

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Rozbor možností meteorologického radaru

PDCR-35 v pásmu 8 mm

Milan Ptáčník

Diplomová práce

2010

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan PTÁČNÍK**
Osobní číslo: **I08341**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Rozbor možností meteorologického radaru PCDR-35
v pásmu 8mm**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Pro dopplerovský 35 GHz radar PCDR-35 dodávaný do ÚFA AVČR zhodnoťte možnosti identifikace meteorologických cílů se zřetelem na měření oblačných kapiček. Radar popište a proveďte kvalifikovaný odhad přesnosti měření.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

ŘEZÁČOVÁ D., NOVÁK P., KAŠPAR M., SETVÁK M.: Fyzika oblaku a srážek, Academia, 2007. ISBN 978-80-200-1505-1.

FROHBERG J.: Signalgenerierung bei 8,85 GHz mittels direct digital synthesis für ein 35 GHz Wolkenradar, Bachelorarbeit, 2010.

UNIT spol. s.r.o.: Radiokomunikace 2009 (sborník přednášek), Pardubice, 2009.


KLUGMANN D.: Technical description Portable doppler cloud radar at 35 GHz, Listar GMBH, 2008

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.
AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání diplomové práce: **15. ledna 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2010**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2010

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci 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.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 21. 05. 2010

Milan Ptáčník

Poděkování

Moc rád bych chtěl touto cestou poděkovat vedoucímu této diplomové práce panu doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc., který mi věnoval spoustu svého drahocenného času a byl vždy ochotný mi pomoci s jakýmkoliv problémem, který jsem zrovna řešil. Dále bych chtěl poděkovat panu Jaroslavu Zatočilovi, který mi přátelsky radil po technické stránce radaru PDCR-35 a panu RNDr. Janu Kračmárovi, který mi poradil s modulací meteorologického radaru a vyhodnocováním dat.

Milan Ptáčník

Anotace

Pro dopplerovský 35 GHz radar PDCR-35 dodávaný do ÚFA AVČR zhodnotit možnosti identifikace meteorologických cílů, zejména oblačných kapiček a jejich velikostí. Odhadnout přesnost měření a provést analýzu vzorků měření.

Klíčová slova

35 GHz, 8 mm, radar, doppler, meteorologie, analýza, PDCR, FMCW

Title

Analysis of possibilities of meteorological radar PDCR-35 in 8 mm band

Annotation

For 35 GHz Doppler radar PDCR-35 supplied to the UFA AVCR evaluate the possibilities of identification for meteorological targets, in particular, cloud droplets and their sizes. Estimate the accuracy of measurement and analysis samples of measurements.

Keywords

35 GHz, 8 mm, radar, doppler, meteorology, analysis, PDCR, FMCW

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam symbolů	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
1 Úvod	13
2 Radiolokační rovnice	16
2.1 Základní definice	16
2.2 Radiolokační rovnice pro bodový cíl.....	16
2.3 Radiolokační cíl v meteorologii	17
2.4 Radiolokační rovnice v meteorologii	18
2.5 Ekvivalentní faktor radarové odrazivosti	19
3 Útlum signálu	21
3.1 Útlum kyslíkem a vodní párou	21
3.2 Útlum oblaky	21
3.3 Útlum deštěm.....	23
3.3.1 Tvar dešťových kapek	23
3.3.2 Měrný útlum deštěm.....	24
4 Aproximace parametrů hydrometeorologických útvarů	27
4.1 Spektrum velikosti oblačných kapiček	28
4.1.1 Celkový kapalný obsah vody oblačných kapiček.....	31
4.1.2 Vzdálenost mezi oblačnými kapičkami.....	31
4.1.3 Efektivní odrazová plocha oblačné kapičky	31
4.1.4 Radarová odrazivost oblačné kapičky	31
4.1.5 Faktor radarové odrazivosti oblačné kapičky	32
4.2 Spektrum velikosti dešťových kapek	32
4.2.1 Celkový kapalný obsah vody dešťových kapek	35
4.2.2 Intenzita srážek deště.....	35
4.2.3 Rozptylové funkce.....	35
4.2.4 Efektivní odrazová plocha dešťové kapky	36
4.2.5 Radarová odrazivost dešťové kapky.....	36
4.2.6 Ekvivalentní faktor radarové odrazivosti dešťové kapky	37

5	Popis radaru PDCR-35	38
5.1	Anténa.....	38
5.2	Otočný stojan antény	39
5.3	Spodní točna a poklop spodní točny.....	40
5.4	Milimetrová technika.....	41
5.5	Blokové schéma milimetrového bloku	42
5.6	Technické údaje radaru.....	44
6	Monostatický FMCW radar	45
6.1	Výpočet délky pixelu a délky impulsu	45
6.2	Výpočet vzdálenosti cíle a dosahu radaru	47
7	Minimální parametry cíle, které lze ještě radarem detekovat	50
8	V praxi používané jednotky v radarové meteorologii.....	56
9	Postup při vyhodnocování radarových dat	58
10	Radarová síť CZRAD	60
10.1	Aktuální intenzita srážek a radarová odrazivost.....	61
10.2	Radarová pásma.....	62
10.3	Srovnání radaru PDCR-35 s radary ČHMÚ	63
11	Závěr	65
	Literatura	66
	Příloha A – m.file (útlum oblačnými kapičkami)	67
	Příloha B – m.file (útlum dešťovými kapkami)	68
	Příloha C – m.file (aproximace parametrů).....	69
	Příloha D – m.file (spektrum oblačných kapiček)	70
	Příloha E – m.file (spektrum dešťových kapek).....	73
	Příloha F – m.file (monostatický FMCW).....	77
	Příloha G – m.file (dosah radaru PDCR-35).....	78
	Příloha H – m.file (minimální detekce).....	83

Seznam zkratek

AVČR	Akademie Věd České Republiky
CAPPI	Constant Altitude Plan Position Indicator
CD	Compact Disc
CZRAD	CZech RADar network
ČHMÚ	Český HydroMeteorologický Ústav
ČR	Česká Republika
DSD	Drop Size Distribution
EMC	ElectroMagnetic Compatibility
EMP	ElectroMagnetic Pulse
ETOP	horní hranice oblačnosti
EU	Evropská Unie
FMCW	Frequency Modulation Continuous Wave
GAČR	Grantová Agentura České Republiky
ITU-R	International Telecommunication Union – Radio communication
LWC	Liquid Water Content
PDCR-35	Portable Doppler Cloud Radar – 35 GHz
PPI	Plan Position Indicator
PXI	Peripheral eXtensions for Instrumentation
RADAR	RAdio Detecting And Ranging
RV	Radar Volume
ŘLP	Řízení Letového Provozu
SI	le Système International
ÚFA	Ústav Fyziky Atmosféry
VIL	Vertically Integrated Liquid
Z_MAX	průměty maximální odrazivosti

Seznam symbolů

a – výška pixelu

A_{ef} - je efektivní plocha antény

D – průměr dešťové kapky nebo oblačné kapičky

F – modulační zdvih

ΔF – rozdíl modulačního zdvihu přijatého a vyslaného signálu

G – zisk antény

h – délka pixelu

K – konstanta závislá na indexu lomu vody, oblačných kapiček nebo dešťových kapek

N – celkový počet dešťových kapek nebo oblačných kapiček

$n_{O,D}(D)$ – spektrum, n_O oblačných kapiček a n_D dešťových kapek

$P_{t,r}$ – je výkon, P_t – vyslaný a P_r – přijatý

q_w – celkový kapalný obsah vody

R – intenzita srážek

r – vzdálenost cíle

S – plocha podstavy pixelu

$S_{t,r}(r)$ – Hustota výkonu elektrické energie, S_t je v místě cíle a S_r je v místě radaru

V – objem pixelu

Z_e – ekvivalentní faktor radarové odrazivosti

Z - faktor radarové odrazivosti

$\gamma_{c,r}$ – měrný útlum, γ_c oblaky a γ_r deštěm

ε – permitivita vody

η – radarová odrazivost

$\sigma(D)$ – efektivní odrazová plocha

τ – délka pulzu

$\Delta\tau$ – rozdíl délky impulsu přijatého a vyslaného signálu

Seznam obrázků

Obrázek 3-1 – Graf měrného útlumu pro vodní páru γ_{H_2O} a kyslík γ_{O_2} v závislosti na frekvenci f ; Čerchovanou žlutou čarou je zde znázorněna frekvence $f = 35,4$ GHz	21
Obrázek 3-2 – Graf závislosti měrného útlumu v oblacích γ_c na hustotě kapalně vody ρ_w .	23
Obrázek 3-3 – Model tvaru dešťové kapky	24
Obrázek 3-4 – Graf závislosti měrného útlumu γ_r na intenzitě srážek R , kde důležitým faktorem je vertikální polarizace (modrá) a horizontální polarizace (červená).....	25
Obrázek 4-1 – Normalizace sférických částic zpětného rozptylu v průřezu jako funkce vlnové délky λ	27
Obrázek 4-2 – Chrgianovo-Mazinovo rozdělení oblačných kapiček podle velikosti pro daný střední průměr kapičky D_{str} a celkový počet oblačných kapiček N	29
Obrázek 4-3 – Graf spektra oblačných kapiček $n_o(D)$ v závislosti na průměru kapičky D ; Kde střední průměr kapičky $D_{str} = 6$ μm (červená), $D_{str} = 10$ μm (zelená) a $D_{str} = 14$ μm (modrá); Vyznačené body v grafu nalezneme v tabulce 4-2	30
Obrázek 4-4 – Graf spektra dešťových kapek n_D v závislosti na průměru dešťových kapek D ; Kde intenzita srážek $R = 0,5$ mm/h (černá), $R = 2$ mm/h (červená), $R = 8$ mm/h (zelená), $R = 32$ mm/h (modrá), $R = 128$ mm/h (světle modrá); Zvýrazněné body v grafu nalezneme v tabulce 4-5	34
Obrázek 5-1 – Směrová anténa meteorologického radaru PDCR-35.....	38
Obrázek 5-2 – Stojan antény se servomotorem	39
Obrázek 5-3 - Stojan antény s milimetrovou technikou	39
Obrázek 5-4 – Poklop spodní točny	40
Obrázek 5-5 – Spodní točna meteorologického radaru	40
Obrázek 5-6 – Pohled na milimetrový díl ze všech čtyř stran dodaný firmou SPACEK v USA	41
Obrázek 5-7 – Detailní blokové schéma milimetrového bloku PDCR-35	42
5-8 – Zjednodušené blokové schéma milimetrového bloku PDCR-35	43
Obrázek 5-9 – Pohled na milimetrový díl dodaný firmou SPACEK v USA	44
Obrázek 6-1 – Princip funkce a popis veličin při FMCW radiolokaci.....	45
Obrázek 6-2 – Graf závislosti délky pixelu h na modulačním zdvihu F ; Zvýrazněné body na křivce nalezneme v tabulce 6-1	46
Obrázek 6-3 – Graf závislosti délky impulsu τ na modulačním zdvihu F ; Zvýrazněné body na křivce nalezneme v tabulce 6-1	46
Obrázek 6-4 – Graf závislosti vzdálenosti cíle r na rozdílu přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF ; Zvýrazněné body na přímkce nalezneme v tabulce 6-2	48
Obrázek 6-5 – Graf závislosti vzdálenosti cíle r na rozdílu přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF ; Kde $\Delta F = 1$ MHz (žluté hvězdičky), $\Delta F = 2$ MHz (černá), $\Delta F = 3$ MHz (modrá), $\Delta F = 4$ MHz (fialová), $\Delta F = 5$ MHz (červené hvězdičky), $\Delta F = 6$ MHz (zelená), $\Delta F = 7$ MHz (světle modrá), $\Delta F = 8$ MHz (červená), $\Delta F = 9$ MHz (modrá), $\Delta F = 10$ MHz (černé hvězdičky)	49
Obrázek 7-2 – Graf závislosti výšky pixelu a na vzdálenosti cíle r	50
Obrázek 7-1 – Znázornění radiolokace a popsání jednotlivých veličin	50

Obrázek 7-3 – Graf závislosti plochy podstavy válce pixelu S na vzdálenosti cíle r	51
Obrázek 7-4 – Graf závislosti objemu pixelu (BINu) na vzdálenosti cíle r	52
Obrázek 7-5 – Graf závislosti minimální radarové odrazivosti η_{min} na vzdálenosti cíle r ..	52
Obrázek 7-6 – Graf závislosti minimálního součtu efektivních odrazových ploch $\sum\sigma(D)_{min}$ na vzdálenosti cíle r	53
Obrázek 7-7 – Graf závislosti minimálního ekvivalentního faktoru radarové odrazivosti $z_{e_{min}}$ na vzdálenosti cíle r	54
Obrázek 7-8 – Graf závislosti minimálního ekvivalentního faktoru radarové odrazivosti $Z_{e_{min}}$ [dBz] na vzdálenosti cíle r	54
Obrázek 9-1 – grafická interpretace naměřených dat meteorologickým radarem.....	59
Obrázek 10-1 – Kruhy znázorňují maximální dosahy radarů a pro oba radary jsou vyznačeny maximální vzdálenosti vhodné pro určování intenzit srážek, tj. výška maximálně 1500 m nad terénem.....	61
Obrázek 10-2 – Zobrazení intenzity srážek R a faktoru radarové odrazivosti Z nad ČR. ...	62
Obrázek 10-3 – Meteorologický radar Skalky	64
Obrázek 10-4 – Meteorologický radar Brdy	64
Obrázek 10-5 – Stanoviště pro meteorologický radar PDCR-35 (cca 20 m před budovou s okny)	64

Seznam tabulek

Tabulka 3-1 – Hustota kapalné vody v závislosti na velikosti oblaku (FIŠER, 1997).....	22
Tabulka 3-2 - Hodnoty měrného útlumu oblaky γ_c v závislosti na hustotě kapalné vody v oblacích ρ_w	22
Tabulka 3-3 – Hodnoty dešťových intenzit srážek R , které jsou normované.....	24
Tabulka 3-4 – Hodnoty parametrů a , b pro kmitočet 35,4 GHz k vyčíslení měrného útlumu deštěm γ_r jak pro vertikální, tak pro horizontální polarizaci (FIŠER, 1986).....	25
Tabulka 3-5 – Spočítané hodnoty měrného útlumu γ_r v závislosti na intenzitě srážek R ; Nalezneme zde dvě skupiny a to pro horizontální a vertikální polarizaci.....	26
Tabulka 4-1 – Hodnoty vypočítaných velikostních parametrů x pro určení aproximace dešťových kapek i oblačných kapiček.....	28
Tabulka 4-2 - Vypočítané hodnoty spektra oblačných kapiček n_D pro různé průměry kapiček D	30
Tabulka 4-3 - Hodnoty faktoru radarové odrazivosti z a Z pro typické střední průměry kapiček D_{str}	32
Tabulka 4-4 – Vypočítané hodnoty spekter dešťových kapek n_D pro různé průměry dešťových kapek D v závislosti na intenzitě srážek R	33
Tabulka 4-5 – Hodnoty středního průměru dešťových kapek D_{str} a celkového počtu dešťových kapek N v závislosti na intenzitě srážek R	34
Tabulka 4-6 – Hodnoty parametru N_0 a A pro exponenciální spektrum velikosti dešťových kapek n_D a různé typy srážek R	34
Tabulka 4-7 – Hodnoty efektivní odrazové plochy σ a rozptylových funkcí v dopředném i zpětném směru pro déšť.....	36
Tabulka 4-8 – Hodnoty radarové odrazivosti η , faktoru radarové odrazivosti z_e a Z_e pro typické intenzity dešťových srážek R	37
Tabulka 6-1 – Vypočtené hodnoty délky pixelu h a délky impulsu τ v závislosti na modulačním zdvihu F	47
Tabulka 6-2 – Vypočítané hodnoty vzdálenosti cíle r v závislosti na rozdílu přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF	48
Tabulka 6-3 – Vypočítané hodnoty maximální vzdálenosti cíle r_{max} (ovšem pokud bude cíl detekovatelný) v závislosti na maximálním rozdílu přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF_{max}	49
Tabulka 7-1 – Vypočítané hodnoty jednotlivých veličin pixelu pro vzdálenost cíle $r = 1 - 10$ km při délce pixelu $h = 1$ m.....	55
Tabulka 10-1 – Používaná frekvenční pásma v radarové technice.....	62
Tabulka 10-2 – Jednotlivé parametry.....	63

1 Úvod

Radar je radioelektronický systém skládajícím se z vysílače, antény, přijímače a vyhodnocovací jednotky. Radar vysílá elektromagnetické vlny a odražené od cíle je opět přijímá. Měří tak vzdálenost (polohu) cíle a jeho vlastnosti, především odhad velikosti či mohutnost cíle.

Ze začátku se radary používaly pouze k lokalizaci lodí a letadel, postupně se však jejich využití rozšiřuje na měření rychlosti vozidel, výšky hladin řek apod. Nemalou úlohu hrají radary v meteorologii. Původně lokalizovaly srážkové oblasti, postupně byly schopny odhadovat intenzitu srážek a s vývojem radiolokační technologie je možné i studovat oblaka, protože oblaka se radarově sledují v pásmech 24, 35 a 94 GHz a technologie na těchto velmi vysokých kmitočtech byla zvládnuta teprve poměrně nedávno.

Ústav fyziky atmosféry Akademie věd České republiky (dále jen ÚFA) požádal v souladu se schváleným výzkumným záměrem ÚFA AVČR AV0Z30420517 „Studium atmosférického obalu Země v interakci s pozemskými a kosmickými vlivy“ o přidělení prostředků na oblačný radar. Jeho měření umožní prohloubit poznatky fyzikálních a chemických vlastností mlh, oblaků a usazených srážek. Získané výsledky najdou uplatnění při posuzování vlivu atmosférického znečištění na jednotlivé ekosystémy a na kvalitu životního prostředí, při vývoji metod předpovědi srážek a při studiu spolehlivosti optických a radioreléových spojů.

Při výzkumu chemických a fyzikálních vlastností bude přístroj využit k měření LWC a DSD při mlžných epizodách a v oblacích. Zároveň bude využit ke kalibraci stávajících zařízení pro odběr vzorků mlžné (oblačné) vody, jejich vylepšení a modernizaci tak, aby bylo možné separovat vybraná velikostní spektra vodních kapek. Výsledky měření umožní posouzení vlivu LWC a DSD na pohlcování (vymývání) polutantů z atmosféry a jejich depozici v přírodě. Přispěje rovněž ke zlepšení modelů mokré depozice a zdokonalení zařízení pro odběr vzorků mlžné vody (separace vzorků s různými DSD).

Kromě výzkumu fyzikálních a chemických vlastností mlh a oblačnosti bude přístroj zároveň sloužit k dalším výzkumným aktivitám oddělení meteorologie ÚFA, zejména pro zkvalitnění předpovědi srážek a spolehlivosti optických spojů.

V oblasti výzkumu perspektivních optických spojů se měření využijí k předpovědi útlumu optického signálu v mlze a v oblacích. Údaje o DSD v mlze se použijí k formulování a verifikaci primárního vztahu mezi měrným útlumem signálu optického spoje v mlze a dohledností. Stanoviště Milešovka se proto již vybavilo experimentálním dvouvlenným optickým spojením v rámci grantu GAČR 102/05/0571 „Metody zvyšující spolehlivost optických směrových spojů“.

Jelikož přístroj měří DSD nejenom v oblacích a mlze, ale též v dešti, použijí se údaje o prostorovém rozvrstvení DSD k formulaci vzorců ke stanovení útlumu radiového signálu v dešti na radioreléových i družicových mikrovlnných spojích.

Samotná možnost měření DSD v prostoru jak v dešti, tak v mlze a oblacích umožní studium obecných cest ke zlepšení interpretace dat meteorologických radiolokátorů.

Na základě měření rozdělení oblačných a dešťových kapek bude možné studovat používané vztahy mezi vertikálním profilem odrazivosti a naměřenými srážkami na zemi. Tento typ měření a vyhodnocování nebyl dosud na území ČR prováděn. Vztahy mezi radarovými měřeními a pozemními intenzitami srážek jsou zásadní jak pro plošnou analýzu srážek, tak i pro velmi krátkodobou předpověď. Analýza a předpověď tvoří základní vstupní data do hydrologických odtokových modelů, které jsou součástí protipovodňového varovného systému.

Naměřená data budou využita při modelování atmosféry numerickým modelem pro předpověď počasí s vysokým rozlišením. Znalost vertikálního profilu rozdělení kapek v atmosféře bude využita k modifikaci modelových parametrů srážkových procesů a dále bude využita při vývoji asimilace srážkových dat do modelu, který v současné době intenzivně probíhá. Na základě měření v našich klimatických podmínkách bude možné upřesnit vztah mezi intenzitou deště a obsahem kapalné vody v mracích, který tvoří základ asimilačních postupů.

Obdobné zařízení nikdy nebylo a není na území ČR, ani ve střední či východní Evropě. Navíc se jedná o progresivní pouze polovodičovou technologii. Předpokládá se, že zařízení bude pracovat v nepřetržitém automatickém provozu na observatoři Milešovka. Data budou k dispozici jednotlivým pracovním kolektivům.

Tato diplomová práce se zabývá základním popisem FMCW radaru a odvozováním vztahů mezi radarem měřenými parametry (přijatý výkon, kmotočtový posuv modulace přijatého signálu apod.) a meteorologickými parametry popisujícími cíl (oblak či srážková oblast), především tedy faktorem radarové odrazivosti v jednotkách dBZ, se kterým se v meteorologii běžně pracuje. Diplomová práce vznikala také jako pomocná příručka k tomuto meteorologickému, přesněji řečeno oblačnému, radaru ÚFA typu PDCR-35. Tento radar umožní i měření velikosti kapiček při vertikálním měření z Dopplerova posuvu přijímaného signálu, tato problematika se však vymyká rámci této práce.

Diplomová práce se zaměřuje i na popis funkce obecných meteorologických radarů. V současné době se radar dokončuje v ČR, ale původně měla tuto zakázku na základě výběrového řízení Německá firma LISTAR GmbH. Tato firma se však bohužel dostala do konkurzního řízení.

Dokončování tohoto FMCW radaru (radar pracující na principu frekvenčně modulované nosné vlny) má po organizační stránce a po stránce interpretace dat měřených radarem na starosti vedoucí diplomové práce pan doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc. Na zkompletování meteorologického radaru pracuje několik osob a v této diplomové práci se naskýtá pohled do všech problematických částí radarové techniky týkající se radaru PDCR-35.

Jako rodák z Kutné Hory jsem měl velké štěstí, jelikož samotná konstrukce tohoto radaru probíhá nedaleko mého rodiště u pana Jaroslava Zatočila. Je velmi praktické mít pohled na radar z hardwarové části a prozkoumat tak jednotlivé části radarové techniky.

V Praze jsem měl konzultaci s panem RNDr. Janem Kračmářem z ŘLP, který mi objasnil některé problémy ohledně fungování meteorologického vyhodnocování cílů pomocí FMCW funkce.

Diplomová práce se dělí na několik částí, kde se pojednává o technické specifikaci meteorologického radaru, odvození radarové rovnice v meteorologii, diskutuje se útlum signálu při šíření radarového signálu reálnou atmosférou, je uvedena aproximace rozdělení velikosti dešťových kapek a oblačných kapiček, jsou vypočítány minimální detekovatelné parametry prostředí oblaků nebo deště a je vypočítán dosah radaru pro 3 vytipované oblačné typy. Zvláštní pozornost je v práci věnována používaným jednotkám v praxi meteorologů, které jsou mimo SI. Radar PDCR-35 je porovnán i s radary ČHMÚ.

Teoretické simulace v aplikaci MATLAB lze nalézt v příloženém CD nebo příloze tohoto dokumentu. Tento software nemá bohužel plnou podporu znaků a tak nezobrazuje určité symboly v popisících grafů a vypisovaných tabulkách.

2 Radiolokační rovnice

V mnoha publikacích, ze kterých bylo do této práce čerpáno, je nelogicky používáno mnoho pojmů a parametrů, ve kterých se lze následně snadno ztratit, protože mnoho autorů značí proměnné tak, jak je zrovna potřeba. Proto je třeba dbát na značení a sjednocení pojmů pro jednotlivé parametry.

U monostatických radarů, což je případ PDCR-35, platí $r_1 = r_2 = r$ a $G_1 = G_2 = G$. Tato skutečnost zjednoduší výpočty a zpřehlední odvozené vztahy. V této části práce se zabýváme rozdílnými vztahy mezi klasickou radiolokací a radiolokací v meteorologii.

2.1 Základní definice

Hustota výkonu (kulové) elektrické energie v místě cíle

$$S_t(r) = \frac{P_t}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (2.1)$$

kde P_t je vyslaný výkon a r je vzdálenost cíle.

Hustota výkonu elektrické energie v místě radaru

$$S_r(r) = \frac{S_t(r) \cdot \sigma}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (2.2)$$

kde $S_r(r)$ je hustota výkonu elektrické energie v místě cíle, σ je efektivní odrazová plocha dešťové kapky nebo oblačné kapičky a r je vzdálenost cíle.

Efektivní plocha antény

$$A_{ef} = \eta_{ef} \cdot A_{geo} [m^2], \quad (2.3)$$

kde η_{ef} je účinnost (obvykle 0,6 až 0,8) a A_{geo} je efektivní plocha koule.

Zisk antény (proti izotropickému zářiči)

$$G = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \cdot A_{ef} [dB], \quad (2.4)$$

kde λ je vlnová délka a A_{ef} je efektivní plocha antény.

