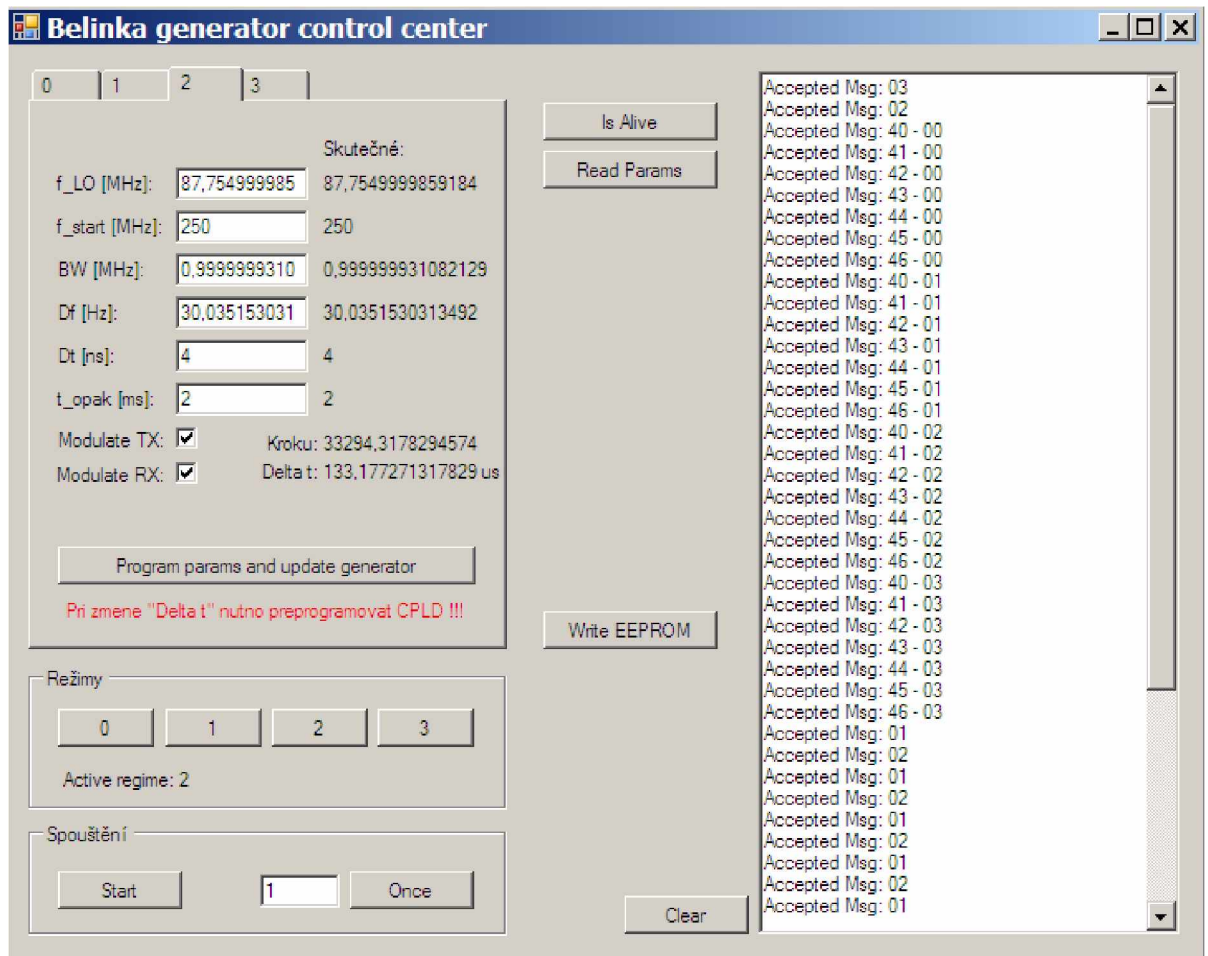


Obrázek 12 - Menu SW

3.2 Generátor Belinka

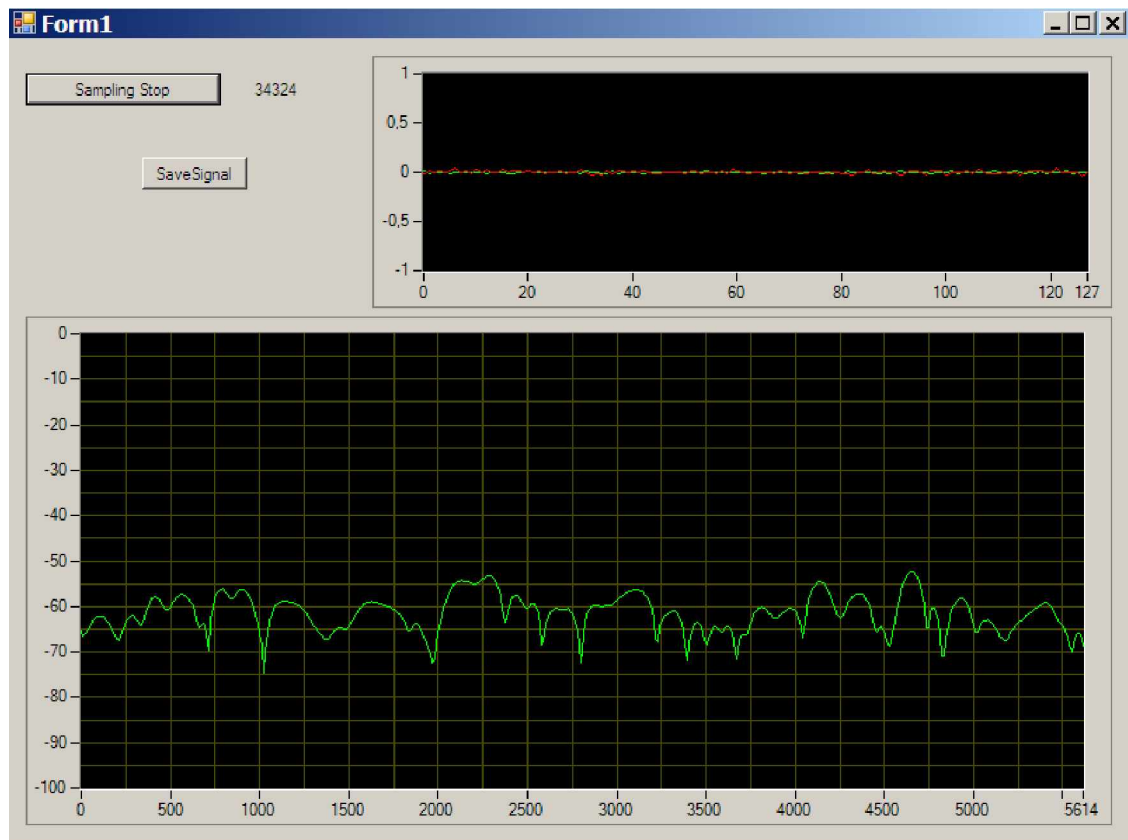
Prvním tlačítkem v SW pro ovládání radaru se otevře SW pro ovládání generátoru radaru, který je vidět na obrázku 13. Tímto SW se spouští vysílání radaru. Po zapojení radaru a spuštění SW generátoru je nutné zmáčknout tlačítko „**Is Alive**“ a pokud vše proběhne v pořádku, objeví se v okně vedle tlačítka: „Accepted Msg: 03“. Tímto je ověřeno, že je radar připojen. Následně je nutné stisknout tlačítko „**Read Params**“ – toto tlačítko vyčte parametry frekvence, šířky pásma, kmitočtového zdvihu, opakovací frekvence a šířky pulzu pro jednotlivé režimy. Pokud výčet parametrů proběhne v pořádku, v okně vedle tlačítka se objeví informace o správně přijatých zprávách v podobě „Accepted Msg:“. Poté je možné vlevo od tlačítka měnit parametry jednotlivých modů radaru. Měnit parametry je však možné pouze přeprogramováním. Pro účely měření stačí pouze vybrat mód v rámečku režimy a stisknout tlačítko „**RUN**“. Jediným použitelným módem v současné době je mód číslo dva. Po stisknutí tohoto tlačítka radar vysílá, následně můžeme SW generátoru minimalizovat a pokračovat zapnutím záznamu, respektive přizpůsobením radaru. Toto bude záležet na tom, zda měření probíhá poprvé od sestavení