2.2 Radiolokační rovnice pro bodový cíl

Hustota výkonu v místě cíle

$$S_t(r) = \frac{P_t \cdot G}{A_{geo}} = \frac{P_t \cdot G}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (2.5)$$

kde P_t je vyslaný výkon, G je zisk antény a A_{geo} je efektivní plocha koule.

Odražený (rozptýlený) výkon od cíle

$$P = S_t(r) \cdot \sigma = \frac{P_t \cdot G}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \sigma [W], \quad (2.6)$$

kde $S_t(r)$ je hustota výkonu v místě cíle a σ je efektivní odrazová plocha dešťové kapky nebo oblačné kapičky.

Hustota výkonu v místě přijímače

$$S_r(r) = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{P_t \cdot G \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi \cdot r^2)^2} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (2.7)$$

kde P je odražený výkon od cíle a r je vzdálenost cíle.

Výkon přijatý radarem

$$P_r = S_r(r) \cdot A_{ef} = S_r(r) \cdot \frac{G \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} [W], \quad (2.8)$$

kde $S_r(r)$ je hustota výkonu v místě přijímače a A_{ef} je efektivní plocha antény.

Po dosazení veličin do rovnice dostáváme výsledný vztah

$$P_r = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t}{(4 \cdot \pi)^3} \cdot \frac{\sigma}{r^4} = K_r \cdot \frac{\sigma}{r^4} [W], \quad (2.9)$$

kde K_r je radarová konstanta, σ je efektivní odrazová plocha cíle (dopravní letadlo má 10 m^2 a stíhací letadlo má 1 m^2) a r je vzdálenost cíle.

Radarová konstanta pro meteorologický radar PDCR-35

$$K_r = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t}{(4 \cdot \pi)^3} = \frac{0,00862 \cdot (10^{4,5})^2 \cdot 4}{(4 \cdot \pi)^3} = 145,587 [W \cdot m^2], \quad (2.10)$$

kde λ je vlnová délka, G je zisk antény a P_t je vyslaný výkon.

2.3 Radiolokační cíl v meteorologii

Radarová odrazivost

$$\eta = \frac{\sum \sigma(D)}{V} \left[\frac{mm^2}{m^3} \right], \quad (2.11)$$

kde $\sum \sigma(D)$ je součet efektivních odrazových ploch a V je jednotka objemu.

Lze též vyjádřit jako

$$\eta = \int_0^\infty \sigma(D) \cdot N(D) \cdot dD \left[\frac{mm^2}{m^3} \right], \quad (2.12)$$

kde $N(D) \cdot dD$ je celkový počet kapek o průměru D až $D + dD$ v jednotce objemu V , což se odborně nazývá spektrum dešťových kapek $n_D(D)$ v pixelu.

2.4 Radiolokační rovnice v meteorologii

Hustota výkonu v místě cíle

$$S_t(r) = \frac{P_t \cdot G \cdot f(\vartheta, \varphi)}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (2.13)$$

kde P_t je vyslaný výkon, G je zisk antény, $f(\vartheta, \varphi)$ charakteristika typické antény a r je vzdálenost cíle.

Odražený (rozptýlený) výkon od elementárního objemu

$$dP = S_t(r) \cdot \eta \cdot dV = \frac{P_t \cdot G \cdot f(\vartheta, \varphi) \cdot \eta}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot dV [W], \quad (2.14)$$

kde $S_t(r)$ je hustota výkonu v místě cíle a η radarová odrazivost.

Hustota výkonu v místě přijímače

$$dS_r(r) = \frac{dP}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{P_t \cdot G \cdot f(\vartheta, \varphi) \cdot \eta}{(4 \cdot \pi \cdot r^2)^2} \cdot dV \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (2.15)$$

kde dP je odražený výkon od elementárního objemu a r je vzdálenost cíle.

Výkon přijatý radarem

$$dP_r = dS_r(r) \cdot A_{ef} = dS(r) \cdot \frac{G \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} [W], \quad (2.16)$$

kde $dS_r(r)$ je hustota výkonu v místě přijímače a A_{ef} je efektivní plocha antény.

Po dosazení do rovnice dostáváme

$$dP_r = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t \cdot \eta \cdot f^2(\vartheta, \varphi)}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot r^4} \cdot dV [W], \quad (2.17)$$

kde λ je vlnová délka, G je zisk antény, P_t je vyslaný výkon, η je radarová odrazivost, $f(\vartheta, \varphi)$ je vyzařovací charakteristika dané antény a r je vzdálenost cíle.

Za zjednodušujících předpokladů, kdy $h \ll r$, $V = h \cdot S$, $\vartheta = \varphi$ a $\eta = \text{konstanta}$ v objemu V , lze zapsat vztah pro výkon přijatý radarem

$$P_r = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t \cdot \eta}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot r^4} \cdot \int_{RV} f^2(\vartheta, \varphi) \cdot dV [W], \quad (2.18)$$

kde integrál přes RV ($RV = \text{BIN} = \text{Pixel}$) je objem, který je radarem skenován.

Vyzařovací charakteristika typické antény (Gaussovský svazek)

$$\int_{RV} f^2(\vartheta, \varphi) \cdot dV = h \cdot S \cdot \frac{1}{2 \cdot \ln 2} [m^3], \quad (2.19)$$

kde h je délka pixelu, S je plocha podstavy pixelu a $1/(2 \cdot \ln 2)$ je konstantní faktor typické antény.

Konstantní faktor typické antény

$$\frac{1}{2 \cdot \ln 2} = 0,72[-], \{-1,14[dB]\}, \quad (2.20)$$

kde tato hodnota znamená, že odraz od cíle je o 28 % menší, než by byl, v případě antény se stejným ziskem ve vyzařovaném svazku.

Plocha podstavy pixelu

$$S = \frac{\pi \cdot \theta^2 \cdot r^2}{4} [m^2], \quad (2.21)$$

kde θ je vyzařovací úhel anténního svazku a r je vzdálenost cíle.

Délka pixelu u pulzních radarů:

$$h = \frac{c \cdot \tau}{2} [m], \quad (2.22)$$

kde c je rychlost světla a τ je délka impulsu.

Radarová rovnice v meteorologii

$$P_r = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t \cdot \theta^2 \cdot c \cdot \tau}{2^{10} \cdot \pi^2 \cdot \ln 2} \cdot \frac{\eta}{r^2} = C_r \cdot \frac{\eta}{r^2} [W], \quad (2.23)$$

kde C_r je meteorologický potenciál, η je radarová odrazivost a r je vzdálenost cíle.

Meteorologický potenciál pro PDCR-35

$$C_r = \frac{\lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t \cdot \theta^2 \cdot c \cdot \tau}{2^{10} \cdot \pi^2 \cdot \ln 2} = 52,281 \cdot 10^{12} [W \cdot m^3], \quad (2.24)$$

kde λ je vlnová délka, G je zisk antény, P_t je vyslaný výkon, θ je vyzařovací úhel anténního svazku, c je rychlost světla a τ je délka impulsu.

2.5 Ekvivalentní faktor radarové odrazivosti

Zavádí se proto, aby snížil vliv vlnové délky λ na výsledek. Jde o umělou veličinu, radar měří pouze radarovou odrazivost η , nejedná se tedy o faktor radarové odrazivosti z (3.28), který je bohužel i jeho definicí

$$z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5 \cdot K^2} \cdot \eta \left[\frac{mm^6}{m^3} \right], \quad (2.25)$$

kde λ je vlnová délka, η je radarová odrazivost a K je konstanta závislosti indexu lomu dešťové kapky. Tato konstanta je dána výrazem

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} = \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} [-], \quad (2.26)$$

kde m je index lomu dešťové kapky a ε_r je relativní permitivita dešťové kapky. Po logaritmování z_e dostáváme ekvivalentní faktor radarové odrazivosti v jednotkách dBZ, která se používá v meteorologické praxi

$$Z_e = 10 \cdot \log_{10}(z_e) [dBZ], \quad (2.27)$$

kde z_e je faktor radarové odrazivosti.

Pokud aproximativní výraz, platící jen za podmínky $D < 0,3\lambda$, dosadíme do výrazu pro ekvivalentní faktor radarové odrazivosti z_e , obdržíme výraz pro tzv. faktor radarové odrazivosti z

$$z = \int_0^{\infty} D^6 \cdot n_o(D) \cdot dD, \quad (2.28)$$

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

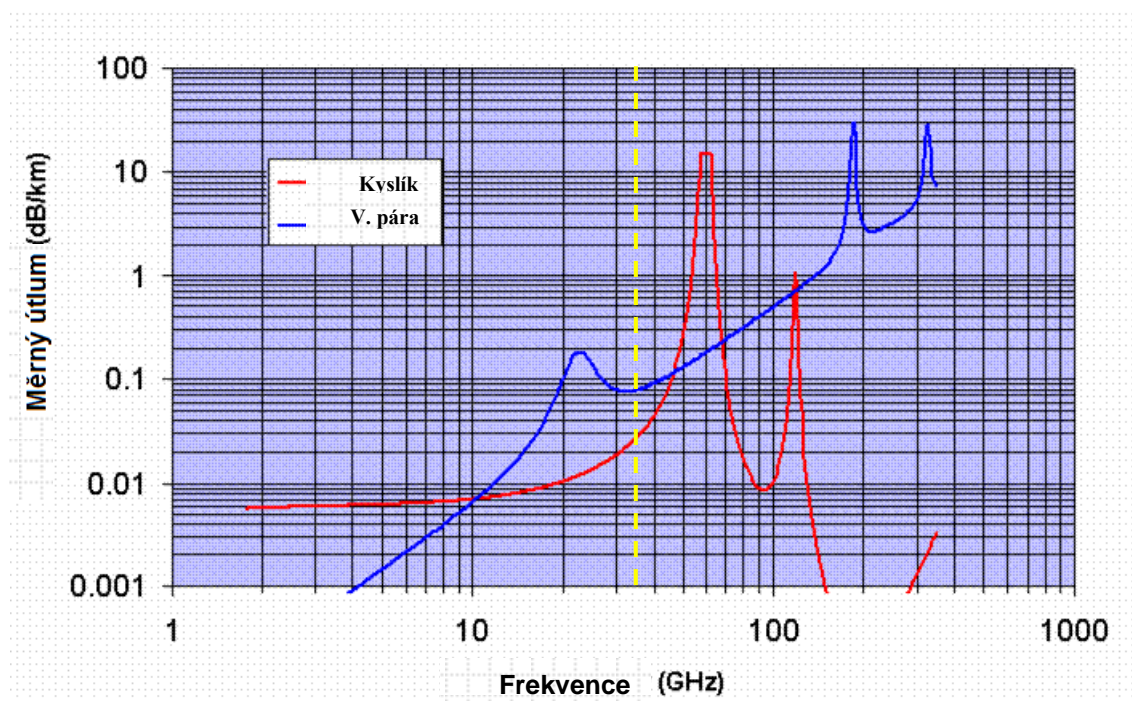
Pozor, faktor radarové odrazivosti radar neměří (ani ekvivalentní), je to veličina zavádějící. Je třeba pracovat s radarovou odrazivostí η . Rayleighova aproximace, kterou se zabýváme v kapitole 5, je v pásmech C a S dosti přesná, ale sporná je již v pásmu X a vyšších. Meteorologický radar měří radarovou odrazivost η , ale meteorologové jsou v praxi zvyklí pracovat s faktorem radarové odrazivosti Z v dBZ, který se však musí softwarově vypočítat.

3 Útlum signálu

Útlum je v podstatě rozdíl signálu na jednom konci vedení (vysílací strana) oproti signálu na druhém konci (přijímací strana). V případě PDCR-35 se nachází jak vysílací, tak přijímací strana na jednom místě, jelikož používá monostatický způsob radiolokace. Čím nižší je útlum signálu, tím kvalitnější a přesnější je přenos signálu. (Unit s.r.o., 2009)

3.1 Útlum kyslíkem a vodní párou

Měrný útlum kyslíkem O_2 a vodní párou H_2O zjistíme z obrázku 3-1, kde si podle námi používané frekvence vyznačíme a vyčíslíme měrný útlum γ . V našem případě je frekvence radaru $f = 35,4$ GHz a dle obrázku je měrný útlum pro náš případ velmi malý ($\gamma_{O_2} = 0,037$ dB/km, $\gamma_{H_2O} = 0,053$ dB/km), proto tento útlum můžeme s klidem zanedbat. Kdyby ovšem radar pracoval s frekvencí 22,4 GHz, byl by měrný útlum v tomto radarovém pásmu K nejvyšší možný.



Obrázek 3-1 – Graf měrného útlumu pro vodní páru γ_{H_2O} a kyslík γ_{O_2} v závislosti na frekvenci f ; Čerchovanou žlutou čarou je zde znázorněna frekvence $f = 35,4$ GHz

3.2 Útlum oblaky

Měrný útlum oblaků γ_c závisí na frekvenci vysílače (v našem případě $f = 35,4$ GHz)

$$\gamma_c(f) = 0,1820 \cdot f \cdot N_c(f, T) \left[\frac{dB}{km} \right], \quad (3.1)$$

kde f je vysílací frekvence a N_c je reálná část refraktivity oblaku, která je vyjádřena

$$N_c(f, T) = 1,5 \cdot Re \left\{ \frac{\varepsilon(f, T) - 1}{\varepsilon(f, T) + 2} \right\} \cdot \frac{\rho_w}{\rho} [ppm], \quad (3.2)$$

kde ε je permitivita vody, ρ_w je celkový obsah kapalné vody (z tabulky 3-1) a ρ je měrná hmotnost kapalné vody (volíme hodnotu $\rho = 1 \text{ g/m}^3$). Pokusně bylo zjištěno, že za reálnou část v tomto vztahu, vyznačenou složenými závorkami, lze dosazovat i konstantu K , která je závislá na indexu lomu oblačné kapičky ($m^2 = \varepsilon$). Permitivitu vody ε vypočítáme pomocí

$$\varepsilon(f, T) = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)}{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \left(\frac{f}{f_s}\right)}{1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2} [-], \quad (3.3)$$

kde dosazujeme následující hodnoty a parametry

$$\varepsilon_1 = 5,48; \varepsilon_2 = 3,51$$

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3 \cdot (r_t + 1) \quad (3.4)$$

$$r_t = \frac{300}{T + 273,15} \quad (3.5)$$

$$f_s = 590 - 1500 \cdot (r_t - 1) \quad (3.6)$$

$$f_p = 20,09 - 142,4 \cdot (r_t - 1) + 294 \cdot (r_t - 1)^2 \quad (3.7)$$

kde f je kmitočet v GHz, f_p a f_s jsou rezonanční frekvence také v GHz, reciproční teplotu r_t dosazujeme v K^{-1} a atmosférickou teplotu ovzduší T dosazujeme v $^\circ\text{C}$.

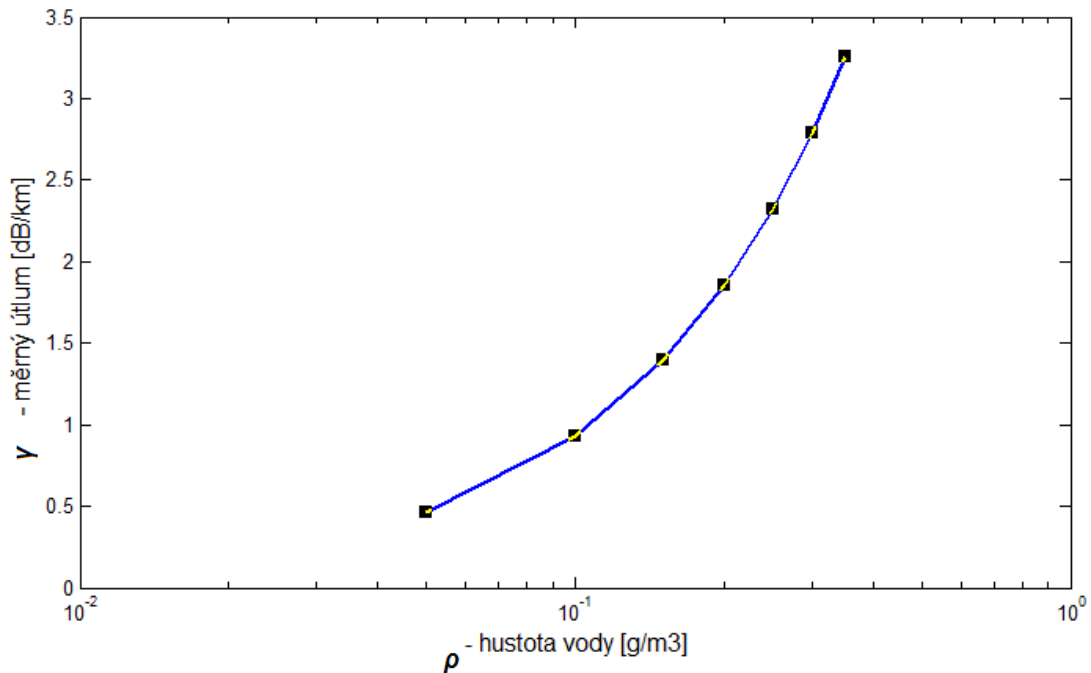
Tabulka 3-1 – Hustota kapalné vody v závislosti na velikosti oblaku (FIŠER, 1997)

obsah vody	$\rho_w \text{ (g/m}^3\text{)}$
malý	0,05
střední	0,15
velký	0,25
obrovský	0,35

Dosažením do výše uvedených vzorců, dostáváme níže uvedenou tabulku 3-2.

Tabulka 3-2 - Hodnoty měrného útlumu oblaky γ_c v závislosti na hustotě kapalné vody v oblacích ρ_w

$\rho_w \text{ (g/m}^3\text{)}$	$\gamma_c \text{ (dB/km)}$
0.05	0.465
0.1	0.929
0.15	1.394
0.2	1.859
0.25	2.323
0.3	2.788
0.35	3.253



Obrázek 3-2 – Graf závislosti měrného útlumu v oblacích γ_c na hustotě kapalné vody ρ_w

Z obrázku 3-2 je patrné, že s rostoucí hustotou kapalné vody ρ_w roste i měrný útlum v oblaku γ_c , ten ale není tak veliký, aby zabránil nebo znemožnil oblačnému radaru určit jiné cíle, jako třeba další oblak nebo dešť, které jsou v dosahu meteorologického radaru.

3.3 Útlum deštěm

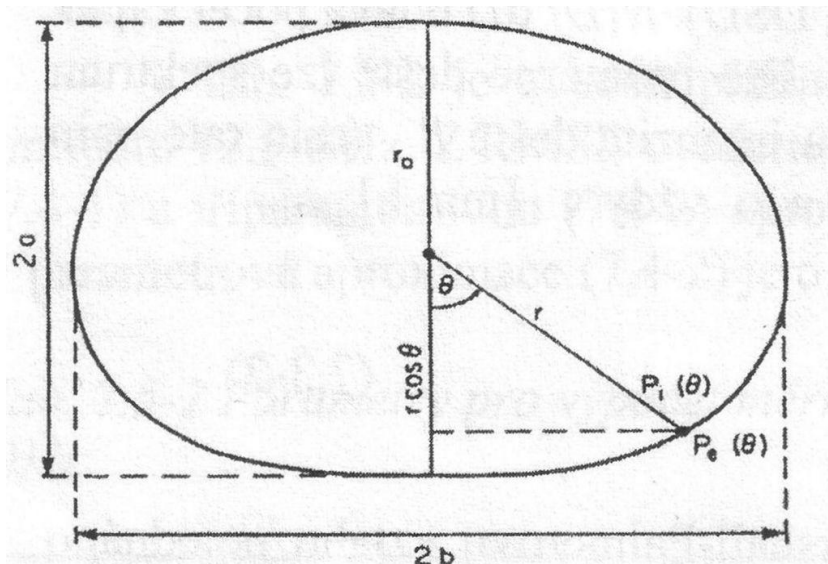
Dešťové kapky svým tvarem, svými dielektrickými vlastnostmi, svoji velikostí a svým počtem v jednotce objemu představují uplatnění při řešení vzájemného působení elektromagnetických vln s dešťovou oblastí. V radarové technice se zajímáme o útlum radarových vln procházejících deštěm, depolarizaci, rozptyl nežádoucími směry (tedy o možné rušení) a také o odraz od dešťového jádra ke kvalifikaci a kvantifikaci dešťových oblastí.

Absorpcí energie dešťové kapky je způsoben útlum deštěm, energie se transformuje v jalové teplo a rozptýlí se nežádoucími směry. Přesné řešení každé dešťové kapky odděleně respektuje okamžitý útlum, tj. její velikost, tvar a komplexní index lomu (mikroanalýza). Pro okamžitý měrný útlum deštěm je odvozen integrální vzorec konečné homogenní dešťové oblasti (makroanalýza).

3.3.1 Tvar dešťových kapek

Pro odvození rozptylu je tvar dešťových kapek velmi důležitý. V prvním přiblížení je tvar možné modelovat koulí, nelze pak ale brát v úvahu depolarizaci. Kvalitním modelem je zploštělý sféroid, ale zatím nejdokonalejším modelem je "Pruppacher-Pitter", nazvaný podle autorů.

Malé dešťové kapky jsou kulové, větší kapky se zplošťují a největší kapky, které mají maximální průměr 7mm (větší kapky jsou nestabilní a tříští se), se zesponu prohýbají směrem dovnitř. Dobrou aproximací tvaru kapky je tvar zploštělého sféroidu, který je vhodný i k výpočtu depolarizace.



Obrázek 3-3 – Model tvaru dešťové kapky

Pádová rychlost dešťových kapek je úměrná přibližně 0.67 mocnině průměru dešťové kapky D , až do maximální rychlosti 9 m/s pro největší dešťové kapky. Vůči rychlosti šíření elektromagnetických vln je padavý pohyb dešťových kapek směrem dolů zanedbatelný. Dešťové kapky se vzhledem k šířící se elektromagnetické vlně jeví jako nehybné objekty.

3.3.2 Měrný útlum deštěm

Nejjednodušším přiblížením a nečastěji používaným vztahem pro určení měrného útlumu deštěm γ_r je

$$\gamma_r = a \cdot R^b, \quad (3.8)$$

kde R je intenzita srážek, a a b jsou konstanty závislé na kmitočtu f , teplotě T a polarizaci.

Tabulka 3-3 – Hodnoty dešťových intenzit srážek R , které jsou normované

Intenzita srážek	R (mm/h)
Mírná	0,5
Slabá	2,0
Střední	8,0
Silná	32
Velmi silná	128

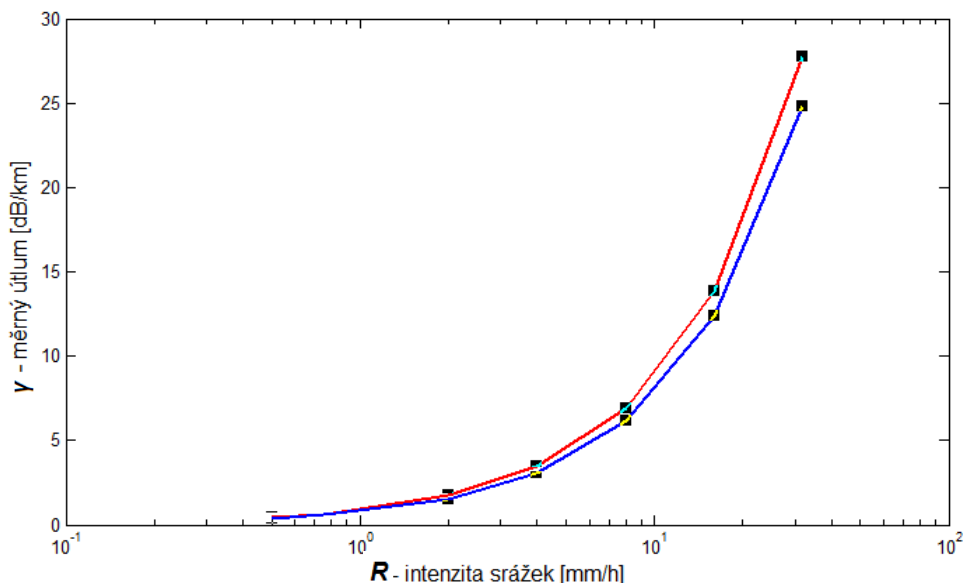
V praxi jsou osvědčena následující tvrzení týkající se měrného útlumu deštěm γ_r :

- Měrný útlum deštěm je na horizontální polarizaci horší (vyšší), než na polarizaci vertikální, níže si toto tvrzení dokážeme.
- Měrný útlum deštěm na kruhové polarizaci je přibližně dán aritmetickým průměrem útlumu na vertikální a horizontální polarizaci.
- Měrný útlum deštěm počítaný pro kulový model dešťových kapek (podle Mie) téměř odpovídá měrnému útlumu deštěm na kruhové polarizaci.
- Pro průměrné deště lze spektrum dešťových kapek aproximovat Marshall-Palmerovým vztahem s parametrem intenzit deště a to vždy v mm/h.

Tabulka 3-4 – Hodnoty parametrů a , b pro kmitočet 35,4 GHz k vyčíslení měrného útlumu deštěm γ_r , jak pro vertikální, tak pro horizontální polarizaci (FIŠER, 1986)

konstanta	vertikální polarizace	horizontální polarizace
a	0,3224	0,3374
b	0,8761	0,9047

Hodnoty lze odvodit i na jiné kmitočty pomocí interpolačních vzorců, které jsou funkcí polarizace a elevačního úhlu.



Obrázek 3-4 – Graf závislosti měrného útlumu γ_r na intenzitě srážek R , kde důležitým faktorem je vertikální polarizace (modrá) a horizontální polarizace (červená).

Jen pro ilustraci zde uvádíme způsob jak moderněji aproximovat měrný útlum deštěm γ_r , který v této práci však nepoužíváme

$$\gamma_{h,v}(R) = K_{h,v} \cdot R^{\alpha_{h,v} + \beta_{h,v} \cdot \ln R}, \quad (3.9)$$

kde K je konstanta závislá na indexu lomu dešťové kapky, R je intenzita dešťových srážek, α a β jsou konstanty závislé na kmitočtu f , teplotě T a polarizaci.

Po srovnání výsledků měrných útlumů pro obě polarizace docházíme k závěru, že při vertikální polarizaci vzniká menší útlum signálu, než u polarizace horizontální. Je to dáno fyzickými vlastnostmi dešťové kapky, kde v horizontálním pohledu je dešťová kapka širší, než při pohledu vertikálním, a proto vzniká větší měrný útlum γ_r .

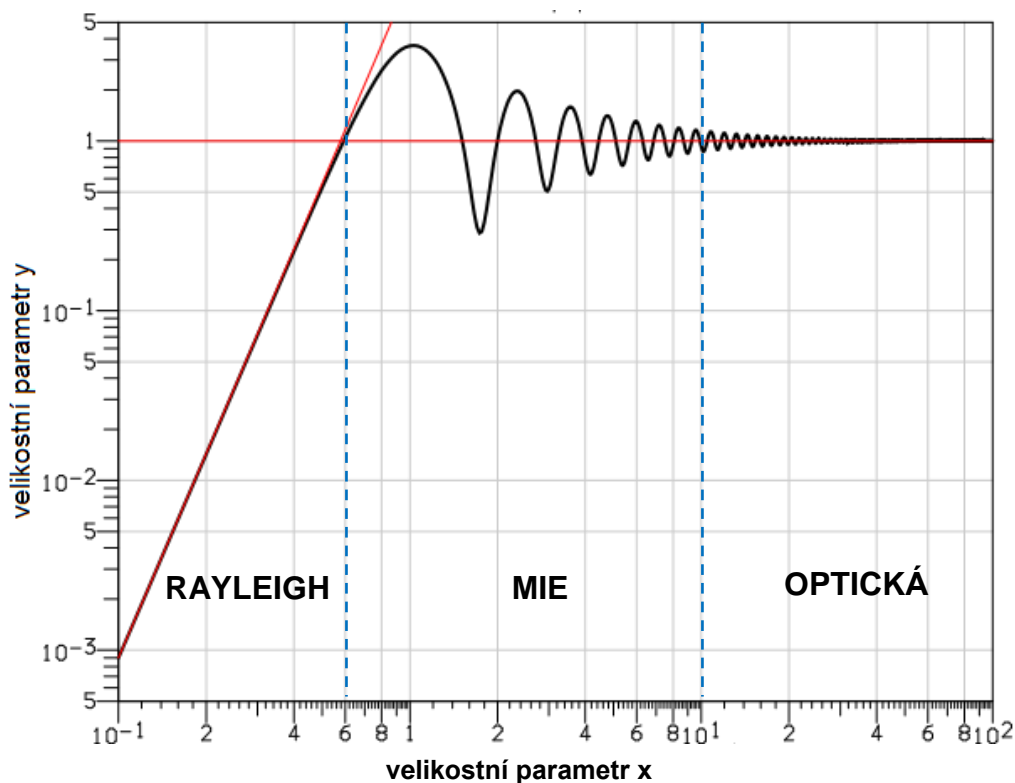
Tabulka 3-5 – Spočítané hodnoty měrného útlumu γ_r v závislosti na intenzitě srážek R ; Nalezneme zde dvě skupiny a to pro horizontální a vertikální polarizaci

Intenzita R (mm/h)	Horizontální γ_r (dB/km)	Vertikální γ_r (dB/km)
0.5	0.434	0.387
0.75	0.651	0.581
2	1.736	1.548
4	3.471	3.097
8	6.942	6.194
16	13.88	12.38
32	27.77	24.77

Používané postupy neboli modely pro výpočet měrného útlumu deštěm γ_r zanedbávají vícenásobný rozptyl elektromagnetických vln na dešťových kapkách. Jednou rozptýlené pole je totiž asi o řád slabší, než pole původní. Při vyšších kmitočtech, jako v případě PDCR-35, je velikost dešťové kapky srovnatelná s vlnovou délkou a odhad měrného útlumu deštěm γ_r by se tedy měl vypořádat i s vícenásobným rozptylem. V praxi však jednoduchý rozptyl vyhovuje. (JOSS, 1967)

4 Aproximace parametrů hydrometeorologických útvarů

K výpočtu velikostí spekter oblačných kapiček $n_O(D)$ a dešťových kapek $n_D(D)$, je třeba znát nejprve jejich rozložení, které pak aproximujeme do příslušné oblasti. Hlavní aproximativní typy rozptylu jsou Rayleigh, Mie a optický. (BATTAN, 1973)



Obrázek 4-1 – Normalizace sférických částic zpětného rozptylu v průřezu jako funkce vlnové délky λ

Na obrázku 4-1 máme znázorněnou Rayleigh, Mie a optickou oblast. Mie oblast platí pro jakýkoliv průměr dešťových kapek. Abychom zjistili, do jaké oblasti budeme aproximovat, musíme si spočítat velikostní parametry x a y

$$x = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} [-], \quad (4.1)$$

kde λ je vlnová délka a D je průměr dešťové kapky nebo oblačné kapičky.

$$y = \frac{\sigma \cdot 4}{\pi \cdot D^2} [-], \quad (4.2)$$

kde σ je efektivní odrazová plocha dešťové kapky nebo oblačné kapičky a D je průměr dešťové kapky nebo oblačné kapičky.

V našem případě použijeme vztah pro výpočet velikostního parametru x , který je snazší a je nutné znát jen průměr dešťové kapky nebo oblačné kapičky a vlnovou délku λ .

Podle vypočítaných hodnot uvedených níže v tabulce 4-1 zjistíme, že dešťovým kapkám (0,2 – 7 mm) odpovídá Mie oblast, protože vypočítané hodnoty se pohybují od 0,6 do 10 a nelze tedy v tomto případě použít žádné jiné aproximace.

Kdežto hodnoty pro oblačné kapičky (2 – 70 μm) se nacházejí v Rayleigho oblasti, protože vypočítané hodnoty se pohybují od 0 do 0,6. Tato oblast je pro další výpočty týkající se oblačných kapiček podstatně jednodušší.

Tabulka 4-1 – Hodnoty vypočítaných velikostních parametrů x pro určení aproximace dešťových kapek i oblačných kapiček

Děšť		Oblaka	
D (mm):	x (-):	D (μm):	x (-):
1	0.739	10	7.393e-3
2	1.479	20	1.479e-2
3	2.218	30	2.218e-2
4	2.957	40	2.957e-2
5	3.697	50	3.697e-2
6	4.436	60	4.436e-2
7	5.175	70	5.175e-2

Tyto hodnoty, ale i celou analýzu si lze vyzkoušet pomocí souboru v matlabu, který je přiložený na CD nebo v příloze této práce.

4.1 Spektrum velikosti oblačných kapiček

Oblučné kapičky označujeme jako kapalně částice o průměru 2 až 80 μm . Oblaka a mlhy obsahují oblačné kapičky o typické koncentraci 10 – 100 kapiček v cm^3 . Hodnoty kapalného obsahu oblačných kapiček jsou typicky 0,1 – 1 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a střední průměr oblačných kapiček je 10 – 20 μm .

Nejvíce leteckých měření bylo prováděno v nesrážkové oblačnosti, kde dochází k rychlé přeměně spektra velikosti kapiček $n_o(D)$ při přechodu od počátečního vývoje oblaku k zralosti oblaku a později rozpadu během několika minut až desítek minut. Spektrum velikosti oblačných kapiček $n_o(D)$ je ve stadiu vývoje oblaku úzké a teprve při stádiu zralosti se rozšiřuje. Vše závisí na typu a koncentraci aerosolových částic v oblaku, které v něm kondenzují. Koncentrace kapiček je větší v užších spektrech kontinentálních oblaků, kdežto v maritimních oblacích jsou širší spektra a nižší koncentrace kapiček.

Z mnoha měření lze odvodit, že proměnlivost získaných spekter je závislá na typu oblaku, vývojovém stádiu a parametrech měřicí metody, ale i tak lze nalézt společné rysy spekter oblačných kapiček $n_o(D)$, které jsou základem pro konstrukci analytického vyjádření jejich závislosti. Koncentrace oblačných kapiček ostře roste z minimální hodnoty k maximální a potom klesá směrem k větším velikostem kapiček. (ŘEZÁČOVÁ, 2007)

Typický tvar spektra oblačných kapiček $n_o(D)$ vystihuje logaritmicko-normální rozdělení nebo rozdělení gama. Rozdělení gama můžeme zapsat ve tvaru

$$n_o(D) = \frac{A \cdot D^\beta}{2} \cdot \exp\left(\frac{-B \cdot D^\gamma}{2}\right) \left[\frac{1}{\mu\text{m} \cdot \text{m}^3}\right], \quad (4.3)$$

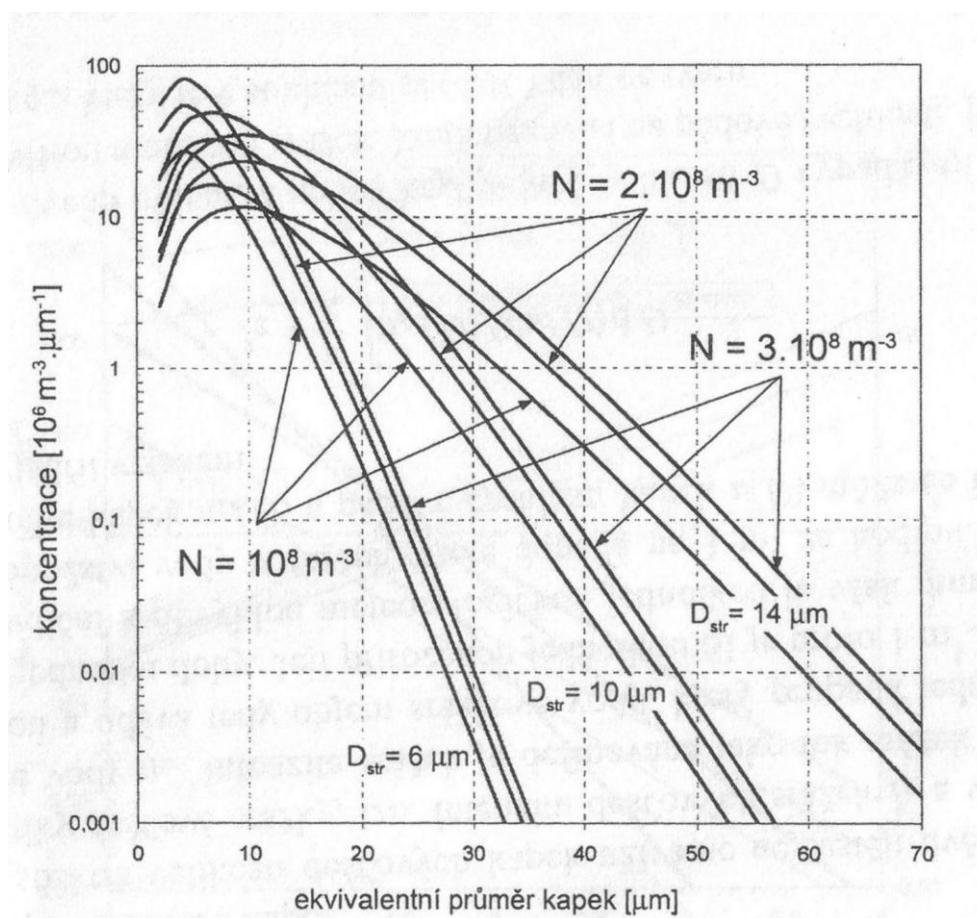
kde D je průměr kapičky a parametry A , B a β , γ můžeme vyjádřit pomocí momentů funkce $n_o(D)$.

Nejznámějším vyjádřením spektra oblačných kapiček $n_o(D)$ je Chrgianovo-Mazinovo rozdělení, které používá rozdělení gama (4.3), ale s parametry $\gamma = 1$ a $\beta = 2$

$$n_o(D) = \frac{A \cdot D^2}{2} \cdot \exp\left(\frac{-B \cdot R}{2}\right) \left[\frac{1}{\mu\text{m} \cdot \text{m}^3}\right], \quad (4.4)$$

kde parametry A a B je možné vyjádřit pomocí celkového počtu oblačných kapiček N a středního průměru kapiček D_{str} , jak uvidíme dále.

Na obrázku 4-2 jsou příklady Chrgianova-Mazinova rozdělení pro různé hodnoty celkového počtu oblačných kapiček N a středního průměru kapiček D_{str} . Z tohoto grafu volíme, pro účely této práce, zlatou střední cestu, tedy celkový počet oblačných kapiček $N = 2 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$ se třemi typickými středními průměry kapiček D_{str} .



Obrázek 4-2 – Chrgianovo-Mazinovo rozdělení oblačných kapiček podle velikosti pro daný střední průměr kapičky D_{str} a celkový počet oblačných kapiček N

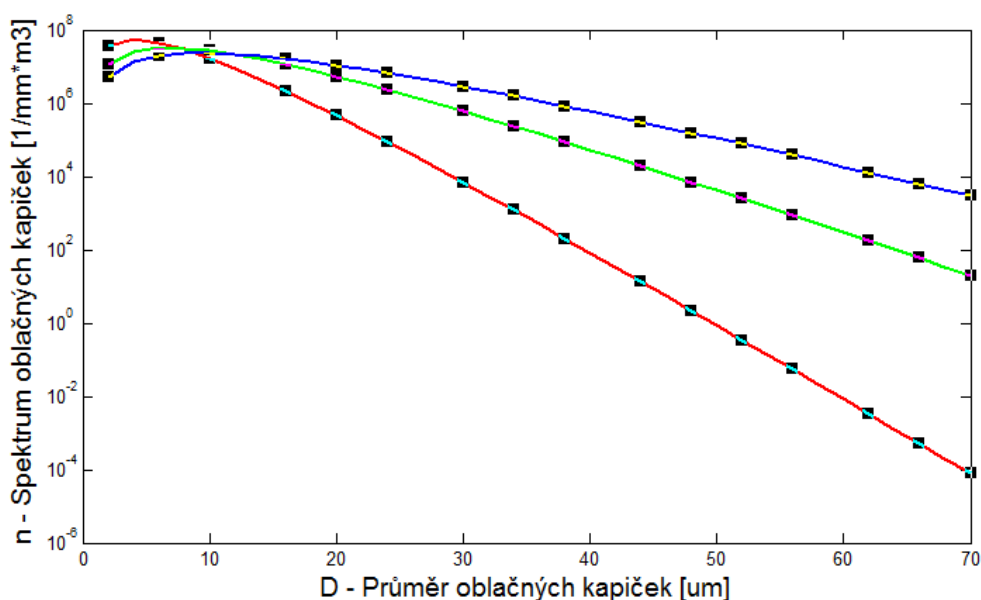
Pro stanovení neurčitého integrálu $n_O(D)$ využijeme definice rozdělení gama a tak můžeme určit celkový počet oblačných kapiček N ve spektru. Z tohoto vztahu si však pro naše potřeby určíme parametr A

$$N = \int_0^{\infty} n_O \cdot dD = \frac{2 \cdot A}{B^3} \Rightarrow A = \frac{N \cdot B^3}{2} \left[\frac{1}{m^3 \cdot \mu m^3} \right]. \quad (4.5)$$

Podobně lze vyjádřit střední průměr kapiček D_{str} , s využitím celkového počtu oblačných kapiček N a průměru oblačné kapičky D , z kterého následně odvodíme vztah pro námi požadovaný parametr B

$$D_{str} = \frac{2}{N} \cdot \int_0^{\infty} D \cdot n_D \cdot dD = \frac{12 \cdot A}{N \cdot B^4} = \frac{6}{B} \Rightarrow B = \frac{6}{D_{str}} \left[\frac{1}{\mu m} \right]. \quad (4.6)$$

Po dosazení do vzorců a vypočítání hodnot, které nalezneme v tabulce 4-2, dostáváme následující obrázek 4-3, který znázorňuje spektrum oblačných kapiček $n_O(D)$ pro určené průměry oblačných kapiček D .



Obrázek 4-3 – Graf spektra oblačných kapiček $n_O(D)$ v závislosti na průměru kapičky D ; Kde střední průměr kapičky $D_{str} = 6 \mu m$ (červená), $D_{str} = 10 \mu m$ (zelená) a $D_{str} = 14 \mu m$ (modrá); Vyznačené body v grafu nalezneme v tabulce 4-2

Tabulka 4-2 - Vypočítané hodnoty spektra oblačných kapiček n_O pro různé průměry kapiček D

D (μm)	n_O [$D_{str} = 6 \mu m$]	n_O [$D_{str} = 10 \mu m$]	n_O [$D_{str} = 14 \mu m$]
10	1.684487e+007	2.688502e+007	2.308759e+007
20	4.539993e+005	5.354105e+006	1.083447e+007
30	6.882802e+003	5.997716e+005	2.859954e+006
40	8.244614e+001	5.308599e+004	5.964932e+005
50	8.679965e-001	4.129681e+003	1.093439e+005
60	8.421861e-003	2.960708e+002	1.847251e+004
70	7.723768e-005	2.006345e+001	2.949772e+003

Analytická vyjádření velikosti spektra oblačných kapiček $n_O(D)$ představující střední rozdělení a velikosti spektra měřená v oblacích se mohou vzájemně velmi lišit. Záleží na povětrnostních podmínkách, nadmořské výšce a dalších okolnostech.

4.1.1 Celkový kapalný obsah vody oblačných kapiček

Pro výpočet celkového kapalného obsahu q_w použijeme stejný parametr A jako pro výpočet spektra oblačných kapiček $n_O(D)$

$$q_w = \frac{4 \cdot \pi \cdot \rho_w}{6} \cdot \int_0^\infty D^3 \cdot n_D \cdot dD = \frac{4 \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot A \cdot 5!}{6 \cdot B^6} \cong \frac{A \cdot \rho_w \cdot D_{str}^6}{2,9} \left[\frac{g}{m^3} \right], \quad (4.7)$$

kde D_{str} je střední průměr dešťových kapek a ρ_w je hustota kapalné vody.

4.1.2 Vzdálenost mezi oblačnými kapičkami

V důsledku turbulentního proudění v oblaku jsou oblačné kapičky nerovnoměrně rozloženy a jejich vzdálenost je proměnná v čase. Lze provést orientační odhad střední vzdálenosti z odhadu počtu oblačných kapiček N a kapalného obsahu vody v oblaku q_w .

Kapalný obsah vody lze také vyjádřit jako poměr objemu koule, jejíž poloměr odpovídá střední vzdálenosti mezi kapičkami, a objemu střední oblačné kapičky. Toto vyjádření napovídá, že kapalný oblak je řídký aerosol. Podrobnější analýza by dokázala, že toto tvrzení je poměrně přesné.

Fluktuace počtu oblačných kapiček N sleduje odchylku počtu oblačných kapiček od předpokladu. Rozdělení oblačných kapiček v prostoru užívá statistické Poissonovo rozdělení. Studie hologramů vrstevnaté oblačnosti ukázaly, že experimentální chyba prostorového rozdělení oblačných kapiček se lišila od Poissonovy statistiky jen o několik procent. Tento jev může mít vliv na sousední kapičky při růstu rychlosti oblačné kapičky, ale o řídkosti oblačného aerosolu to zásadně nic nemění. (WALDVOGEL, 1974)

4.1.3 Efektivní odrazová plocha oblačné kapičky

Oblučné kapičky aproximujeme pomocí Rayleigh, v tomto případě tedy není nutné počítat tuto veličinu, ale pro názornost

$$\sigma(D) = \frac{\pi^5 \cdot K^2 \cdot D^6}{\lambda^4} [mm^2], \quad (4.8)$$

kde K je konstanta závislá na indexu lomu vody oblačné kapičky, D je průměr oblačné kapičky a λ je vlnová délka udaná v milimetrech.

4.1.4 Radarová odrazivost oblačné kapičky

Ani tuto veličinu není nutné vypočítat, ale pro ilustraci si ji zde uvedeme

$$\eta = \frac{\sum \sigma(D)}{V} \left[\frac{mm^2}{m^3} \right], \quad (4.9)$$

kde $\sum \sigma(D)$ je součet efektivních odrazových ploch a V je jednotka objemu.

4.1.5 Faktor radarové odrazivosti oblačné kapičky

Jelikož známe spektrum oblačných kapiček $n_O(D)$, můžeme si spočítat faktor radarové odrazivosti z pro tři typické střední průměry oblačných kapiček D_{str} . Oblačné kapičky se nacházejí v Rayleigho oblasti, proto je tento výpočet velmi jednoduchý

$$z = \int_0^{\infty} D^6 \cdot n_O(D) \cdot dD \left[\frac{mm^6}{m^3} \right], \quad (4.10)$$

kde D je průměr oblačných kapiček a $n_O(D)$ je spektrum oblačných kapiček. Po zlogaritmování dostaneme faktor radarové odrazivosti Z v jednotkách dBZ

$$Z = 10 \cdot \log_{10}(z)[dBZ]. \quad (4.11)$$

Tabulka 4-3 - Hodnoty faktoru radarové odrazivosti z a Z pro typické střední průměry kapiček D_{str}

D_{str}	z (mm^6/m^3)	Z (dBZ)
6	5.160960 e-4	-32.87
10	1.105171 e-2	-19.57
14	8.050625 e-2	-10.94

Se zvyšující se velikostí středního průměru oblačné kapičky D_{str} se zvětšuje i faktor radarové odrazivosti Z , jak si můžeme všimnout v tabulce 4-3.

4.2 Spektrum velikosti dešťových kapek

O počtu a velikosti dešťových kapek existuje mnoho údajů, které byly získány v různých geografických oblastech řadou měřicích technik. Jejich výsledkem jsou rozdělení četnosti dešťových kapek, které udávají počet kapek v daném intervalu velikosti. Jde tedy o spektrum velikosti dešťových kapek $n_D(D)$.

Velikost spektra dešťových kapek, se mění s rostoucí velikostí dešťových kapek, protože jejich tvar se stále více odlišuje od sférického. Především je to aerodynamický odpor vzduchu, ale i další faktory, které tento jev ovlivňují, jako například vývoj vnitřní cirkulace vody v padající kapce. Zpravidla přijímáme jako charakteristiku velikosti dešťové kapky její průměr, který odpovídá velikosti sféry o objemu nesférické dešťové kapky. Průměr dešťové kapky D lze v dobrém přiblížení považovat za kulový, pokud je průměr dešťové kapky $D < 0,2$ mm. Větší dešťové kapky při volném pádu deformují svůj tvar a blíží se tvaru zploštělého sféroиду pro přibližně $0,2 \text{ mm} < D < 1 \text{ mm}$. Dešťové kapky mají tvar zploštělého sféroиду s rovnou základnou pro průměr $D > 1 \text{ mm}$.

Kapky o průměru $D > 10$ mm jsou hydrodynamicky nestabilní a tříští se při pádu. V našem případě volíme maximální velikost kapky 7 mm. Velká proměnlivost spekter dešťových kapek $n_D(D)$ má v čase a prostoru společný rys a to rychlý pokles celkového počtu dešťových kapek N s rostoucí velikostí dešťových kapek o průměru $D > 1$ mm. Systematická změna spektra dešťových kapek $n_D(D)$ s intenzitou srážek R stoupá z důvodu relativního růstu velkých dešťových kapek. (ŘEZÁČOVÁ, 2007)

Nejužívanějším vyjádřením spektra velikosti dešťových kapek $n_D(D)$ je Marshall-Palmerovo rozdělení, které má tvar

$$n_D(D) = N_0 \cdot \exp(-\Lambda \cdot D), \quad (4.12)$$

kde pro parametry N_0 a Λ , závislé na intenzitě srážek R , Marshall a Palmer odvodili pro průměrný déšť vztahy (MARSHALL, 1948)

$$N_0 = 8000 \left[\frac{1}{m^3 \cdot mm} \right] \quad (4.13)$$

$$\Lambda = 4,1 \cdot R^{-0,21} \left[\frac{1}{mm} \right] \quad (4.14)$$

Marshall-Palmerovo rozdělení můžeme vyjádřit pomocí momentů rozdělení. Pro toto rozdělení je jednoduché potom stanovit střední průměr dešťových kapek D_{str} a celkový počet dešťových kapek N .

$$D_{str} = \Lambda^{-1} \quad (4.15)$$

$$N = \frac{N_0}{\Lambda} \quad (4.16)$$

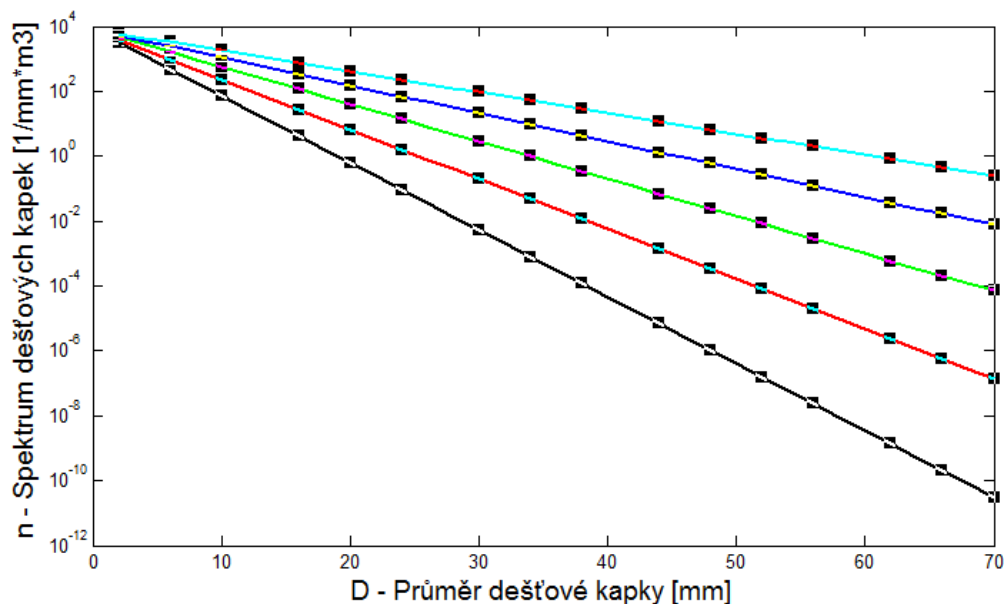
Marshall-Palmerovo rozdělení není dostatečně obecným vyjádřením spektra velikosti dešťových kapek $n_D(D)$. Především parametr rozdělení N_0 není přesně konstantní, jelikož závisí na intenzitě srážek R . Joss a Waldvogel sledovali parametry Marshall-Palmerova rozdělení pro různé typy intenzit srážek R a navrhli své hodnoty uvedené v tabulce 5-4. Waldvogel zjistil, že hodnota parametru N_0 se v průběhu intenzity srážky R může náhle změnit. (JOSS J., 1968)

I když parametry Marshall-Palmerova rozdělení se mohou měnit při rozdílných intenzitách srážek R , i během dané intenzity srážky R , pokládá se Marshall-Palmerovo rozdělení za kvalitní reprezentaci spektra velikosti dešťových kapek $n_D(D)$, ovšem pokud bereme v úvahu časovou a prostorovou závislost.