radaru, nebo již s radarem měření probíhala. Tlačítko „**Program params and update generator**“ uloží nové parametry. Tlačítko „**Write EEPROM**“ přepíše parametry módů v paměti radaru. Při změně a přepsání parametrů je ovšem nutné tyto parametry použít i při

zpracování signálů, které má tyto parametry uložené v pomocných souborech. Proto je nutné měnit parametry s velkou obezřetností.



Obrázek 13 - SW generátoru radaru

3.3 Přizpůsobení radaru



Obrázek 14 - Živé zobrazení/přizpůsobení

Stisknutím třetího tlačítka se spustí program na „živé“ sledování měřeného signálu, popřípadě impedančního přizpůsobení radaru, viz obrázek 14. Sledování měření spustíme tlačítkem „**Sampling Start**“, na obrazovce se objeví „zelená kmitající křivka“, reprezentující měřený signál. Impedanční přizpůsobení radaru a antény probíhá pomocí tří šroubů na impedančním transformátoru (obrázek 15). Je několik možností, jak přizpůsobení provést:

- a. namíření radaru na zdroj šumu (Slunce), postupným šroubováním s jednotlivými šrouby a zároveň sledováním úrovně šumu v programu, dokud nebude úroveň šumu nejnižší možná.
- b. přesněji lze nastavit impedanční přizpůsobení v „laboratorních podmínkách“ změřením impedance radaru a antény a následné nastavení impedančního transformátoru pomocí vektorového analyzátoru.