Pro výpočet spektra dešťových kapek $n_D(D)$ využijeme vztah pro Marshall-Palmerovo rozdělení a dosazovat budeme parametrizované intenzity dešťových srážek R .

Tabulka 4-4 – Vypočítané hodnoty spekter dešťových kapek n_D pro různé průměry dešťových kapek D v závislosti na intenzitě srážek R

D (mm)	n_D [R = 0,5]	n_D [R = 2]	n_D [R = 8]	n_D [R = 32]	n_D [R = 128]
1	6.974e+1	2.310e+2	5.656e+2	1.104e+3	1.821e+3
2	6.080e-1	6.672e+0	3.999e+1	1.525e+2	4.145e+2
3	5.300e-3	1.927e-1	2.827e+0	2.105e+1	9.436e+1
4	4.620e-5	5.565e-3	1.999e-1	2.905e+0	2.148e+1
5	4.028e-7	1.607e-4	1.413e-2	4.011e-1	4.889e+0
6	3.511e-9	4.642e-6	9.990e-4	5.536e-2	1.113e+0
7	3.061e-11	1.341e-7	7.063e-5	7.643e-3	2.533e-1



Obrázek 4-4 – Graf spektra dešťových kapek n_D v závislosti na průměru dešťových kapek D ; Kde intenzita srážek $R = 0,5$ mm/h (černá), $R = 2$ mm/h (červená), $R = 8$ mm/h (zelená), $R = 32$ mm/h (modrá), $R = 128$ mm/h (světle modrá); Zvýrazněné body v grafu nalezneme v tabulce 4-5

Tabulka 4-5 – Hodnoty středního průměru dešťových kapek D_{str} a celkového počtu dešťových kapek N v závislosti na intenzitě srážek R

R (mm/h)	D_{str} (mm)	N (1/mm.m ³)
0.5	0.210863	1686.902
2	0.282119	2256.953
8	0.377455	3019.639
32	0.505007	4040.058
128	0.675663	5405.305

Přesnější odhad spektra velikosti dešťových kapek n_D (D) lze získat pomocí rozdělení gama, které je ve tvaru

$$n_D(D) = N_0 \cdot D^\beta \cdot \exp(-\Lambda \cdot D), \quad (4.17)$$

kde parametr β nabývá různých hodnot za různých povětrnostních podmínek a D je průměr dešťových kapek. Hodnoty parametrů N_0 a Λ lze stanovit na základě globálních charakteristik spektra dešťových kapek n_D (D) převedených na momenty funkce. Tyto hodnoty nalezneme v tabulce 4-6.

Tabulka 4-6 – Hodnoty parametru N_0 a Λ pro exponenciální spektrum velikosti dešťových kapek n_D a různé typy srážek R

R (mm/h)	N_0 (1/m ³ .mm)	Λ (1/mm)
mrholení	30000	$5,7 \cdot R^{-0,21}$
trvalý déšť	7000	$4,1 \cdot R^{-0,21}$
Bouřka	1400	$3,0 \cdot R^{-0,21}$
Marshall-Palmer (1949)	8000	$4,1 \cdot R^{-0,21}$

Metody měření spektra velikosti dešťových kapek $n_D(D)$ prošly značným vývojem. Filtrační papír napuštěný vhodným barvivem byl první studií hodnoty velikosti dešťové kapky. V současnosti probíhají měření s pomocí časové registrace mechanického momentu dešťových kapek dopadajících na vhodnou záchytnou plochu nebo filmováním dešťových kapek vysokofrekvenčními kamerami. (ŘEZÁČOVÁ, 1971)

Toto měření proběhlo i v ČR v Hradci Králové v letech 1998-1999 s využitím zařízení 2D videodistrometr. Videodistrometr automaticky snímá dešťové kapky padající do záchytného prostoru videokamerami ve dvou kolmých směrech. U videodistrometru má horní plocha záchytného objemu velikost typicky 10^{-2} m^2 .

Takový záznam umožňuje vyhodnotit charakteristiky jednotlivých dešťových kapek i spektrum jejich velikosti. Měření popsaná Fišerem zaznamenala celkem 194,4 hodin s nenulovou intenzitou deště R a 69,8 hodin, při nichž intenzita deště R přesáhla 0,2 mm/h. (FIŠER, 2002)

4.2.1 Celkový kapalný obsah vody dešťových kapek

Kapalný obsah vody dešťových kapek q_w je mírou množství intenzit srážek, která nezávisí na pádové rychlosti. Toto tvrzení je dáno vztahem ve tvaru

$$q_w = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_w \cdot \int_0^{\infty} n_D(D) \cdot D^3 \cdot dD \left[\frac{g}{m^3} \right], \quad (4.18)$$

kde ρ_w je hustota kapalné vody, $n_D(D)$ je spektrum dešťových kapek a D je průměr dešťových kapek.

4.2.2 Intenzita srážek deště

Intenzitu srážek R definujeme jako tok srážek horizontální plochou, který udává objem srážkové vody, tedy jednotka plochy za jednotku času. Přírozenou jednotkou SI soustavy je proto 1 m/s, ale v praxi používanou a obvyklou meteorologickou jednotkou je však mm/h, což odpovídá v litrech množství vody, které za hodinu dopadá na 1 m^2 .

Intenzitu srážek R můžeme vyjádřit pomocí spektra dešťových kapek $n_D(D)$ a pádové rychlosti kapek $v(D)$ vztahem, který bere v úvahu objem V , z něhož dešťové kapky dané velikosti vypadávají za jednotku času

$$R = \frac{\pi}{6} \cdot \int_0^{\infty} n_D(D) \cdot D^3 \cdot v(D) \cdot dD \left[\frac{mm}{h} \right], \quad (4.19)$$

kde neurčitý integrál nenarušuje platnost hodnoty veličiny vzhledem k tomu, že počet dešťových kapek N klesá s velikostí, příspěvek nereálně velkých kapek je zanedbatelný.

4.2.3 Rozptylové funkce

Rozptylové funkce je třeba znát k určení efektivní odrazové plochy dešťové kapky σ , z které se následně spočítá faktor radarové odrazivosti z . Pro stanovení rozptylu elektromagnetické vlny na izolované dešťové kapce se definují komplexní rozptylové funkce $f(D)$ pro různé polarizace

$$E^s = E^i \cdot f(K_1, K_2) \cdot \frac{e^{j \cdot k_0 \cdot r}}{r}, \quad (4.20)$$

kde E^s je rozptýlené elektrické pole, E^i je dopadající elektrické pole, $f(K_1, K_2)$ je komplexní rozptylová funkce dešťové kapky (K_1 je směr dopadající vlny, K_2 je směr rozptýlené vlny), k_0 je vlnové číslo vakua a r je vzdálenost cíle.

Jelikož se výpočet těchto hodnot vymyká rámci této diplomové práce, převzal jsem výsledné hodnoty od vedoucího diplomové práce. Bez rozptylových funkcí by nebylo v této části možné vypočítat efektivní odrazovou plochu dešťové kapky σ , radarovou odrazivost η a ekvivalentní faktor radarové odrazivosti Z_e . V tabulce 4-7 nalezneme funkce pro dopředný i zpětný směr v závislosti na velikosti dešťové kapky, ale pro meteorologický radar PDCR-35 použijeme jen zpětné rozptylové funkce.

4.2.4 Efektivní odrazová plocha dešťové kapky

Pokud bychom se omezili jen na kulový model dešťové kapky, bylo by možné efektivní odrazovou plochu $\sigma(D)$ spočítat podle aproximace Mie. Nevýhodou by však bylo, že by v tomto případě nebylo možné respektovat polarizaci radaru. Proto se efektivní odrazová plocha dešťových kapek $\sigma(D)$ počítá pomocí rozptylových funkcí

$$\sigma(D) = 4 \cdot \pi \cdot |\hat{f}_b|^2 [mm^2], \quad (4.21)$$

kde f_b je zpětná komplexní rozptylová funkce.

Tabulka 4-7 – Hodnoty efektivní odrazové plochy σ a rozptylových funkcí v dopředném i zpětném směru pro déšť

D (mm)	Dopředná rozptylová funkce		Zpětná rozptylová funkce		$\sigma(D)$ mm^2
	Reálná (cm)	Imaginární (cm)	Reálná (cm)	Imaginární (cm)	
1	-0.009418	0.003093	0.012362	0.000314	0,19
2	-0.043994	0.048275	0.107897	-0.033743	16,1
3	-0.042104	0.135214	0.159490	-0.135235	54,9
4	-0.046293	0.217039	0.111630	-0.095022	27,0
5	-0.052281	0.340448	0.057101	0.117366	21,4
6	-0.044373	0.472171	0.045849	0.304169	119
7	-0.047854	0.593627	0.003578	0.299611	113

4.2.5 Radarová odrazivost dešťové kapky

Nejen meteorologický radar, ale všechny radary měří tuto veličinu, je tedy potřeba si radarovou odrazivost η vyčíslit

$$\eta = \int_0^\infty \sigma(D) \cdot N(D) \cdot dD \left[\frac{mm^2}{m^3} \right], \quad (4.22)$$

kde $\sigma(D)$ je efektivní odrazová plocha dešťové kapky a $N(D)$ je celkový počet dešťových kapek.

4.2.6 Ekvivalentní faktor radarové odrazivosti dešťové kapky

Samotný název této veličiny už může být zavádějící, nejedná se úplně o faktor radarové odrazivosti, který by byl ekvivalentní. Uvádí se, aby snížila vliv vlnové délky λ a proto je i v praxi tolik používaným pojmem, především pak v jednotkách dBZ

$$Z_e = \frac{\lambda^4 \cdot \eta}{\pi^5 \cdot K^2} \left[\frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3} \right], \quad (4.23)$$

kde λ je vlnová délka, K je konstanta závislá na indexu lomu vody dešťové kapky a η je radarová odrazivost.

Po zlogaritmování z_e dostáváme ekvivalentní faktor radarové odrazivosti Z_e v jednotkách dBZ

$$Z_e = 10 \cdot \log_{10}(z_e) [\text{dBZ}], \quad (4.24)$$

kde z_e je faktor radarové odrazivosti.

Tabulka 4-8 – Hodnoty radarové odrazivosti η , faktoru radarové odrazivosti z_e a Z_e pro typické intenzity dešťových srážek R

R (mm/h)	η (mm ² /m ³)	z_e (mm ⁶ /m ³)	Z_e (dBZ)
0.5	9.137	223.284	23.489
2	80.558	1968.510	32.941
8	533.259	13030.760	41.150
32	2605.877	63677.402	48.040
128	9616.992	235001.510	53.711

5 Popis radaru PDCR-35

Meteorologický radar v našem popisu rozdělíme na několik částí a ukážeme každou část zvlášť.

5.1 Anténa



Obrázek 5-1 – Směrová anténa meteorologického radaru PDCR-35

Směrová anténa je v provedení Cassegrain, tj. skládá se z parabolické odrazové plochy o průměru 90 cm a eliptického subreflektoru o průměru 10 cm.

Hlavní výhodou konstrukce je krátký vlnovodný úsek k ozařovači, což v důsledku vede k menším útlumovým ztrátám.

V primárním ozařovači vede přechod z obdélníkového vlnovodu na kruhový vlnovod a ten je zakončený speciální fólií z teflonu.

Primární ozařovač je vyroben z mosazi a povrch je pozlacený. Subreflektor a montážní deska jsou vyrobeny z hliníku a pochromované. Upevňovací části jsou vyrobeny z nerezové oceli. (KLUGMANN, 2008)

5.2 Otočný stojan antény

Z obrázku 5-2 je vidět, jak poklop spodní točny, tak stojan antény, kde mezi těmito díly vznikne asi 40 cm prostor, kde bude napájení, PXI a jiné elektro součástky. Pod černým plechovým krytem se skrývá servomotor, který bude s anténou pohybovat v elevaci. Co je nyní vidět na obrázku 5-2, bude schované pod radomem, což je propustný kryt, aby nedocházelo k poškození povětrnostními vlivy. Na obrázku 5-3 můžeme vidět na svém místě i milimetrovou techniku, která bude připevněna a zakryta.



Obrázek 5-2 – Stojan antény se servomotorem



Obrázek 5-3 - Stojan antény s milimetrovou technikou

5.3 Spodní točna a poklop spodní točny

Obrázky 5-4 a 5-5 znázorňují nejtěžší komponenty meteorologického radaru, jde o poklop spodní točny na obrázku 5-4, na kterém budou rozloženy jednotlivé komponenty meteorologického radaru a samotnou spodní točnu na obrázku 5-5, která se bude s radarem pohybovat ve směru azimutu.



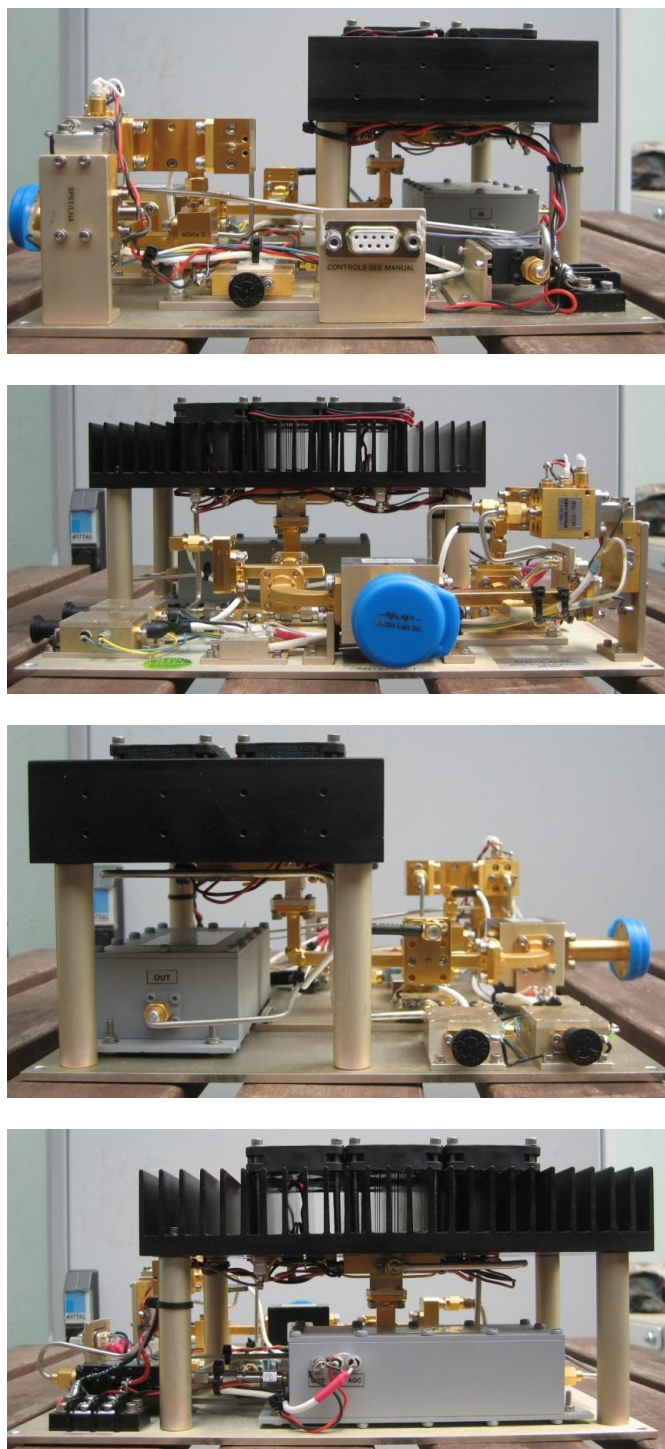
Obrázek 5-4 – Poklop spodní točny



Obrázek 5-5 – Spodní točna meteorologického radaru

5.4 Milimetrová technika

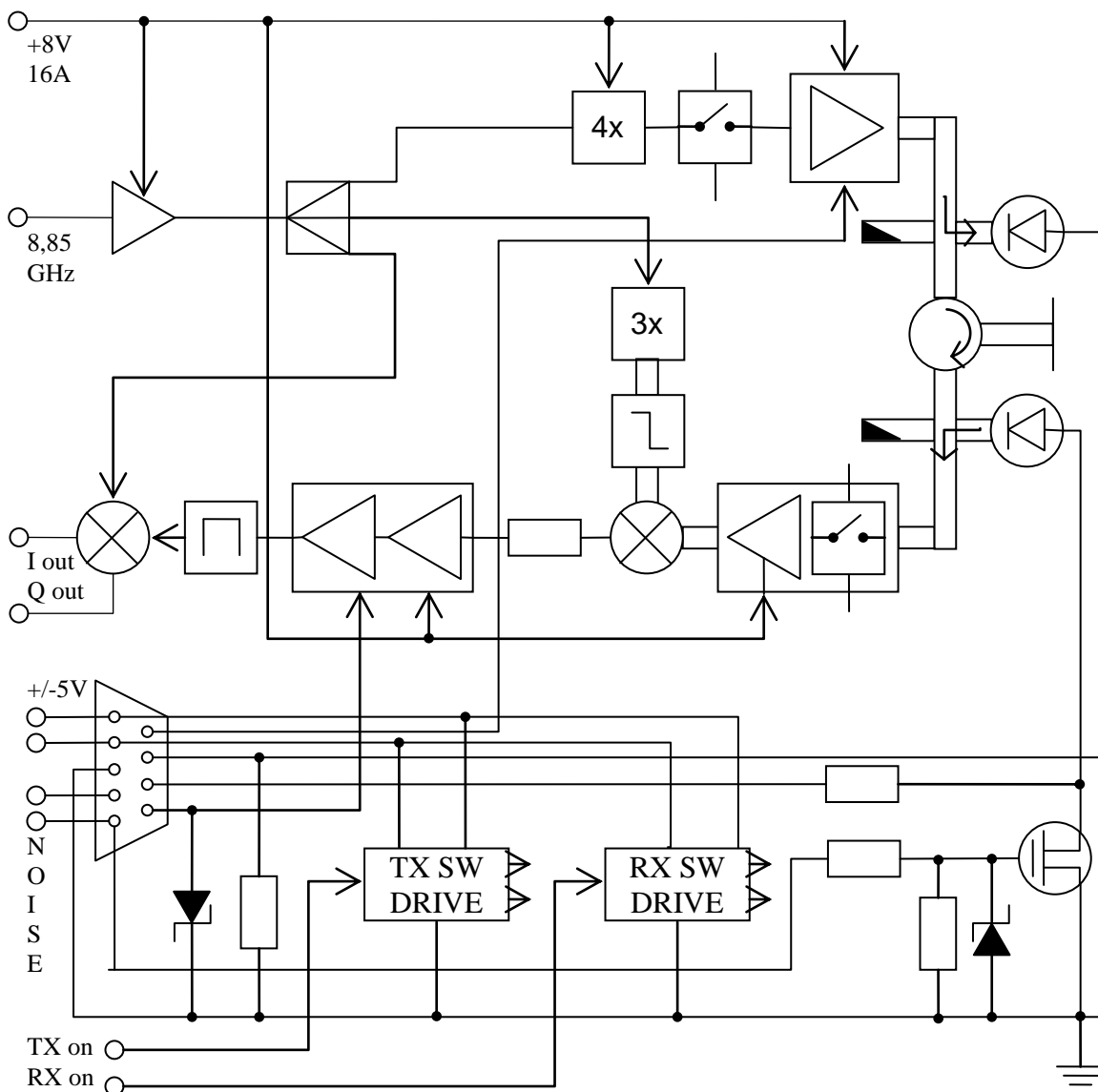
Na obrázku 5-6, který se skládá ze čtyř obrázků, abychom měli pohled na milimetrovou techniku ze všech stran, lze vidět jednotlivé části milimetrové techniky. Tato součást meteorologického radaru je nejdůležitějším prvkem celého komplexu. Bližší popis tohoto dílu nalezneme v kapitole 5-5.



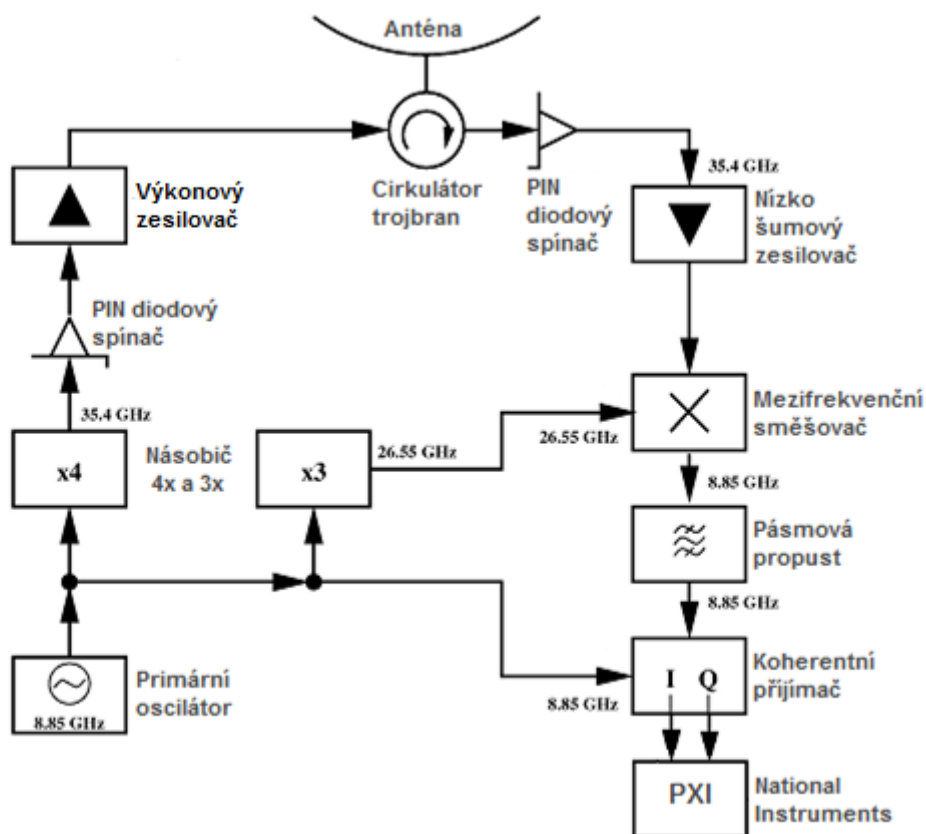
Obrázek 5-6 – Pohled na milimetrový díl ze všech čtyř stran dodaný firmou SPACEK v USA

5.5 Blokové schéma milimetrového bloku

Detailní blokové schéma z obrázku 5-7, ukazuje poměrně přesné zapojení milimetrové techniky meteorologického radaru PDCR-35. Pro názornost a lepší přehlednost si princip funkce FMCW radaru popíšeme na zjednodušeném blokovém schématu z obrázku 5-8.



Obrázek 5-7 – Detailní blokové schéma milimetrového bloku PDCR-35



5-8 – Zjednodušené blokové schéma milimetrového bloku PDCR-35

Princip funkce milimetrového bloku meteorologického radaru popisuje obrázek 5-8, kde primární oscilátor generuje namodulovaný signál (8,85 GHz) a dělí se na dvě větve. První větev je vysílací směr, kde je signál vynásoben násobičem 4x (35,4 GHz) a zesílen výkonovým zesilovačem, než projde cirkulátorem na anténu. Před výkonovým zesilovačem blokuje PIN diodový spínač průchod signálu opačným směrem z důvodu ochrany přijímače před vlastním výkonem.

Cirkulátor je nerekypický trojbran, který je propustný jen ve směru od vysílače k anténě a od antény k přijímači, aby zabránil poškození přijímače. Při příjmu signálu je za cirkulátorem PIN diodový spínač, který ještě pro jistotu zabraňuje průchodu při vysílacím režimu. Nízkošumový zesilovač přijatý signál zesílí (35,4 GHz) a ten je vysměšován mezifrekvenčním směšovačem s trojnásobným kmitočtem primárního oscilátoru (26,55 GHz). Výsledný produkt (8,85 GHz) je filtrován pásmovou propustí a je veden do IQ směšovače, kde po smísení se signálem z primárního oscilátoru (8,85 GHz) dostáváme dva ortogonální signály I a Q, tj. signály v pásmu video.

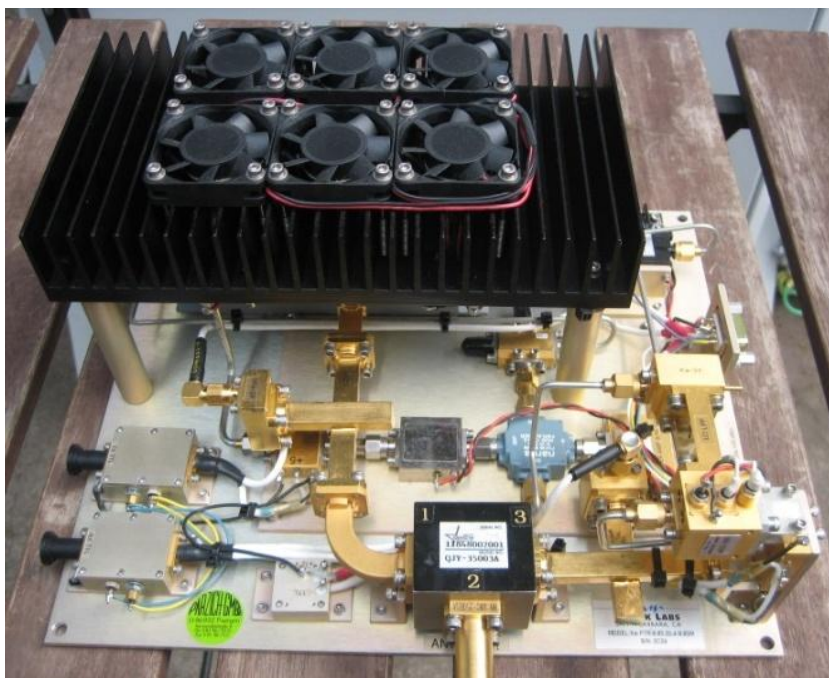
Video signály jsou poté zpracovány v „real time“ modulu analogově-číslicovým převodníkem v průmyslovém počítači PXI od National Instruments.

5.6 Technické údaje radaru

Meteorologický radar PDCR-35 je původně navržen jako plně klimatizovaný a odolný proti povětrnostním vlivům. Teplota uvnitř radomu je sledována a stabilizována. Dodatečné chlazení není vyžadováno, teplotní rozsah provozu je $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Jak provozní tak rušivé elektromagnetické emise budou omezeny v závislosti na radiokomunikačním řádu ITU-R v Ženevě a podle příslušných předpisů České republiky. Přístroj bude homologován dle směrnic EU.

Tento meteorologický radar bude mít ochranu proti přepětí, proti bleskům a EMC i EMP ochranu. Kontrolu systému a zpracování dat provádí PXI od National instruments, (v našem provedení jako průmyslový počítač).



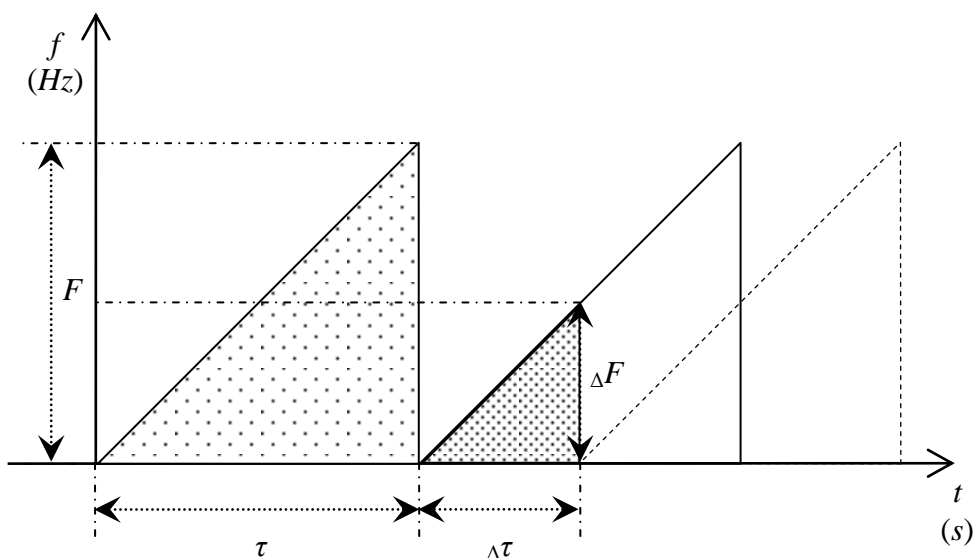
Obrázek 5-9 – Pohled na milimetrový díl dodaný firmou SPACEK v USA

Podrobné technické parametry meteorologického radaru nalezneme v kapitole 10.3 této diplomové práce, kde se tyto údaje porovnávají s parametry meteorologických radarů ČHMÚ.

Další obrázky týkající se meteorologického radaru, které se do této diplomové práce nevešly, nalezneme na příloženém CD.

6 Monostatický FMCW radar

Při této technice radiolokace jsou důležité faktory jako modulační zdvih F a délka pseudo impulsu τ . Oblačný radar ÚFA PDCR-35 používá k radiolokaci FMCW a vyhodnocuje rozdíl modulační frekvence ΔF vyslaného a přijatého signálu. Nejprve jsme zvažovali, zda by se nedal vzdálený cíl určit i z rozdílu časového impulsu $\Delta\tau$ přijatého a vyslaného signálu. Po konzultaci s panem RNDr. Janem Kračmářem z ŘLP jsme usoudili, že se takto meteorologický cíl neurčuje. Kmitočtový zdvih F se volí od 1 do 10 MHz a v této analýze se pokusíme zjistit, který případ je pro nás neoptimálnější.



Obrázek 6-1 – Princip funkce a popis veličin při FMCW radiolokaci

6.1 Výpočet délky pixelu a délky impulsu

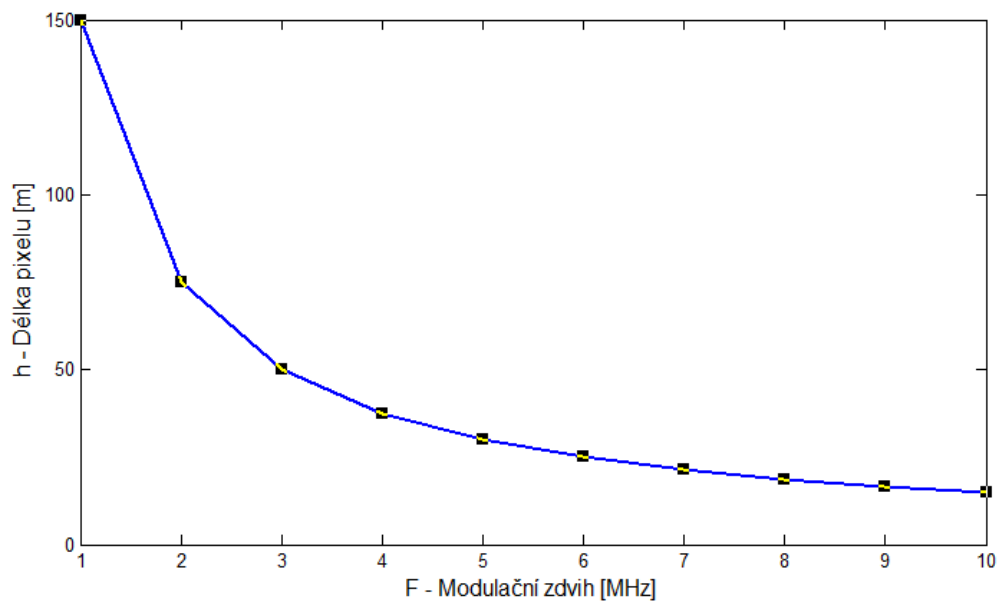
Důležitou veličinou pro analýzu radarové funkce je délka pixelu h , která se pro pulzní radar spočítá dle níže uvedeného vzorce (6.2). Neznámá délka impulsu τ je zde vlastně perioda signálu. Pomocí jednoduchého vztahu (6.1) pro periodu signálu si přizpůsobíme vzorec pro výpočet délky impulsu h s modulačním zdvihem F .

$$F = \frac{1}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{1}{F} [s], \quad (6.1)$$

kde τ je délka impulsu a F je modulační zdvih.

$$h = \frac{c \cdot \tau}{2} = \frac{c}{2 \cdot F} [m], \quad (6.2)$$

kde τ je délka impulsu, c je rychlost světla a F je modulační zdvih.

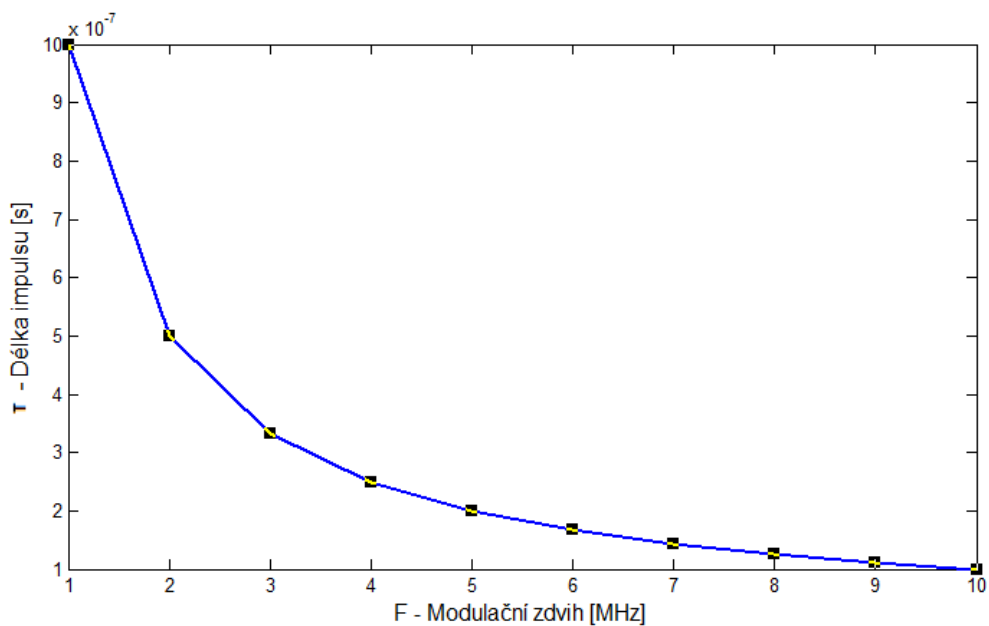


Obrázek 6-2 – Graf závislosti délky pixelu h na modulačním zdvihu F ; Zvýrazněné body na křivce nalezneme v tabulce 6-1

Ze stejného vzorce pro délku pixelu h , která je nám nyní známá, si odvodíme vztah pro délku impulsu τ

$$h = \frac{c \cdot \tau}{2} \Rightarrow \tau = \frac{h \cdot 2}{c} [s], \quad (6.3)$$

kde h je délka pixelu a c je rychlost světla.



Obrázek 6-3 – Graf závislosti délky impulsu τ na modulačním zdvihu F ; Zvýrazněné body na křivce nalezneme v tabulce 6-1

Tabulka 6-1 – Vypočtené hodnoty délky pixelu h a délky impulsu τ v závislosti na modulačním zdvihu F

F (MHz)	h (m)	τ (μ s)
1	150	1
2	75	0,5
3	50	0,333
4	37	0,25
5	30	0,2
6	25	0,167
7	21	0,143
8	18	0,125
9	16	0,111
10	15	0,1

Ze spočítaných hodnot je patrné, že se stoupajícím kmitočtovým zdvihem F klesá délka pixelu h i délka impulsu τ , což má za následek i snižování dosahu radaru, jak si v následující analýze ukážeme podrobněji. U tohoto oblačného radaru budeme počítat s modulačním zdvihem $F = 5$ MHz, protože v tomto případě je délka pixelu $h = 30$ m.

6.2 Výpočet vzdálenosti cíle a dosahu radaru

Při pohledu na obrázek 6-1, si můžeme všimnout podobnosti trojúhelníků, která vznikne při detekci odraženého signálu. Z této podobnosti si odvodíme vztah, pomocí kterého vypočítáme vzdálenost cíle od radaru a zároveň i maximální dosah radaru r_{max}

$$\frac{F}{\tau} = \frac{\Delta F}{\Delta \tau}, \quad (6.4)$$

kde F je modulační zdvih, τ je délka impulsu, ΔF je rozdíl přijatého a vyslaného modulačního zdvihu a $\Delta \tau$ je rozdíl délky impulsu přijatého a vyslaného signálu.

Modulační zdvih F měníme od 1 do 10 MHz, jak bylo výše uvedeno, délku impulsu τ jsme si již spočítali. Rozdíl modulačního zdvihu přijatého a vyslaného signálu ΔF nám měří oblačný meteorologický radar a tak zbývá určit jen rozdíl délky impulsu přijatého a vyslaného signálu $\Delta \tau$.

Ze vztahu (6.3) pro výpočet délky impulsu τ si odvodíme rozdíl délky impulsu přijatého a vyslaného signálu $\Delta \tau$, kde namísto délky pixelu h dosadíme vzdálenost cíle r

$$\Delta \tau = \frac{r \cdot 2}{c} [s], \quad (6.5)$$

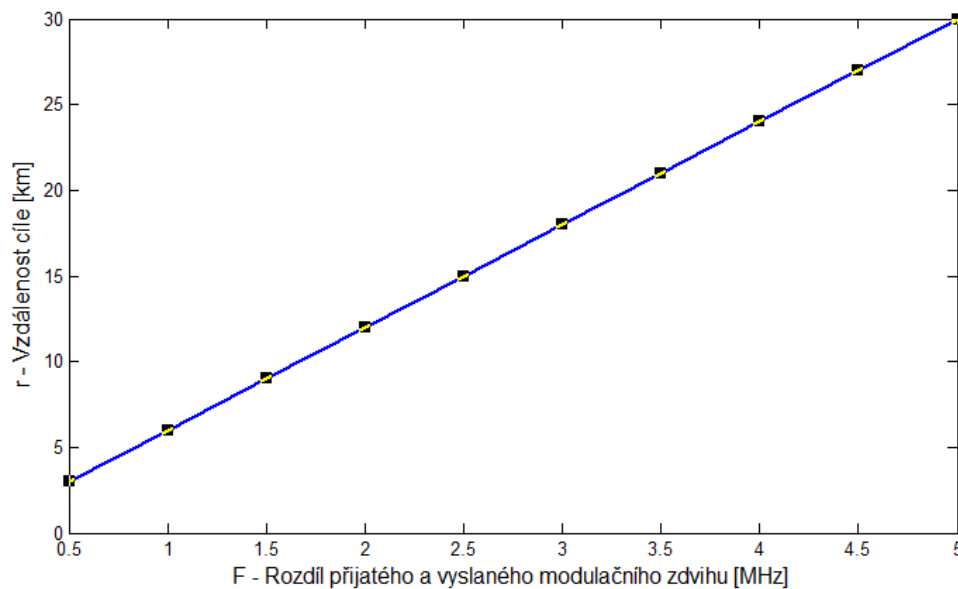
kde c je rychlost světla a r je vzdálenost cíle.

Po dosazení vztahu (6.5) do vzorce (6.4) odvodíme vzorec (6.6) pro výpočet vzdálenosti cíle r od radaru. Pokud bude maximální rozdíl přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF_{max} , pak výsledná vzdálenost cíle je zároveň i maximálním dosahem oblačného radaru r_{max}

$$\frac{F}{\tau} = \frac{\Delta F}{\frac{r \cdot 2}{c}} \Rightarrow \frac{F}{\tau} = \frac{\Delta F \cdot c}{r \cdot 2} \Rightarrow r = \frac{\Delta F \cdot c \cdot \tau}{F \cdot 2} [m], \quad (6.6)$$

kde ΔF je rozdíl přijatého a vyslaného modulačního zdvihu, c je rychlost světla, τ je délka impulsu a F je modulační zdvih.

Jelikož lze měnit modulační zdvih F od 1 do 10 MHz a tento modulační zdvih F rozdělujeme na deset částí, abychom byli schopni analyzovat, jak je cíl vzdálený při různých rozdílech přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF , popíšeme si jen jeden případ a to ten, při kterém je délka pixelu $h = 30$ m a modulační zdvih $F = 5$ MHz.

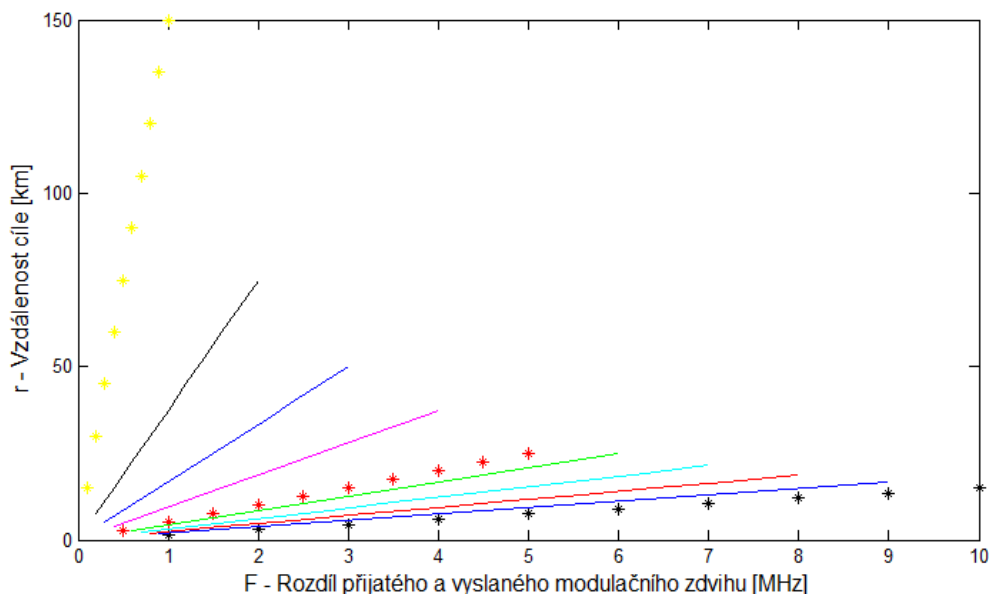


Obrázek 6-4 – Graf závislosti vzdálenosti cíle r na rozdílu přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF ; Zvýrazněné body na přímce nalezneme v tabulce 6-2

Na obrázku 6-4 a v tabulce 6-2 je vidět, jaká bude vzdálenost cíle r při různých rozdílech přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF . Tyto hodnoty lze sledovat na všech zvolených modulačních zdvizech F , ale to by zabralo mnoho místa v této práci.

Tabulka 6-2 – Vypočítané hodnoty vzdálenosti cíle r v závislosti na rozdílu přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF

ΔF [MHz]	r [km]
0,5	3
1,0	6
1,5	9
2,0	12
2,5	15
3,0	18
3,5	21
4,0	24
4,5	27
5,0	30



Obrázek 6-5 – Graf závislosti vzdálenosti cíle r na rozdílu přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF ; Kde $\Delta F = 1$ MHz (žluté hvězdičky), $\Delta F = 2$ MHz (černá), $\Delta F = 3$ MHz (modrá), $\Delta F = 4$ MHz (fialová), $\Delta F = 5$ MHz (červené hvězdičky), $\Delta F = 6$ MHz (zelená), $\Delta F = 7$ MHz (světle modrá), $\Delta F = 8$ MHz (červená), $\Delta F = 9$ MHz (modrá), $\Delta F = 10$ MHz (černé hvězdičky)

V obrázku 6-5 znázorňují koncové body jednotlivých modulačních zdvihů F dosah radaru r_{max} . Tyto hodnoty nalezneme v tabulce 6-3.

Tabulka 6-3 – Vypočítané hodnoty maximální vzdálenosti cíle r_{max} (ovšem pokud bude cíl detekovatelný) v závislosti na maximálním rozdílu přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF_{max}

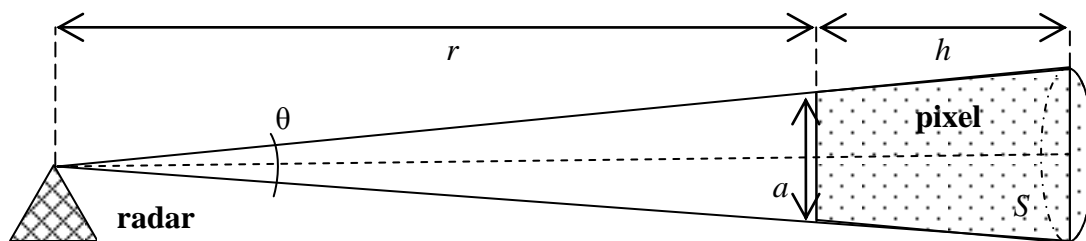
ΔF_{max} [MHz]	r_{max} [km]
1	150
2	75
3	50
4	37,5
5	30
6	25
7	21,43
8	18,75
9	16,67
10	15

Při této analýze si můžeme všimnout, jak se nám se zvyšujícím modulačním zdvihem F zmenšuje délka pixelu h a na ní závislá délka impulsu τ , analogicky k tomu se nám snižuje i dosah radaru. Jak délka impulsu τ , tak délka pixelu h jsou na sobě závislé a v podstatě určují dosah a citlivost oblačného radaru.

Ostatní tabulky a hodnoty všech ostatních modulačních zdvihů si lze vyzkoušet a prozkoumat jak na příloženém CD, tak i v příloze tohoto dokumentu.

7 Minimální parametry cíle, které lze ještě radarem detekovat

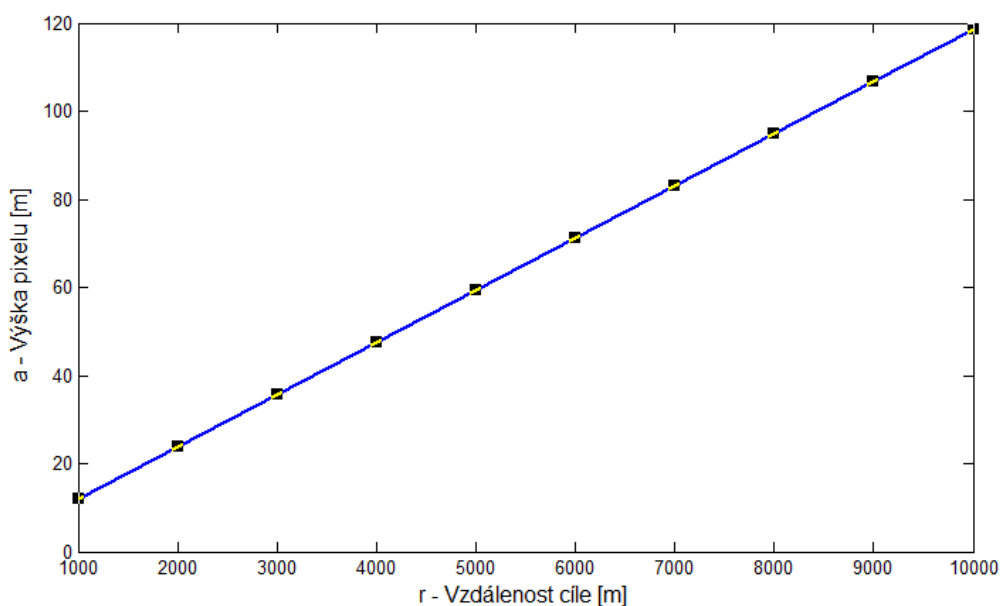
Vycházíme z parametrů námi analyzovaného radaru PDCR-35 tj. vyzařovací úhel anténního svazku $\theta = 0,68^\circ$, rychlost světla $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, kmitočet $f = 35,4$ GHz, zisk antény $G = 45$ dBi, vyslaný výkon $P_t = 4$ W, minimální rozpoznatelný přijatý výkon $P_{r_{min}} = -86$ dBm (-96 dBm + 10 dB kvůli požadovanému odstupu signál nad šumem), vlnová délka $\lambda = 8,6$ mm. Zbylé potřebné parametry si dopočítáme a vzdálenost cíle r s délkou pixelu h si zvolíme podle potřeby. (FROHBURG, 2010)



Obrázek 7-1 – Znázornění radiolokace a popsání jednotlivých veličin

Abychom si mohli vypočítat velikost pixelu, musíme si spočítat výšku pixelu a . Docílíme tak pomocí goniometrické funkce *tangens* z poloviny vyzařovacího úhlu anténního svazku θ a vzdálenosti cíle r . Vzdálenost cíle r si budeme měnit cyklem např. od 1 do 10 km. Ve srovnání s velkými radary je tato vzdálenost cíle r malá, ale tento oblačný radar slouží k jiným účelům.