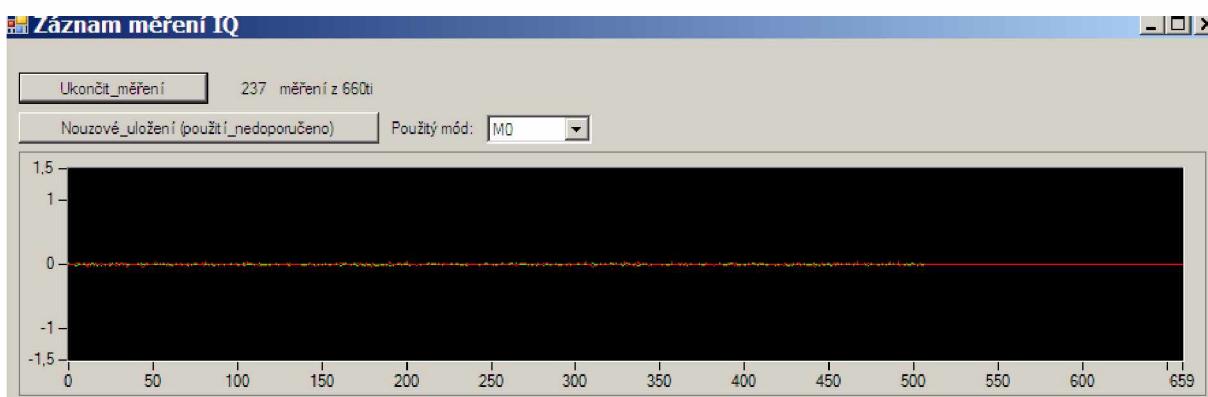
Naměřené hodnoty se dají uložit pomocí tlačítka „**SaveSignal**“. Tyto hodnoty se uloží jako textový soubor na disk C cesta k souboru: „C:\meteoSignal.txt“



Obrázek 15 - Impedanční transformátor

3.4 Záznam měření

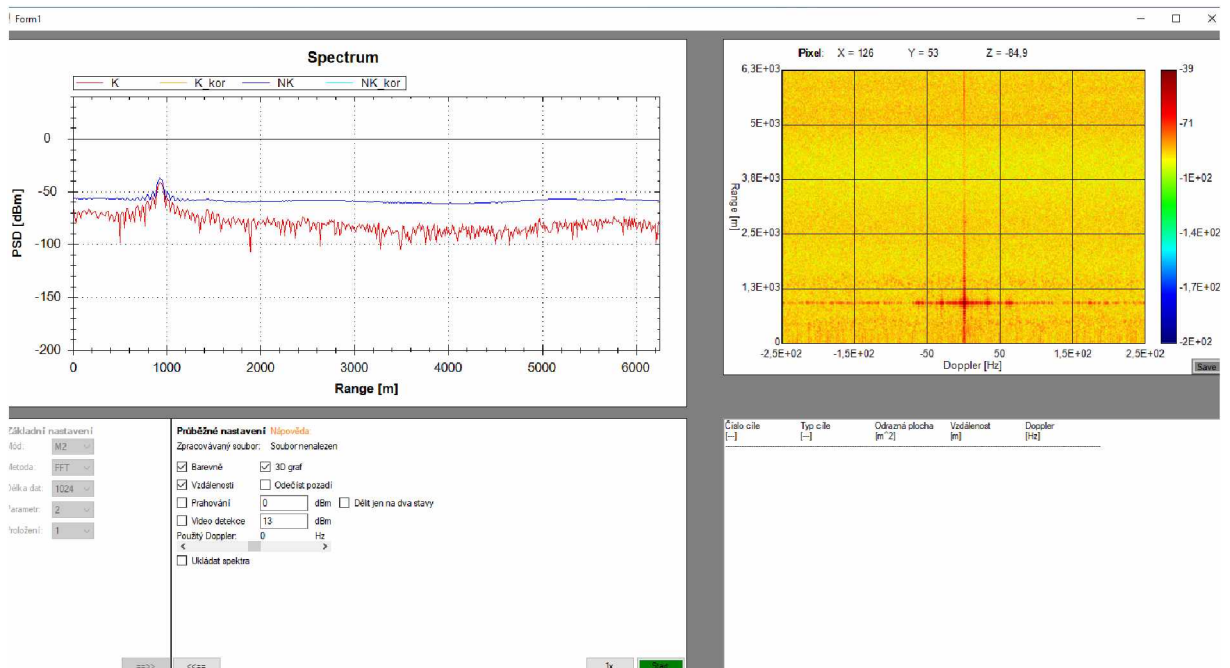
Po přizpůsobení impedance (nutno provádět po každém mechanickém připojení antény) je možné s radarem začít měřit. Je nutné druhým tlačítkem spustit SW pro záznam měření, který je vidět na obrázku 16. Zde v rozbalovacím seznamu zvolíme „Použitý mód“ zvolený v SW generátoru a stiskneme tlačítko „Zahajit měření“. Tímto se zahájí záznam 660 měření, které jsou následně uloženy do souborů s I a Q složkami signálu. Tyto soubory se ukládají do složky „zmerena_data/IQ“, radar je možné nechat měřit nepřetržitě. Toto však generuje velké množství souborů, proto je vhodné nechat radar měřit pouze určitou dobu a pokud zrovna neměříme, je vhodné záznam zastavit.