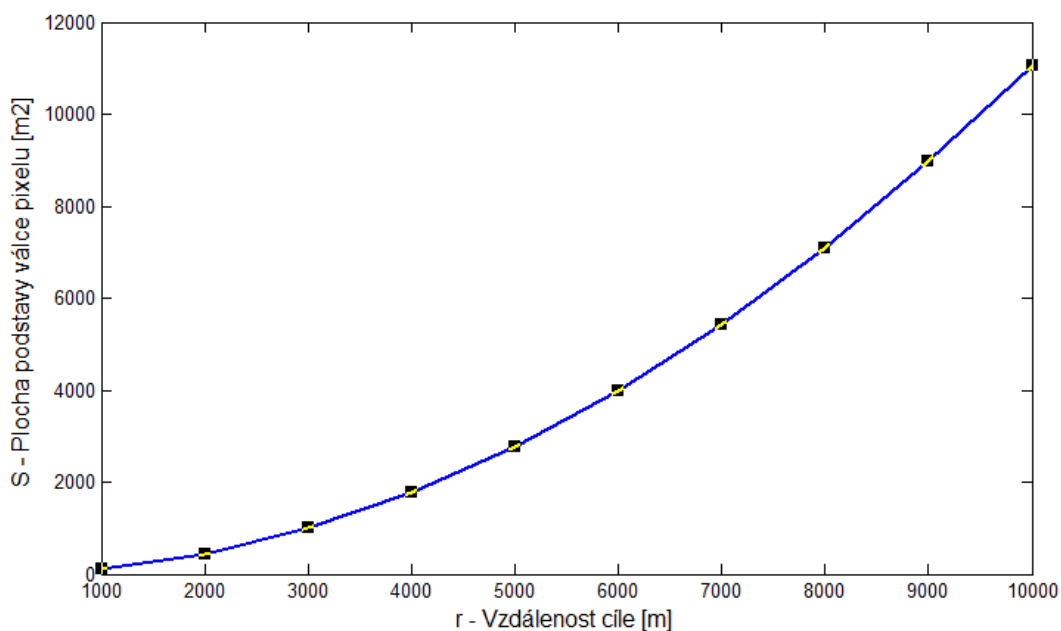
$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{a}{2r} \Rightarrow \frac{a}{2} = r \cdot \tan \frac{\theta}{2} \Rightarrow a = 2 \cdot r \cdot \tan \frac{\theta}{2} [m] \quad (7.1)$$



Obrázek 7-2 – Graf závislosti výšky pixelu a na vzdálenosti cíle r

Radarový signál se šíří kulovou vlnou, tudíž si lze spočítat plochu S , kterou zabírá svým vyzářovacím úhlem anténního svazku θ . Do rovnice pro plochu kruhu dosadíme vzdálenost cíle r a vyzářovací úhel anténního svazku θ , který se zde musí udávat v radiánech!

$$S = \pi \cdot \left(\frac{\theta \cdot r}{2}\right)^2 [m^2] \quad (7-2)$$



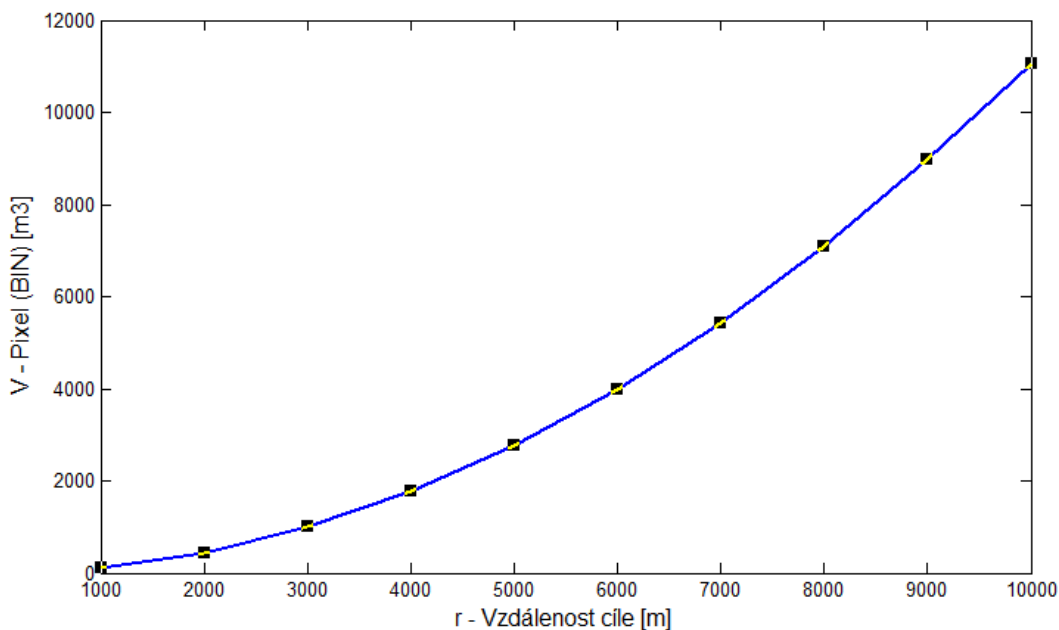
Obrázek 7-3 – Graf závislosti plochy podstavy válce pixelu S na vzdálenosti cíle r

Pro pulzní oblačný radar volíme typickou hodnotu $h = 35$ m, vypočítaný z níže uvedeného vztahu, ale pro FMCW oblačný radar a snazší využití v praxi budeme veličinu h volit 1 m, aby byl výsledek normovaný a šel případně snadno přepočítat do jiných vzdáleností prostým násobením délkou pixelu h .

$$h = \frac{\tau \cdot c}{2} [m], \quad (7.3)$$

Pixel je v podstatě komolý kužel, lze jej však aproximovat válcem a díky vzorci pro objem válce si spočítáme velikost pixelu, dosazovat budeme plochu podstavy válce pixelu S a délku pixelu h . Opět ve srovnání s velkými radary, je délka pixelu h malá, ale pro naše účely postačující.

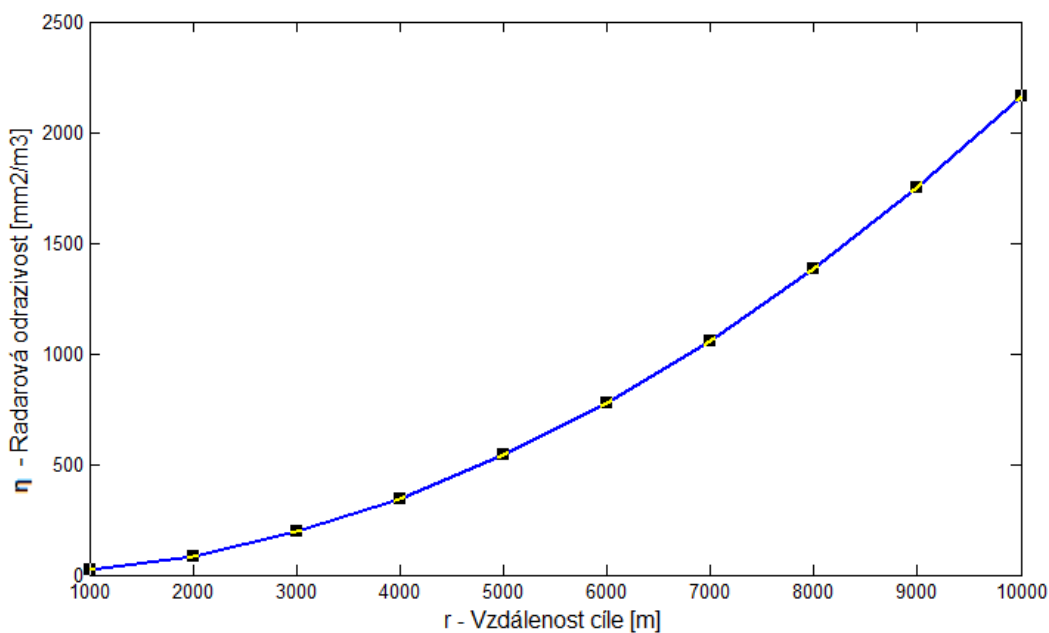
$$V = S \cdot h [m^3], \quad (7.4)$$



Obrázek 7-4 – Graf závislosti objemu pixelu (BINu) na vzdálenosti cíle r

Úpravou radarové rovnice v meteorologii si vypočítáme radarovou odrazivost η , ale dosazujeme délku pixelu h z rovnice (7.3), kterou máme zvolenou, jak bylo uvedeno výše. Vzdálenost cíle r se zde udává v milimetrech, jelikož je tato výsledná jednotka používána v meteorologické praxi.

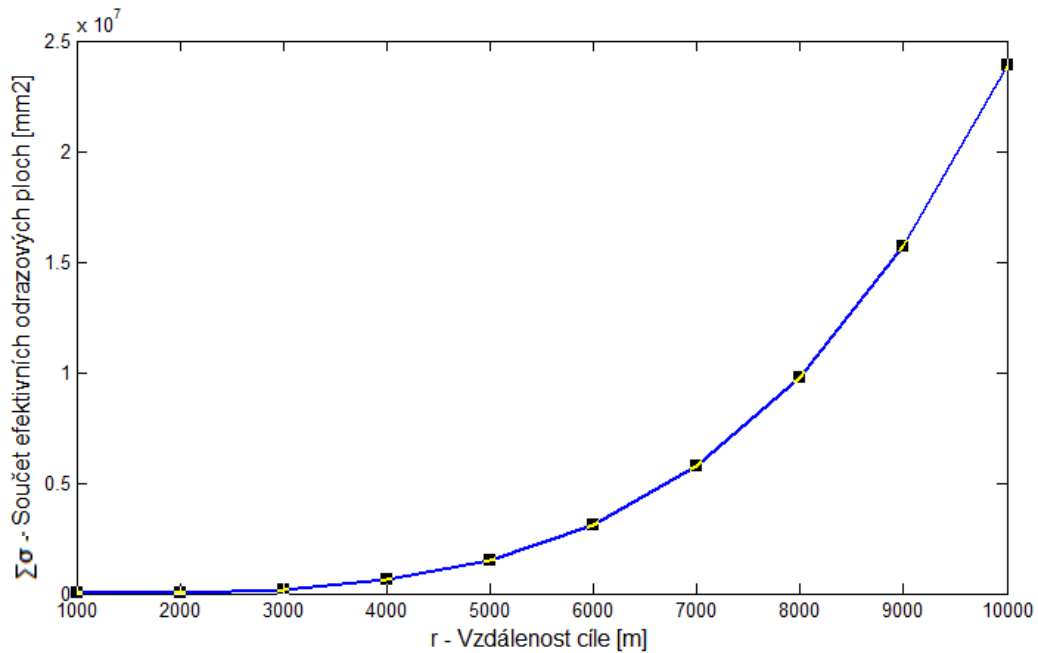
$$P_r = \frac{\eta \cdot \lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t \cdot \theta^2 \cdot \tau \cdot c}{r^2 \cdot \pi^2 \cdot \ln 2 \cdot 2^{10}} \Rightarrow \eta_{min} = \frac{2^9 \cdot P_r \cdot \pi^2 \cdot \ln 2 \cdot r^2}{h \cdot \lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t \cdot \theta^2} \left[\frac{mm^2}{m^3} \right] \quad (7.5)$$



Obrázek 7-5 – Graf závislosti minimální radarové odrazivosti η_{min} na vzdálenosti cíle r

Z jednoduché definice pro výpočet radarové odrazivosti η si vypočítáme součet efektivních odrazových ploch $\sum\sigma(D)$ v pixelu, pomocí radarové odrazivosti η a objemu pixelu V . Jednotky $\sum\sigma(D)$ jsou milimetry čtvereční, protože v meteorologii se udávají velikosti dešťových kapek v milimetrech.

$$\eta = \frac{\sum\sigma(D)}{V} \Rightarrow \sum\sigma(D)_{min} = \eta_{min} \cdot V [mm^2] \quad (7.6)$$



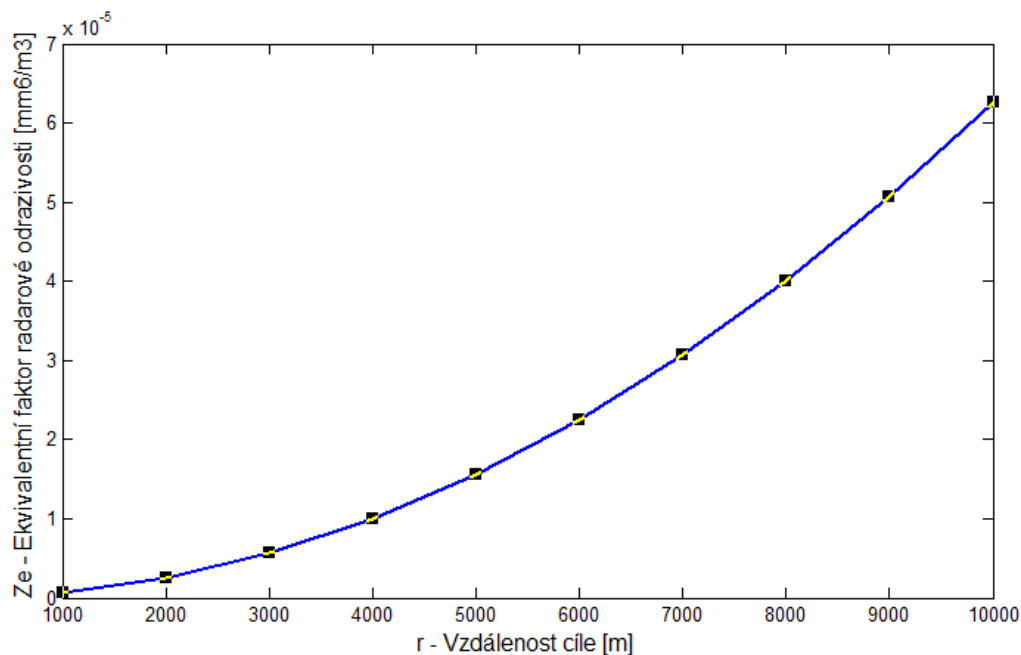
Obrázek 7-6 – Graf závislosti minimálního součtu efektivních odrazových ploch $\sum\sigma(D)_{min}$ na vzdálenosti cíle r

Pro výpočet ekvivalentního faktoru radarové odrazivosti z_e si musíme spočítat konstantu K , která se vypočítá pomocí index lomu vody dešťové kapky m , kde pro ilustraci volíme za teplotu vzduchu mezinárodní standardní meteorologickou hodnotu atmosféry $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$!

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} [-] \quad (7.7)$$

Nyní si můžeme vypočítat zmiňovaný ekvivalentní faktor radarové odrazivosti z_e , kde dosazujeme vlnovou délku λ , radarovou odrazivost η a konstantu K . Vlnová délka λ se zde dosazuje v milimetrech, jelikož uvedená výsledná jednotka z_e je základní kámen pro odvozování všech ostatních jednotek v radarové meteorologii.

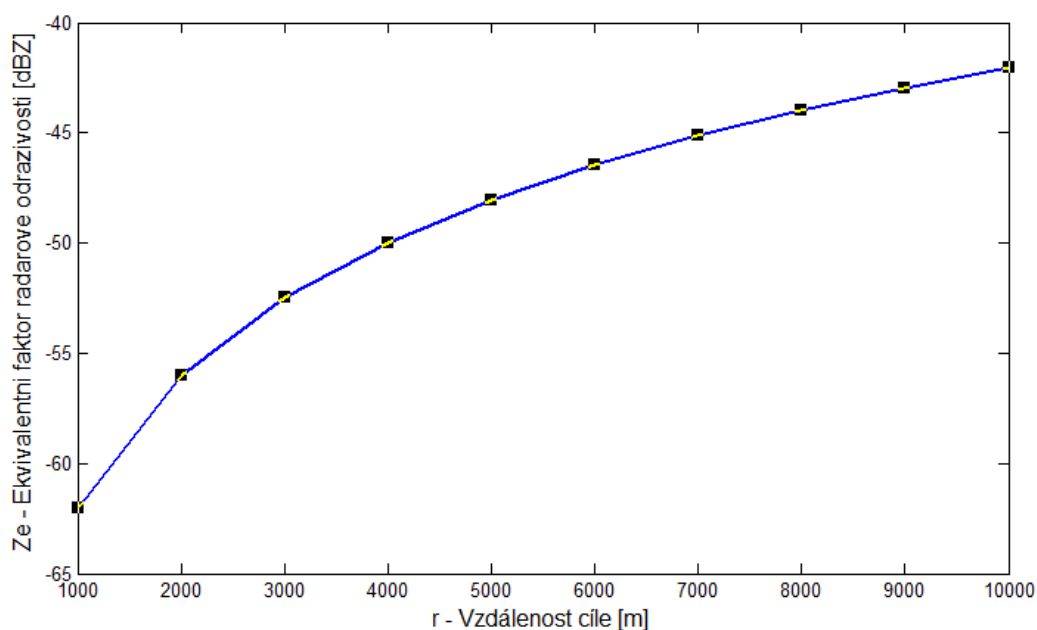
$$z_{e min} = \frac{\lambda^4 \cdot \eta_{min}}{\pi^5 \cdot K^2} \left[\frac{mm^6}{m^3} \right] \quad (7.8)$$



Obrázek 7-7 – Graf závislosti minimálního ekvivalentního faktoru radarové odrazivosti $z_{e\ min}$ na vzdálenosti cíle r

Následně převedeme ekvivalentní faktor radarové odrazivosti Z_e do logaritmické veličiny dBZ, která je typická pro radarovou meteorologii. Nesmírnou výhodou veličiny dBZ je, že s ní můžeme pracovat podobně jako např. s jednotkou výkonu udanou v dBm apod.

$$Z_{e\ min} = 10 \cdot \log_{10}(z_{e\ min}) [dBZ] \quad (7.9)$$



Obrázek 7-8 – Graf závislosti minimálního ekvivalentního faktoru radarové odrazivosti $Z_{e\ min}$ [dBZ] na vzdálenosti cíle r

Tabulka 7-1 – Vypočítané hodnoty jednotlivých veličin pixelu pro vzdálenost cíle $r = 1 - 10$ km při délce pixelu $h = 1$ m

r (m)	a (m)	S (m ²)	V (m ³)	η_{min} (mm ² /m ³)	$\sum\sigma(D)_{min}$ (mm ²)	$z_{e\ min}$ (mm ⁶ /m ³)	$Z_{e\ min}$ (dBZ)
1000	11.868	110.627	110.630	21.621	2.392 e+3	6.256 e-7	-62.037
2000	23.737	442.509	442.520	86.483	3.827 e+4	2.502 e-6	-56.017
3000	35.605	995.646	995.669	194.586	1.937 e+5	5.630 e-6	-52.495
4000	47.474	1770.037	1770.079	345.931	6.123 e+5	1.001 e-5	-49.996
5000	59.342	2765.683	2765.748	540.517	1.495 e+6	1.564 e-5	-48.058
6000	71.210	3982.584	3982.677	778.345	3.100 e+6	2.252 e-5	-46.474
7000	83.079	5420.739	5420.867	1059.414	5.743 e+6	3.065 e-5	-45.135
8000	94.947	7080.149	7080.316	1383.724	9.797 e+6	4.004 e-5	-43.975
9000	106.815	8960.814	8961.024	1751.276	1.569 e+7	5.067 e-5	-42.952
10000	118.684	11062.733	11062.993	2162.069	2.392 e+7	6.256 e-5	-42.037

Výše uvedená tabulka udává minimální radarovou odrazivost η_{min} , minimální součet efektivních odrazových ploch $\sum\sigma(D)_{min}$, minimální faktor radarové odrazivosti $z_{e\ min}$ a minimální faktor radarové odrazivosti $Z_{e\ min}$ [dBZ], který je radar ještě schopen detekovat, v závislosti na vzdálenosti cíle r , tedy pokud je meteorologický cíl detekovatelný. V této tabulce jsou udány i hodnoty výšky pixelu a , plochy podstavy pixelu S a objemu (velikosti) pixelu (BINu) V v závislosti na vzdálenosti cíle r .

Je zřejmé, že slabá echa cílů jsou zachytitelná jen v blízkosti oblačného radaru a silná echa až do desítek kilometrů, vše závisí na délce pixelu h a s tím analogicky spojený kmitočtový zdvih F u FMCW oblačného radaru.

Co se týče dosahu radaru, tak klasické pulzní oblačné radary pracují ve stovkách kilometrů, kdežto PDCR-35 oblačný radar pracuje v jednotkách kilometrů.

Tuto analýzu si lze prohlédnout nebo vyzkoušet v příloženém matlab souboru, který nalezneme jak v příloze, tak v příloženém CD. Samozřejmě dosazením vlastních prvotních hodnot se vše přepočítá a zobrazí pro konkrétní hodnoty.

8 V praxi používané jednotky v radarové meteorologii

V radarové meteorologii se pracuje s mnohem menšími jednotkami než u klasických radarů, jelikož průměry oblačných kapek se pohybují v řádu mikrometrů a dešťové kapky se pohybují v řádu milimetrů. Proto se v radarové meteorologii veličiny převádějí do milimetrových jednotek, které jsou v tomto oboru typické. Musíme dávat pozor při značení, abychom nepočítali s chybou, jelikož se velmi často v některých publikacích zaměňuje průměr a poloměr u dešťových kapek a oblačných kapiček, což je značný problém.

Průměr dešťové nebo oblačné kapky

$$D \equiv mm. \quad (8.1)$$

Konstanta závislá na indexu lomu vody dešťové kapky

$$K = \frac{m^2-1}{m^2+2} = \frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+2} \equiv [-], \quad (8.2)$$

kde m je index lomu vody dešťové kapky a ε_r je relativní permitivita vody dešťové kapky.

Efektivní odrazová plocha oblačné kapičky (platí jen pro Rayleigho aproximaci)

$$\sigma = \frac{\pi^5 \cdot K^2 \cdot D^6}{\lambda^4} \equiv \frac{mm^6}{mm^4} = mm^2, \quad (8.3)$$

kde se vlnová délka λ udávána v milimetrech.

Spektrum velikosti dešťových kapek

$$n_D(D) = N_0 \cdot e^{-\Lambda \cdot D} \equiv \frac{1}{m^3 \cdot mm}, \quad (8.4)$$

kde $N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ a $\Lambda = 4,1 \cdot R^{-0,21} \text{ mm}^{-1}$, tyto hodnoty odvodili Marshall a Palmer do svého rozdělení pro typický déšť v závislosti na intenzitě srážek R .

Radarová odrazivost

$$\eta = \frac{\sum \sigma(D)}{V} \equiv \frac{mm^2}{m^3} \quad (8.5)$$

$$\eta = \int_0^\infty \sigma(D) \cdot N(D) \cdot dD \equiv \frac{mm^2 \cdot mm}{m^3 \cdot mm} = \frac{mm^2}{m^3} \quad (8.6)$$

$$\eta = \frac{2^{10} \cdot P_r \cdot \pi^2 \cdot \ln 2 \cdot r^2}{\tau \cdot c \cdot \lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t \cdot \theta^2} \equiv \frac{s \cdot W \cdot mm^2}{s \cdot m \cdot m^2 \cdot W} = \frac{mm^2}{m^3}, \quad (8.7)$$

kde vzdálenost cíle r je udána v milimetrech.

Ekvivalentní faktor radarové odrazivosti

$$Z_e = \frac{\lambda^4 \cdot \eta}{\pi^5 \cdot K^2} \equiv \frac{mm^4 \cdot mm^2}{m^3} = \frac{mm^6}{m^3}, \quad (8.8)$$

kde se vlnová délka λ dosazuje v milimetrech.

Ekvivalentní faktor radarové odrazivosti se udává po logaritmování v dBZ pouze tehdy, má-li tato veličina jednotku v mm^6/m^3 ! V radarové meteorologii je jednotka dBZ používána pro svou jednoduchost.

$$Z_e = 10 \cdot \log_{10} z_e \equiv dBZ. \quad (8.9)$$

Faktor radarové odrazivosti

$$z = \int_0^\infty D^6 \cdot N(D) \cdot dD \equiv \frac{mm^6 \cdot mm}{m^3 \cdot mm} = \frac{mm^6}{m^3}. \quad (8.10)$$

Poznámka: Aby nedocházelo k zaměňování veličin ekvivalentního faktoru radarové odrazivosti v různých jednotkách, tak Z_e v jednotkách dBZ se značí velké a z_e v jednotkách mm^6/m^3 se značí malé. Tyto dvě veličiny, se velmi často pletou nebo špatně značí a pak dochází k nedorozumění neopatrným značením.

Přijatý výkon radarem

$$P_r = \frac{\eta \cdot \lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t \cdot \theta^2 \cdot \tau \cdot c}{r^2 \cdot \pi^2 \cdot \ln 2 \cdot 2^{10}} \equiv \frac{mm^2 \cdot m^2 \cdot W \cdot m \cdot s}{mm^2 \cdot m^3 \cdot s} = W, \quad (8.11)$$

kde se vzdálenost cíle r udává v milimetrech.

9 Postup při vyhodnocování radarových dat

V následujících řádcích si popíšeme postup, jak pracovat s meteorologickým radarem, tedy jak zpracovat přijatá data a jak s nimi správně naložit. Nelze se spokojit jen s naměřenými daty, ale důležité je dobře je vyhodnotit. Z radarového systému potřebujeme pro základní měření tři primární údaje, a to přijatý výkon P_r , modulačních zdvihů F a rozdíl přijatého a vyslaného modulačního zdvihu ΔF .

Nejen meteorologický radar, ale jakýkoliv radar přijímá odražený signál od vzdáleného cíle, jehož výkon je dán rovnicí (2.23) v podkapitole 2.4.

Vzdálené cíle určíme z rovnice (6.6), kterou si můžeme velmi zjednodušit, tedy

$$r = \frac{\Delta F \cdot c \cdot \tau}{F \cdot 2} = \Delta F \cdot \tau \cdot h [m], \quad (9.1)$$

kde ΔF je rozdíl přijatého a vyslaného modulačního zdvihu, τ je délka impulsu a h je délka impulsu, viz podkapitola 6.1, kde jsme pro délku pixelu h odvodili vztah

$$h = \frac{c}{2 \cdot F} [m], \quad (9.2)$$

kde c je rychlost světla a F je modulačních zdvihů.

Z přijatého výkonu P_r si vypočítáme radarovou odrazivost η

$$\eta = \frac{2^9 \cdot P_r \cdot \pi^2 \cdot \ln 2 \cdot r^2}{h \cdot \lambda^2 \cdot G^2 \cdot P_t \cdot \theta^2} = \frac{P_r \cdot r^2}{C_r} \left[\frac{mm^2}{m^3} \right], \quad (9.3)$$

kde h je délka pixelu, λ je vlnová délka, G je zisk antény, P_t je přijatý výkon, θ je šířka anténního svazku, P_r je přijatý výkon, r je vzdálenost cíle a C_r je meteorologický potenciál, který jsme vyčíslili v podkapitole 2.4 na $C_r = 52,281 \cdot 10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^3$.

Když známe radarovou odrazivost η , spočítáme si ekvivalentní faktor radarové odrazivosti z_e , který se používá v meteorologické praxi a je dán rovnicí

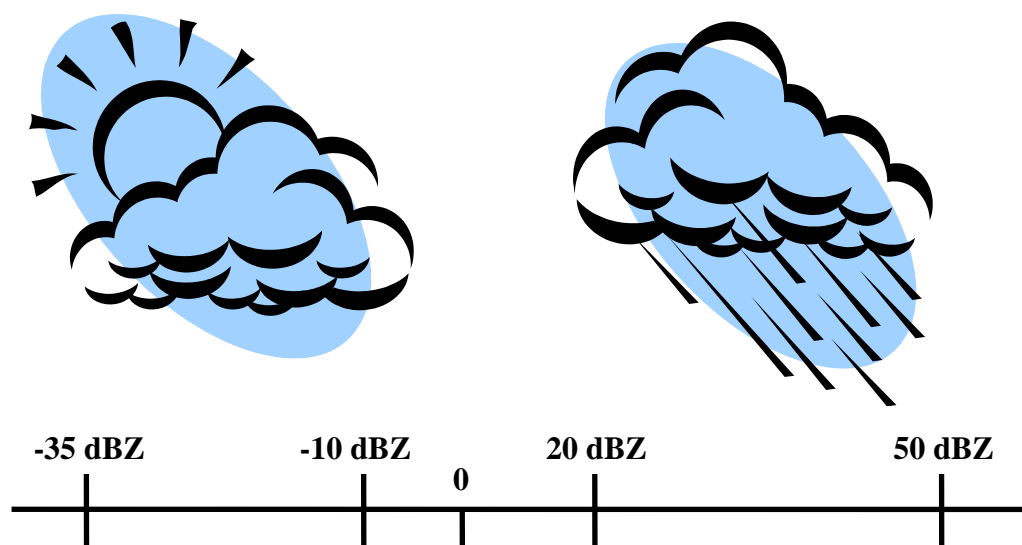
$$z_e = \frac{\lambda^4 \cdot \eta}{\pi^5 \cdot K^2} \left[\frac{mm^6}{m^3} \right], \quad (9.4)$$

kde λ je vlnová délka, η je radarová odrazivost a K je konstanta závislá na indexu lomu vody oblačné kapičky nebo dešťové kapky, dána výrazem (8.2) v kapitole 8.

V praxi se ekvivalentní faktor radarové odrazivosti z_e v základních jednotkách moc nepoužívá, proto si jej přepočítáme logaritmováním do jednotky dBZ, která pro svou přehlednost a jednoduchost našla své místo v meteorologii, tj.

$$Z_e = 10 \cdot \log_{10} z_e [dBZ], \quad (9.5)$$

kde z_e je ekvivalentní faktor radarové odrazivosti.



Obrázek 9-1 – grafická interpretace naměřených dat meteorologickým radarem

Výše uvedený obrázek 9-1 nám graficky znázorňuje, jaký cíl meteorologický radar PDCR-35 skenuje, pokud ovšem získáme hodnoty vyznačené na stupnici. Hodnoty uvedené v obrázku 9-1 se odvíjejí od analýz v kapitolách 4.1 a 4.2.

Tedy, pokud by se přijatý ekvivalentní faktor radarové odrazivosti z_e pohyboval v rozmezí od -35 dBZ do -10 dBZ, jedná se o oblačný cíl a pokud by se pohyboval v rozmezí od 20 dBZ do 50 dBZ, jedná se o odraz od dešťové srážky.

Můžeme si zde všimnout pásma, které není nijak označené a nic neznázorňuje, je to pásmo od -10 dBZ do 20 dBZ. Toto pásmo je neidentifikovatelným pásmem a nejsme schopni s určitou pravděpodobností charakterizovat, zda se jedná o dešťovou srážku nebo o oblaka, ale může také jít o jejich kombinaci.

10 Radarová síť CZRAD

Radarová meteorologie v České republice používá radarovou síť CZRAD, která je tvořena dvěma dopplerovskými radary pracujícími v pásmu C. Radary jsou umístěny na vrchu Tok v Brdech u Prahy a na vrchu Skalky u Protivanova. Jimi pokryté území a samotné polohy radarů jsou znázorněny na obrázku 10-1.

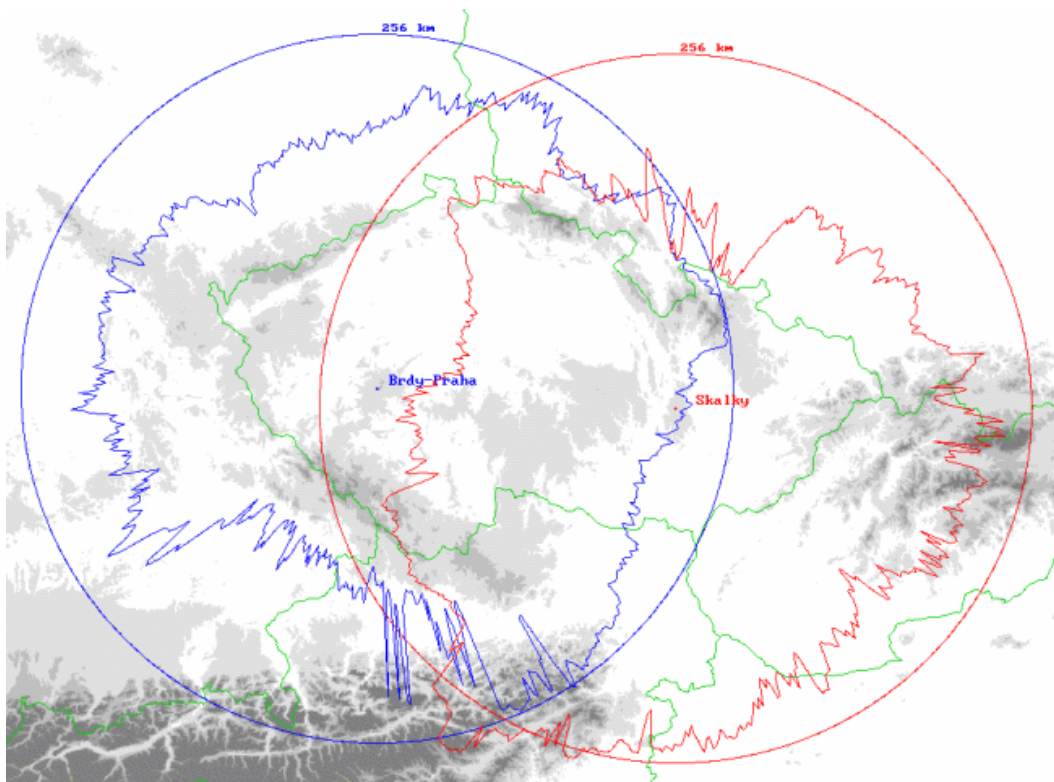
Objemová radarová data mají rozlišení 1° v azimutu a 500 metrů v radiálním směru. Pole PPI je vypočteno z objemových dat pomocí bilineární interpolace v horizontální rovině a elevace zůstává zachována jako vertikální souřadnice. Pro výpočet pole CAPPI je použita trilineární interpolace z objemových dat. Interpolace je v obou případech prováděná po přepočtu dat na intenzitu srážek R v mm/h.

Pro převod dat do kartézských souřadnic je používána gnomonická projekce se středem v Praze Libuši. V ČHMÚ je standardní rozlišení kartézských dat 1×1 km horizontálně a 0.5 km vertikálně. Výjimkou je však produkt ETOP, jehož vertikální rozlišení je 0,1 km.

Do roku 2003 se snímací strategie obou radarů skládala z deseti minutových měření, během kterých se měřilo 20 elevací jdoucích po sobě zdola nahoru. Od roku 2003 do jara 2009 se používá prokládaný způsob měření. Desetiminutové měření se skládá ze dvou pětiminutových měření, která lze použít i samostatně. V pětiminutových měřeních se měří spodní čtyři elevace vždy a vyšší elevace se měří v prvním a ve druhém pětiminutovém měření. Do desetiminutových dat jsou zahrnuty všechny elevace a nižší elevace, s ohledem na co největší aktuálnost pouze z druhého měření.

Měření na radaru Brdy jsou definována stejným způsobem, liší se pouze nadmořská výška antény, jinak se hodnoty elevačních úhlů shodují. Od roku 2007 probíhá měření elevací shora dolů, což zvyšuje aktuálnost dat z nízkých elevací, která jsou nejdůležitější pro odhad srážek. V síti CZRAD se využívají produkty VPRCorrectedCAPPI, Z-MAX, ETOP a VIL.

Síť CZRAD je optimalizovaná pro měření odrazivosti, proto data dopplerovských rychlostí nejsou pro zkoumání konvektivní oblačnosti dostatečně kvalitní. Mají maximální jednoznačně určitelnou rychlost a navíc při zpracování dat jsou často vyloučeny turbulentní oblasti, které se vyskytují obvykle v konvektivní oblačnosti.

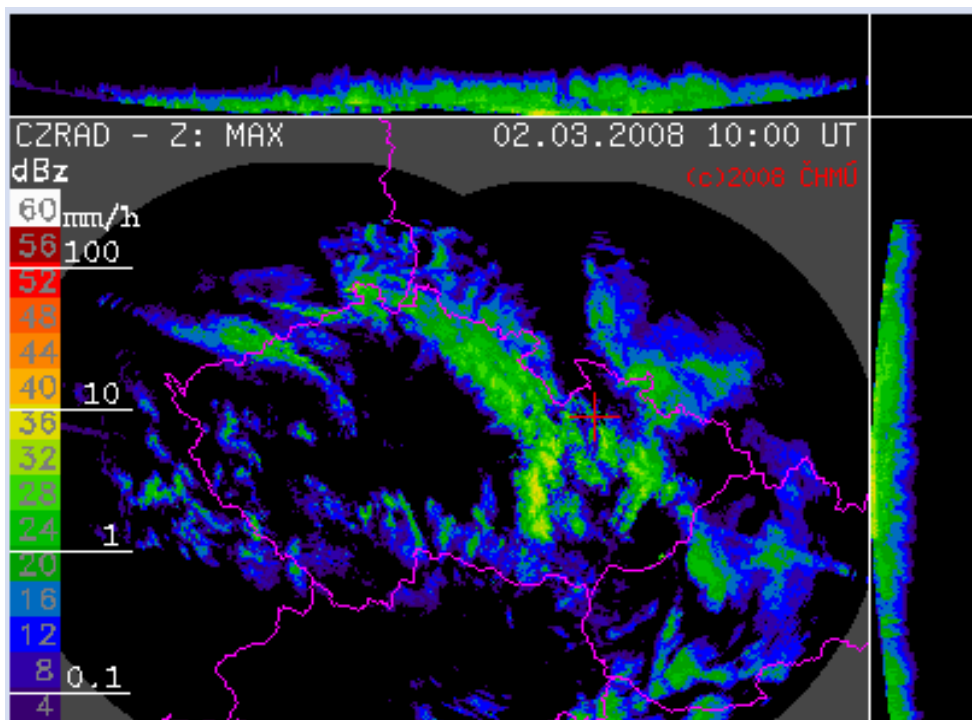


Obrázek 10-1 – Kruhy znázorňují maximální dosahy radarů a pro oba radary jsou vyznačeny maximální vzdálenosti vhodné pro určování intenzit srážek, tj. výška maximálně 1500 m nad terénem

10.1 Aktuální intenzita srážek a radarová odrazivost

V prostorovém rozložení radiolokační odrazivosti je zřetelná především struktura a charakter oblačného systému. U předpovědi počasí bývá většinou užíváno kvazitrojrozměrné zobrazení maximálních odrazivostí, které obsahují vertikální průmět maxim odrazivostí do horizontální roviny zároveň se dvěma bočními projekcemi. Boční průměty mají výškové rozlišení 1 km, značky na okraji ukazují hladiny končící vždy sudým kilometrem až do výšky 14 km. Zeleně jsou označeny hladiny končící kilometrem dělitelným čtyřmi a červeně pak hladina do 10 km. Barevná stupnice odrazivosti má 15 stupňů odrazivosti s krokem 4 dBZ, prahová hodnota 4 dBZ odpovídá intenzitě deště cca 0.06 mm/h. Pro přibližný přepočítání odrazivosti na intenzity srážek platí exponenciální závislost. (KRAČMÁR, 2002)

Na internetových stránkách ČHMÚ je každých 15 minut aktualizovaný stav radarové odrazivosti, přepočítané do intenzity srážek nad ČR, kde je stupnice s faktorem radarové odrazivosti Z a intenzitou srážek R , jak je na obrázku 10-2 vidět. Barevnou stupnicí je odlišen faktor radarové odrazivosti a tomu odpovídající intenzita srážek R . Můžeme tak podle intenzity srážek R zjistit, jaký mají dešťové kapky faktor radarové odrazivosti a naopak.



Obrázek 10-2 – Zobrazení intenzity srážek R a faktoru radarové odrazivosti Z nad ČR.

Poznámka: Tato služba funguje již i pro mobilní telefony, což může být v dnešní době velmi užitečné.

10.2 Radarová pásma

Volba frekvenčního pásma v radarové technice je velmi důležitým parametrem. V tabulce 10-1 lze vidět a porovnat, jaká pásma jsou vhodná k meteorologii.

Tabulka 10-1 – Používaná frekvenční pásma v radarové technice

Frekvence (GHz)	Vlnová délka (cm)	Pásma	Využití
1 – 2	15 – 30	L	Řízení letového provozu
2 – 4	7,5 – 1,5	S	Řízení leteckého a námořního provozu, mikrovlnná trouba, meteorologie v USA
4 – 8	3,75 – 7,5	C	Satelitní vysílání meteorologie v Evropě
8 – 12	2,5 – 3,75	X	Sledování a řízení raket, námořní radary, meteorologie, letecký provoz, radarové mapování
12 – 40	0,75 – 2,5	K	Radarové mapování, satelitní navigace, meteorologie, měření rychlosti, letecký provoz
40 – 300	0,1 – 0,75	mm	Trojrozměrné mapování

10.3 Srovnání radaru PDCR-35 s radary ČHMÚ

V České republice se v současné době pro meteorologické účely využívají dva radary. První radar se používá od roku 1995 a je vybudovaný u Protivanova na střední Moravě (Skalky). Druhý radar pracuje od roku 2000 u Prahy, byl zde vybudován a je tu i využíván (Brdy).

Meteorologický radar PDCR-35 bohužel ještě nestojí na Milešovce, z důvodů, které byly uvedeny v úvodu. Po dobu vypracování této práce se však usilovně pracuje na jeho brzkém dokončení. Realizaci meteorologického radaru má na starost pan Jaroslav Zatočil, který sídlí nedaleko Kutné Hory.

Tabulka 10-2 – Jednotlivé parametry

Parametr	Skalky	Brdy	Milešovka
Výrobce	Gematronik	EEC	Listar
Typ radaru	METEOR 360AC	DWSR-2501 C	PDSR-35
frekvenční pásmo	C	C	Ka
dopplerovský mód	ano	ano	ano
Parabolická anténa	4,20 m	4,27 m	0,90 m
úhel anténního svazku	0,80 ⁰	0,96 ⁰	0,68 ⁰
Zisk	44 dB	45 dB	45dBi
Polarizace	Lineární, horizontální	Lineární, horizontální	Lineární, vertikální
Vysílač	impulsní	impulsní	FMCW
vlnová délka	5,30 cm	5,30 cm	0,86 cm
Frekvence	5,645 GHz	5,630 GHz	35,4 GHz
výkon vysílače	250 kW	305 kW	4 W
délka impulsu	0,8 μs	0,8 μs	30 μs
opakovací kmitočet	584 Hz	584 Hz	-
modulační zdvih	-	-	2 – 10 MHz
Přijímač	lineární, digitální	lineární, digitální	lineární, digitální
detekovatelný signál	- 109 dBm	- 110 dBm	- 86 dBm
dynamický rozsah	100 dB	80 dB	60 dB
Mezifrekvence	60 MHz	30 MHz	8,85 GHz
detekovatelná odrazivost	9,7 dBZ	10,6 dBZ	- 15 dBZ
maximální vzdálenost	260 km	256 km	75 km
Nadmořská výška	730 m	860 m	840 m
výška antény nad mořem	767 m	916 m	862 m
v provozu	od 1995	od 1999	Od ???
interval měření	10 / 5 min.	10 / 5 min.	10 / 5 min.

Na třech následujících obrázcích vidíme radary ČHMU a místo pro PDCR-35 radar.



Obrázek 10-3 – Meteorologický radar Skalky



Obrázek 10-4 – Meteorologický radar Brdy



Obrázek 10-5 – Stanoviště pro meteorologický radar PDCR-35 (cca 20 m před budovou s okny)

11 Závěr

Z rozborů, meteorologického radaru ÚFA AVČR PDCR-35, které byly provedeny v této diplomové práci lze vyvodit několik závěrů. Prvním z nich je, že přijatý výkon P_r z radiolokační rovnice pro bodový cíl je závislý na efektivní odrazové ploše cíle σ , čtvrté mocnině vzdálenosti cíle r a radarové konstantě, která byla vyčíslena na hodnotu $K_r = 145,587 \text{ W.m}^2$. Kdežto přijatý výkon P_r z radiolokační rovnice v meteorologii je závislý na radarové odrazivosti cíle η , druhé mocnině vzdálenosti cíle r a meteorologickém potencionálu, který byl vyčíslen na hodnotu $C_r = 52,281 \cdot 10^{12} \text{ W.m}^3$.

Dalším závěrem je, že měrný útlum signálu kyslíkem γ_{O_2} a vodní parou γ_{H_2O} je pro frekvenci radaru $f = 35,4 \text{ GHz}$ zanedbatelný, protože je vůči jiným útlumům nejméně o řád menší. Útlum signálu v oblacích je závislý na hustotě kapalné vody v oblaku ρ_w , se zvětšující se hustotou roste i měrný útlum oblaky γ_c . Při útlumu signálu deštěm se rozlišuje vertikální a horizontální polarizace, protože nesférický tvar dešťové kapky způsobuje větší měrný útlum deštěm γ_r na horizontální polarizaci než na polarizaci vertikální. To, jak velký bude měrný útlum deštěm γ_r , závisí podstatně na intenzitě srážek R .

Abychom zjistili spektrum velikosti oblačných kapiček n_O nebo dešťových kapek n_D , musíme nejprve aproximovat parametry hydrometeorologických útvarů. Oblačné kapičky svým průměrem D odpovídají Rayleigho oblasti a dešťové kapky odpovídají Mie oblasti svým průměrem D . Faktor radarové odrazivosti oblačných kapiček Z odpovídá hodnotám od - 10 dBZ do - 30 dBZ a ekvivalentní faktor radarové odrazivosti dešťových kapek Z_e odpovídá hodnotám od 20 dBZ do 50 dBZ, z čehož vyplývá, že rozdíl v radarové odrazivosti mezi oblačným spektrem n_O a dešťovým spektrem n_D činí nejméně 30 dB.

Námi analyzovaný radar PDCR-35 je monostatický FMCW, který může poskytnout modulační zdvih F od 2 MHz do 10 MHz. Při zkoumání modulačních zdvihů F po kroku 1 MHz, byl vyhodnocen jako nejlepší pro tento radar modulační zdvih $F = 5 \text{ MHz}$, protože v tomto případě odpovídá délka pixelu $h = 30 \text{ m}$, která se blíží typické hodnotě meteorologických radarů, a dosah radaru $r_{max} = 30 \text{ km}$, pokud je cíl detekovatelný. Z výsledných hodnot vyplývá, že s rostoucím modulačním zdvihem F neklesá jen délka pixelu h a délka impulsu τ , ale i dosah radaru r_{max} .

Pixel neboli BIN čili Radar Volume je v radarové technice velmi důležitý parametr a tak byla normována délka pixelu $h = 1 \text{ m}$, aby bylo možné odvodit minimální parametry cíle, které je ještě meteorologický radar ještě schopen detekovat, tedy pokud jsou detekovatelné. Odvozeny byly veličiny, které se používají v meteorologické praxi, tedy minimální radarová odrazivost η , minimální efektivní odrazová plocha σ a minimální faktor radarové odrazivosti Z .

Literatura

BATTAN, L. J. 1973. *Radar observation of the atmosphere.* místo neznámé : Techbooks, 1973. ISBN: 1878907271.

FIŠER, O. 1986. *Interakce elektromagnetického pole s dešťovým prostředím se zřetelem na predikci útlumu deštěm družicových spojů v pásmech nad 10 GHz.* Praha : ČVUT-FEL, 1986.

FIŠER, O., ŘEZÁČOVÁ, D. 1997. *Diurnal and Seasonal Variations of Water Vapour and Cloud Vapour Attenuation in Microwave Frequency Bands.* 1997.

FIŠER, O., Schonhuber, M., PEŠICE P. 2002. *First results of DSD measurement by videodistrometer in the Czech Republic in 1998-1999.* místo neznámé : Studia Geophysica et Geodetica, 2002. 46-2002-485-505.

FROHBERG, J. 2010. *Signalgenerierung bei 8,85 GHz mittels direct digital synthesis für ein 35 GHz Wolkenradar.* Leipzig : Bachelorarbeit, 2010.

JOSS J., WALDVOGEL A. 1968. *The variation of raindrop size distributions at Locarno.* 1968.

JOSS, J., WALDVOGEL A. 1967. *Ein Spektrograph fuer Niederschlagstropfen mit automatischer Auswertung.* 1967.

KLUGMANN, D. 2008. *Technical description portable doppler cloud radar at 35 GHz.* místo neznámé : Listar GmbH, 2008.

KRAČMÁR, J. 2002. *Meteorologické radiolokátory.* místo neznámé : <http://www.chmi.cz/meteo/rad/index.html>, 2002.

MARSHALL, A., PALMER, E. 1948. *The distribution of raindrops with size.* místo neznámé : Journal Meteorology, 1948.

ŘEZÁČOVÁ, D. 1971. *Ein Beitrag zur Genauigkeit der Bestimmung der Regenintensität aus einem Tropfenspektrum.* 1971.

ŘEZÁČOVÁ, D., kolektiv. 2007. *Fyzika oblaku a srážek.* Praha : Academia, 2007. ISBN 978-80-20015-02-1.

Unit s.r.o. 2009. *Radiokomunikace 2009 (sborník přednášek).* Pardubice : autor neznámý, 2009.

WALDVOGEL, A. 1974. *The No jump of raindrop spectra.* místo neznámé : Atmosphere science, 1974.