Obrázek 16 - Záznam měření

3.5 Zpracování měření

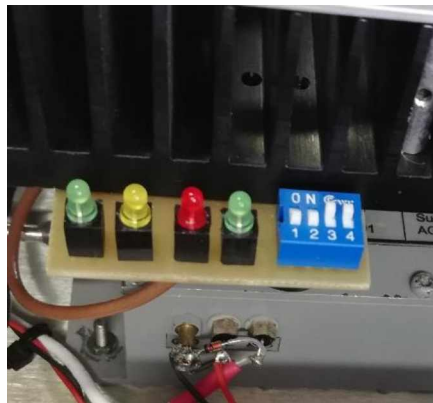
Zmáčknutím čtvrtého tlačítka se otevře SW pro zpracování uložených měření. Grafické rozhraní softwaru je vidět na obrázku 17. V základním nastavení je nutné nastavit „Mód“ ve kterém jsme měřili. „Metoda“ a „Délka dat“ jsou fixní. Dále lze nastavit „Parametr“ – nastavuje parametr filtru FFT a „Proložení“, který nastavuje míru proložení signálu nulami. Tyto nuly do signálu nepřidávají žádnou dodatečnou informaci, používají se pouze pro doplnění signálu, který není v délce násobku dvou (pouze pro FFT). Po nastavení je nutné kliknout na šipku vpravo, tím se dostaneme do „Průběžného nastavení“. Zde lze nastavit vlastnosti grafů a vlastnosti zpracování signálů. Dále si můžeme zvolit, na který „Doppler“ („rychlost pohybu objektu“, Doppler nula = nehybný objekt) chceme sledovat. V pravém dolním rohu lze zvolit, zda se zpracuje pouze jeden soubor s měřením, nebo lze tlačítkem „Start“ zpracovat všechny naměřené soubory. Nejprve se zpracují všechny soubory s I složkami a následně se složkami Q. Po zpracování lze také pomocí tlačítka „Save“ výstupy měření exportovat do obrázků.



Obrázek 17 - Zpracování měření

3.6 Klíčování a výkonový zesilovač

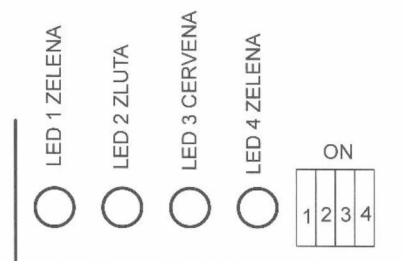
Na obrázku 18 je spínač, kterým lze přepínat klíčování a výkonový zesilovač. Při poloze přepínače jako na obrázku 18 je klíčování a výkonový zesilovač zapnut (spínač 1 a 2 je v poloze OFF a spínač 3 a 4 je v poloze ON). Tento mód je pro běžné měření. Pokud je spínač 1 a 2 je v poloze ON a spínač 3 a 4 je v poloze OFF je klíčování vypnuto a výkonový zesilovač vypnut. V tomto módu je vysílací cesta blokována a přijímací cesta je trvale otevřena, tedy je zajištěno pouze přijímání, tento mód je vhodný pro kalibraci pomocí generátoru na přesné zaměření, popřípadě měření útlumu přijímací cesty. Funkce přepínačů je znázorněna na obrázku 19.



Obrázek 18 - Přepínač pro klíčování a výkonový zesilovač

SW 1,2 ON - klicovani vypnuto
SW 1,2 OFF - klicovani zapnuto
SW 3,4 ON - PA zapnuto
SW 3,4 OFF PA vypnuto

LED 1 +5V
LED 2 PA zaklicovan
LED 3 prekroeni teploty, PA OFF
LED 4 teplota OK



Obrázek 19 - Funkce přepínače