<http://www.google.cz/img?hl=cs&tab=wi>

Příloha A – m.file (útlum oblačnými kapičkami)

```
clc;
clear all;
close all;

f=35.3; % GHz
T=15; % stupnu C
c=3e8; % m/s
lambda=c/f; % m

q=1;
E1=5.48;
E2=3.51;
Rt=300/(T+273.15);
E0=77.66+103.3*(Rt+1);
Fs=590-1500*(Rt-1); %GHz
Fp=20.09-142.4*(Rt-1)+249*(Rt-1)^2; %GHz

E=((E0-E1)*(f/Fp))/(1+(f/Fp)^2)+((E1-E2)*(f/Fs))/(1+(f/Fs)^2);

% The refractivity index "m" computation a'la Ray
T5=T-25.;
mlambda=100*lambda;
es=78.54*(1+T5*(-0.004579+T5*(.0000119-0.000000028*T5)));
en=5.27137+T*(0.0216474-T*(0.00131198));
ls=0.00033836*exp(2513.98/(T+273));
er=en+(es-en)/(1+(ls/mlambda)*(ls/mlambda));
ei=((es-en)*(ls/mlambda))/(1+(ls/mlambda)*(ls/mlambda));
eps=er+ei*j; % permitivita, vakua je 8,854.10-12 F/m
m=eps^0.5;
kacko=imag((eps-1)/(eps+2)); kko2=kacko^2; realna= real((eps-1)/(eps+2));
kacko2=(er-1)/(er+2); k2=kacko2^2;
% End "m"

for i=1:1:7
    Q=0.05:0.05:0.35; % g/m3

    N=1.5*realna*(Q/q); % ppm
    Y=0.182*f*N; % dB/km

    fprintf('q= %3.3f\t y=\t %3.3f\n',Q(i),Y(i));
end

figure;
semilogx(Q,Y);
xlabel(' - hustota vody [g/m3]');
ylabel(' - měrný útlum [dB/km]');
```

Příloha B – m.file (útlum dešťovými kapkami)

```
clc;
clear all;
close all;

f=35.3; % GHz
T=15; % stupnu C
c=3e8; % m/s
lambda=c/f; % m

Kh=0.3374;
Ah=0.9447;

fprintf ('Horizontalni\n');

for i=1:1:7
    Rh=[0.5;0.75;2;4;8;16;32];
    Yh(i)=Kh*Rh(i)^Ah;

    fprintf ('R= %3.3f\t y=\t %3.3f\n',Rh(i),Yh(i));
end

figure;
semilogx (Rh, Yh);
xlabel('R - intenzita srážek [mm/h]');
ylabel(' - měrný útlum [dB/km]');

Kv=0.3224;
Av=0.8761;

fprintf ('Vertikalni\n');

for i=1:1:7
    Rv=[0.5;0.75;2;4;8;16;32];
    Yv(i)=Kv*Rv(i)^Av;

    fprintf ('R= %3.3f\t y=\t %3.3f\n',Rv(i),Yv(i));
end

figure;
semilogx (Rv, Yv);
xlabel('R - intenzita srážek [mm/h]');
ylabel(' - měrný útlum [dB/km]');

figure;
semilogx (Rh, Yh, 'r');
hold on;
semilogx (Rv, Yv, 'b');
xlabel('R - intenzita srážek [mm/h]');
ylabel(' - měrný útlum [dB/km]');
```

Příloha C – m.file (aproximace parametrů)

```
clc;
clear all;
close all;

c=3e8; % rychlost svetla v m/s
f=35.3; % frekvence v GHz
la=30/f; % vlnová délka v cm

% Dest, D je 0,2 mm az 7 mm
fprintf ('D (mm):\t X ( ):\t DEST\n');
for D=0.2:0.2:7
    x=2*pi*(D/10)/la; % D je prumer, u radaru prednodt pred polomerem a

    fprintf('%5.3f\t %5.3f\n',D,x);
end

% Oblaka D je 2 um az 70 um
fprintf ('\nD (um):\t X ( ):\t OBLAKA\n');
for D=2:2:70
    x=2*pi*(D/1e4)/la; % D je prumer, u radaru prednodst pred polomerem a

    fprintf('%5.3f\t%5.3e\n',D,x);
end
```

Příloha D – m.file (spektrum oblačných kapiček)

```
clc;
clear all;
close all;

T=15; % stupne Celsia
c=3e8; % m/s
f=35.3e9; % Hz
lambda=c/f; % m
G=10^4.5;
theta=pi*0.68/180; % radian
Pr=0.001*10^(-8.6); % W

Ncelk=2E8; % 1/um*m3

% The refractivity index "m" computation a'la Ray
T5=T-25.; la=lambda*100; % lambda in cm
es=78.54*(1+T5*(-0.004579+T5*(.0000119-0.000000028*T5)));
en=5.27137+T*(0.0216474-T*(0.00131198));
ls=0.00033836*exp(2513.98/(T+273));
er=en+(es-en)/(1+(ls/la)*(ls/la));
ei=((es-en)*(ls/la))/(1+(ls/la)*(ls/la));
eps=er+ei*j; % permitivita, vakua je 8,854.10-12 F/m
m=eps^0.5;
kacko=imag((eps-1)/(eps+2)); kko2=kacko^2; realna= real((eps-
1)/(eps+2));
kacko2=(er-1)/(er+2); k2=kacko2^2;
% End "m"

Dstr=6; % um
B=3/(Dstr/2); % 1/um
A=0.5*Ncelk*B^3; % 1/m3*um3

p=[5;15;25;35];
Q=zeros(1,4);

for i=1:1:4
    Q(i)=(A*Dstr^6*p(i)/100)/2.9; % g/m3
    fprintf('%2.3f\t %6.3e\n',p(i)/100,Q(i));
end

sum=0;
N1=zeros(1,35);

for i=1:1:35
    D=2:2:70; % um
    N1(i)=A*(D(i)^2/4)*exp(-B*D(i)/2); % 1/um*m3
    fprintf('%5.1f\t %9.6e\n',D(i),N1(i));
    sum=sum+(D(i)^6)*N1(i); % um6/m3
end

suma=sum*2*1E-18; % mm6/m3

fprintf('\n D:%5.1f\t S:%9.6e\t
Z:%6.2f\n',Dstr,suma,10*log10(suma));
```

```

eta=(k2*pi^5*suma*1e-9)/(lambda^4); % m2/m3
r2=((lambda^2*G^2*4*theta^2*3E8*7E-9*eta)/(2^10*pi^2*log(2)*Pr)); %
m2
r=sqrt(r2) % m

fprintf
('.....\n');

figure;
semilogy(D,N1);
xlabel('D - Průměr oblačných kapiček [um]');
ylabel('n - Spektrum oblačných kapiček [1/mm*m3]');

Dstr=10; % um
B=3/(Dstr/2);
A=0.5*Ncelk*B^3;

p=[5;15;25;35];
Q=zeros(1,4);

for i=1:1:4
    Q(i)=(A*Dstr^6*p(i)/100)/2.9; % g/m3
    fprintf ('%2.3f\t %6.3e\n',p(i)/100,Q(i));
end

sum=0;
N2=zeros(1,35);

for i=1:1:35
    D=2:2:70; % um
    N2(i)=A*(D(i)^2/4)*exp(-B*D(i)/2); % 1/mm*m3
    fprintf ('%5.1f\t %9.6e\n',D(i),N2(i));
    sum=sum+(D(i)^6)*N2(i); % mm6/m3
end

suma=sum*2*1E-18; % mm6/m3

fprintf ('\n D:%5.1f\t S:%9.6e\t
Z:%6.2f\n',Dstr,suma,10*log10(suma));

eta=(k2*pi^5*suma*1e-9)/(lambda^4); % m2/m3
r2=((lambda^2*G^2*4*theta^2*3E8*7E-9*eta)/(2^10*pi^2*log(2)*Pr)); %
m2
r=sqrt(r2) % m

fprintf
('.....\n');

figure;
semilogy(D,N2);
xlabel('D - Průměr oblačných kapiček [um]');
ylabel('n - Spektrum oblačných kapiček [1/mm*m3]');

```



```

Dstr=14; % um
B=3/(Dstr/2);
A=0.5*Ncelk*B^3;

p=[5;15;25;35];
Q=zeros(1,4);

for i=1:1:4
    Q(i)=(A*Dstr^6*p(i)/100)/2.9; % g/m3
    fprintf ('%2.3f\t %6.3e\n',p(i)/100,Q(i));
end

sum=0;
N3=zeros(1,35);

for i=1:1:35
    D=2:2:70; % um
    N3(i)=A*(D(i)^2/4)*exp(-B*D(i)/2); % 1/mm*m3
    fprintf ('%5.1f\t %9.6e\n',D(i),N3(i));
    sum=sum+(D(i)^6)*N3(i); % mm6/m3
end

suma=sum*2*1E-18; % mm6/m3

fprintf ('\n D:%5.1f\t S:%9.6e\t
Z:%6.2f\n',Dstr,suma,10*log10(suma));

eta=(k2*pi^5*suma*1e-9)/(lambda^4); % m2/m3
r2=((lambda^2*G^2*4*theta^2*3E8*7E-9*eta)/(2^10*pi^2*log(2)*Pr)); %
m2
r=sqrt(r2) % m

fprintf
('.....\n');

figure;
semilogy(D,N3);
xlabel('D - Průměr oblačných kapiček [um]');
ylabel('n - Spektrum oblačných kapiček [1/mm*m3]');

figure;
semilogy(D,N1,'r');
hold on;
plot(D,N2,'g');
plot(D,N3,'b');
xlabel('D - Průměr oblačných kapiček [um]');
ylabel('n - Spektrum oblačných kapiček [1/mm*m3]');

```

Příloha E – m.file (spektrum dešťových kapek)

```
clc;
clear all;
close all;

T=15; % teplota v st. Celsia

f=35.3e9; % Frequency in Hz
c=3e8; % speed of light
lambda=c/f; % lambda in m

G=10^4.5; % gain
theta=pi*0.68/180; % angle
Pr=0.001*10^(-8.6); %min. prij. vykon ve W

% The refractivity index "m" computation a'la Ray
T5=T-25.; mlambda=100*lambda;
es=78.54*(1+T5*(-0.004579+T5*(.0000119-0.000000028*T5)));
en=5.27137+T*(0.0216474-T*(0.00131198));
ls=0.00033836*exp(2513.98/(T+273));
er=en+(es-en)/(1+(ls/mlambda)*(ls/mlambda));
ei=((es-en)*(ls/mlambda))/(1+(ls/mlambda)*(ls/mlambda));
eps=er+ei*j; % permitivita, vakua je 8,854.10-12 F/m
m=eps^0.5;
kacko=imag((eps-1)/(eps+2)); kko2=kacko^2; realna= real((eps-1)/(eps+2));
kacko2=(er-1)/(er+2); k2=kacko2^2;
% End "m"

N0=8000; % 1/m3*mm

I=0.5; % mm/h
A=4.1*I^(-0.21); % 1/mm
Dstr=1/A; % mm
Ncel=N0/A; % 1/m3*mm
N1=zeros(1,35);
sum=0;

for i=1:1:35
    D=2:2:70; % mm
    fb=[5.31e-008;4.00e-005;1.02e-003;9.06e-003;4.81e-002;1.92e-001;6.42e-001;1.84e+000;4.44e+000;9.11e+000;1.61e+001;2.48e+001;3.44e+001;4.34e+001;5.06e+001;5.49e+001;5.58e+001;5.30e+001;4.66e+001;3.75e+001;2.70e+001;1.70e+001;9.63e+000;7.10e+000;1.09e+001;2.14e+001;3.79e+001;5.86e+001;8.09e+001;1.02e+002;1.19e+002;1.29e+002;1.32e+002;1.26e+002;1.13e+002];
    N1(i)=N0*exp(-A*(D(i)/10)); % 1/mm*m3

    sum=sum+(fb(i)*N1(i)); % mm6/m3

    fprintf('%3.3f\t %3.3e\n',D(i)/10,N1(i));
end

suma=sum*0.2; % mm6/m3
ze=(suma*(lambda*1e3)^4)/(pi^5*k2);
```

```

    fprintf ('\n I:%6.3f\t S:%6.3f\t Ze:%6.3f\t Z:%6.3f\t Dstr:%3.6f\t
Ncel:%6.3f\n', I, suma, ze, 10*log10(ze), Dstr, Ncel);
    fprintf
('.....\n');

figure;
semilogy(D, N1);
xlabel('D - Průměr kapky [mm]');
ylabel('N - Spektrum dešťových kapek [1/mm*m3]');

    I=2; % mm/h
    A=4.1*I^(-0.21); % 1/mm
    Dstr=1/A; % mm
    Ncel=N0/A; % 1/m3*mm
    N2=zeros(1, 35);
    sum=0;

    for i=1:1:35
        D=2:2:70; % mm
        fb=[5.31e-008;4.00e-005;1.02e-003;9.06e-003;4.81e-002;1.92e-
001;6.42e-
001;1.84e+000;4.44e+000;9.11e+000;1.61e+001;2.48e+001;3.44e+001;4.34e+001
;5.06e+001;5.49e+001;5.58e+001;5.30e+001;4.66e+001;3.75e+001;2.70e+001;1.
70e+001;9.63e+000;7.10e+000;1.09e+001;2.14e+001;3.79e+001;5.86e+001;8.09e
+001;1.02e+002;1.19e+002;1.29e+002;1.32e+002;1.26e+002;1.13e+002];
        N2(i)=N0*exp(-A*(D(i)/10)); % 1/mm*m3

        sum=sum+(fb(i)*N1(i)); % mm6/m3

        fprintf ('%3.3f\t %3.3e\n', D(i)/10, N1(i));
    end

    suma=sum*0.2; % mm6/m3
    ze=(suma*(lambda*1e3)^4)/(pi^5*k2);

    fprintf ('\n I:%6.3f\t S:%6.3f\t Ze:%6.3f\t Z:%6.3f\t Dstr:%3.6f\t
Ncel:%6.3f\n', I, suma, ze, 10*log10(ze), Dstr, Ncel);
    fprintf
('.....\n');

figure;
semilogy(D, N2);
xlabel('D - Průměr kapky [mm]');
ylabel('N - Spektrum dešťových kapek [1/mm*m3]');

    I=8; % mm/h
    A=4.1*I^(-0.21); % 1/mm
    Dstr=1/A; % mm
    Ncel=N0/A; % 1/m3*mm
    N3=zeros(1, 35);
    sum=0;

    for i=1:1:35
        D=2:2:70; % mm
        fb=[5.31e-008;4.00e-005;1.02e-003;9.06e-003;4.81e-002;1.92e-
001;6.42e-
001;1.84e+000;4.44e+000;9.11e+000;1.61e+001;2.48e+001;3.44e+001;4.34e+001

```

```

;5.06e+001;5.49e+001;5.58e+001;5.30e+001;4.66e+001;3.75e+001;2.70e+001;1.
70e+001;9.63e+000;7.10e+000;1.09e+001;2.14e+001;3.79e+001;5.86e+001;8.09e
+001;1.02e+002;1.19e+002;1.29e+002;1.32e+002;1.26e+002;1.13e+002];
    N3(i)=N0*exp(-A*(D(i)/10)); % 1/mm*m3

    sum=sum+(fb(i)*N1(i)); % mm6/m3

    fprintf('%3.3f\t %3.3e\n',D(i)/10,N1(i));
end

suma=sum*0.2; % mm6/m3
ze=(suma*(lambda*1e3)^4)/(pi^5*k2);

fprintf('\n I:%6.3f\t S:%6.3f\t Ze:%6.3f\t Z:%6.3f\t Dstr:%3.6f\t
Ncel:%6.3f\n',I,suma,ze,10*log10(ze),Dstr,Ncel);
fprintf
('.....\n');

figure;
semilogy(D,N3);
xlabel('D - Průměr kapky [mm]');
ylabel('N - Spektrum dešťových kapek [1/mm*m3]');

I=32; % mm/h
A=4.1*I^(-0.21); % 1/mm
Dstr=1/A; % mm
Ncel=N0/A; % 1/m3*mm
N4=zeros(1,35);
sum=0;

for i=1:1:35
    D=2:2:70; % mm
    fb=[5.31e-008;4.00e-005;1.02e-003;9.06e-003;4.81e-002;1.92e-
001;6.42e-
001;1.84e+000;4.44e+000;9.11e+000;1.61e+001;2.48e+001;3.44e+001;4.34e+001
;5.06e+001;5.49e+001;5.58e+001;5.30e+001;4.66e+001;3.75e+001;2.70e+001;1.
70e+001;9.63e+000;7.10e+000;1.09e+001;2.14e+001;3.79e+001;5.86e+001;8.09e
+001;1.02e+002;1.19e+002;1.29e+002;1.32e+002;1.26e+002;1.13e+002];
    N4(i)=N0*exp(-A*(D(i)/10)); % 1/mm*m3

    sum=sum+(fb(i)*N1(i)); % mm6/m3

    fprintf('%3.3f\t %3.3e\n',D(i)/10,N1(i));
end

suma=sum*0.2; % mm6/m3
ze=(suma*(lambda*1e3)^4)/(pi^5*k2);

fprintf('\n I:%6.3f\t S:%6.3f\t Ze:%6.3f\t Z:%6.3f\t Dstr:%3.6f\t
Ncel:%6.3f\n',I,suma,ze,10*log10(ze),Dstr,Ncel);
fprintf
('.....\n');

figure;
semilogy(D,N4);
xlabel('D - Průměr kapky [mm]');
ylabel('N - Spektrum dešťových kapek [1/mm*m3]');

```

```

I=128; % mm/h
A=4.1*I^(-0.21); % 1/mm
Dstr=1/A; % mm
Ncel=N0/A; % 1/m3*mm
N5=zeros(1,35);
sum=0;

for i=1:1:35
    D=2:2:70; % mm
    fb=[5.31e-008;4.00e-005;1.02e-003;9.06e-003;4.81e-002;1.92e-
001;6.42e-
001;1.84e+000;4.44e+000;9.11e+000;1.61e+001;2.48e+001;3.44e+001;4.34e+001
;5.06e+001;5.49e+001;5.58e+001;5.30e+001;4.66e+001;3.75e+001;2.70e+001;1.
70e+001;9.63e+000;7.10e+000;1.09e+001;2.14e+001;3.79e+001;5.86e+001;8.09e
+001;1.02e+002;1.19e+002;1.29e+002;1.32e+002;1.26e+002;1.13e+002];
    N5(i)=N0*exp(-A*(D(i)/10)); % 1/mm*m3

    sum=sum+(fb(i)*N1(i)); % mm6/m3

    fprintf('%3.3f\t %3.3e\n',D(i)/10,N1(i));
end

suma=sum*0.2; % mm6/m3
ze=(suma*(lambda*1e3)^4)/(pi^5*k2);

fprintf('\n I:%6.3f\t S:%6.3f\t Ze:%6.3f\t Z:%6.3f\t Dstr:%3.6f\t
Ncel:%6.3f\n',I,suma,ze,10*log10(ze),Dstr,Ncel);
fprintf
('.....\n');

figure;
semilogy(D,N5);
xlabel('D - Průměr kapky [mm]');
ylabel('N - Spektrum dešťových kapek [1/mm*m3]');

figure;
semilogy(D,N1,'k');
hold on;
plot(D,N2,'r');
plot(D,N3,'g');
plot(D,N4,'b');
plot(D,N5,'c');
xlabel('D - Průměr kapky [mm]');
ylabel('N - Spektrum oblačných kapek [1/mm*m3]');

```

Příloha F – m.file (monostatický FMCW)

```
clc;
clear all;
close all;

c=3e8; % m/s
F=1:1:10; % MHz

h=zeros(1,10);
T=zeros(1,10);
k=zeros(1,10);

fprintf ('F=\t\t h=\t\t T=\t\t k=\n');

for i=1:1:10
    h(i)=c/(2*F(i)*1e6); % m
    T(i)=(2*h(i))/c; % s
    k(i)=30e-6/(2*T(i)); %

    fprintf ('%3.3f\t %3.3f\t %3.3e\t %3.3f\n',F(i),h(i),T(i),k(i));
end

figure;
plot(F,h);
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('h - Délka pixelu [m]');

figure;
plot(F,T);
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('? - Délka impulsu [s]');

figure;
plot(F,k);
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('k - Počet [ ]');
```

Příloha G – m.file (dosah radaru PDCR-35)

```
clc;
clear all;
close all;

h1=150; % m
F1=1e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T1=(2*h1)/c; % s

fprintf ('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h1,F1,T1);

f1=0.0001:0.0001:0.001;
r1=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r1(i)=(f1(i)*1e9*T1*c)/(2*F1); % km

    fprintf ('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f1(i),r1(i));
end

figure;
plot(f1*1e3,r1)
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

h2=75; % m
F2=2e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T2=(2*h2)/c; % s

fprintf ('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h2,F2,T2);

f2=0.0002:0.0002:0.002;
r2=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r2(i)=(f2(i)*1e9*T2*c)/(2*F2); % km

    fprintf ('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f2(i),r2(i));
end

figure;
plot(f2*1e3,r2)
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

h3=50; % m
F3=3e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T3=(2*h3)/c; % s
```

```

fprintf ('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h3,F3,T3);

f3=0.0003:0.0003:0.003;
r3=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r3(i)=(f3(i)*1e9*T3*c)/(2*F3); % km

    fprintf ('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f3(i),r3(i));
end

figure;
plot(f3*1e3,r3)
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

h4=37.5; % m
F4=4e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T4=(2*h4)/c; % s

fprintf ('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h4,F4,T4);

f4=0.0004:0.0004:0.004;
r4=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r4(i)=(f4(i)*1e9*T4*c)/(2*F4); % km

    fprintf ('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f4(i),r4(i));
end

figure;
plot(f4*1e3,r4)
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

h5=30; % m
F5=5e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T5=(2*h5)/c; % s

fprintf ('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h5,F5,T5);

f5=0.0005:0.0005:0.005;
r5=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r5(i)=(f5(i)*1e9*T5*c)/(2*F5); % km

    fprintf ('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f5(i),r5(i));
end

figure;

```



```

plot(f5*1e3,r5)
xlabel('F - Rozdíl přijatého a vyslaného modulačního zdvihu [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

h6=25; % m
F6=6e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T6=(2*h6)/c; % s

fprintf ('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h6,F6,T6);

f6=0.0006:0.0006:0.006;
r6=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r6(i)=(f6(i)*1e9*T6*c)/(2*F6); % km

    fprintf ('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f6(i),r6(i));
end

figure;
plot(f6*1e3,r6)
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

h7=21.429; % m
F7=7e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T7=(2*h7)/c; % s

fprintf ('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h7,F7,T7);

f7=0.0007:0.0007:0.007;
r7=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r7(i)=(f7(i)*1e9*T7*c)/(2*F7); % km

    fprintf ('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f7(i),r7(i));
end

figure;
plot(f7*1e3,r7)
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

h8=18.75; % m
F8=8e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T8=(2*h8)/c; % s

fprintf ('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h8,F8,T8);

```

```

f8=0.0008:0.0008:0.008;
r8=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r8(i)=(f8(i)*1e9*T8*c)/(2*F8); % km

    fprintf('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f8(i),r8(i));
end

figure;
plot(f8*1e3,r8)
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

h9=16.667; % m
F9=9e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T9=(2*h9)/c; % s

fprintf('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h9,F9,T9);

f9=0.0009:0.0009:0.009;
r9=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r9(i)=(f9(i)*1e9*T9*c)/(2*F9); % km

    fprintf('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f9(i),r9(i));
end

figure;
plot(f9*1e3,r9)
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

h10=15; % m
F10=10e6; % Hz

c=3e8; % m/s
T10=(2*h10)/c; % s

fprintf('\nh= %3.3f\t F=\t %3.3f\t T= %3.3e\n',h10,F10,T10);

f10=0.001:0.001:0.01;
r10=zeros(1,10);

for i=1:1:10
    r10(i)=(f10(i)*1e9*T10*c)/(2*F10); % km

    fprintf('f= %3.3f\t r=\t %3.3f\n',f10(i),r10(i));
end

figure;

```

```

plot(f10*1e3,r10)
xlabel('F - Modulační zdvih [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

figure;
plot(f10*1e3,r10,'k*');
hold on;
plot(f1*1e3,r1,'y*');
plot(f2*1e3,r2,'k');
plot(f3*1e3,r3,'b');
plot(f4*1e3,r4,'m');
plot(f5*1e3,r6,'r*');
plot(f6*1e3,r6,'g');
plot(f7*1e3,r7,'c');
plot(f8*1e3,r8,'r');
plot(f9*1e3,r9,'b');
xlabel('F - Rozdíl přijatého a vyslaného modulačního zdvihu [MHz]');
ylabel('r - Vzdálenost cíle [km]');

```

Příloha H – m.file (minimální detekce)

```
clc;
clear all;
close all;

vzdalenost=1000:1000:10000; %[m]
strana=1; %[m]

A=zeros(1,10);
S=zeros(1,10);
V=zeros(1,10);
eta=zeros(1,10);
I=zeros(1,10);
Ze=zeros(1,10);
Z=zeros(1,10);

T=15; %[Celsia]
svazek=pi*0.68/180; %[radianu]
svazekpul=pi*0.34/180; %[radianu]
svetlo=3e8; %[m/s]
frekvence=35.3e9; %[Hz]
lambda=svetlo/frekvence; %[m]
zisk=10^4.5; %[ ]
Pvyslany=4; %[W]
Pprijaty=0.001*10^(-9.6); %[W]

T5=T-25.;
es=78.54*(1+T5*(-0.004579+T5*(.0000119-0.000000028*T5)));
en=5.27137+T*(0.0216474-T*(0.00131198));
ls=0.00033836*exp(2513.98/(T+273));
er=en+(es-en)/(1+(ls/lambda)*(ls/lambda));
ei=((es-en)*(ls/lambda))/(1+(ls/lambda)*(ls/lambda));
eps=er+ei*j; % permitivita, vakua je 8,854.10-12 F/m
m=eps^0.5;

kacko=imag((eps-1)/(eps+2)); realna= real((eps-1)/(eps+2));
kacko2=(er-1)/(er+2); k2=kacko2^2;

for i=1:1:10 %[m]
    A(i)=vzdalenost(i)*tan(svazekpul); %[m]
    S(i)=(pi*svazek^2*vzdalenost(i)^2)/4; %[m2]
    V(i)=pi*A(i)^2*strana; %[m3]

eta(i)=(Pprijaty*2^9*pi^2*log(2)*(1e6*vzdalenost(i)^2))/(lambda^2*zisk^2*
Pvyslany*svazek^2*strana); %[mm2/m3]
    I(i)=eta(i)*V(i); %[mm2]
    Ze(i)=(1000*lambda^4*eta(i))/(pi^5*kacko2); %[mm6/m3]
    Z(i)=10*log10(Ze(i)); %[dBZ]
end

figure;
plot(vzdalenost,A*2);
xlabel('r - Vzdálenost cíle [m]');
ylabel('a - Výška pixelu [m]');

figure;
```

```

plot(vzdalenost,S);
xlabel('r - Vzdálenost cíle [m]');
ylabel('S - Plocha podstavy válce pixelu [m2]');

figure;
plot(vzdalenost,V);
xlabel('r - Vzdálenost cíle [m]');
ylabel('V - Pixel (BIN) [m3]');

figure;
plot(vzdalenost,eta);
xlabel('r - Vzdálenost cíle [m]');
ylabel('? - Radarová odrazivost [mm2/m3]');

figure;
plot(vzdalenost,I);
xlabel('r - Vzdálenost cíle [m]');
ylabel('? - Součet efektivních odrazových ploch [mm2]');

figure;
plot(vzdalenost,Ze);
xlabel('r - Vzdálenost cíle [m]');
ylabel('Ze - Ekvivalentní faktor radarové odrazivosti [mm6/m3]');

figure;
plot(vzdalenost,Z);
xlabel('r - Vzdálenost cíle [m]');
ylabel('Ze - Ekvivalentní faktor radarové odrazivosti [dBZ]');

fprintf ('r-dosah\t a-vyska:\t S-plocha:\t V-objem:\t ?-odraz.:\t ?-
ploch:\t Ze-faktor:\t Ze-Faktor:\n');

for dosah=1000:1000:10000 % [m]
    A=dosah*tan(svazek/2); % [m]
    S=(pi*svazek^2*dosah^2)/4; % [m2]
    V=pi*A^2*strana; % [m3]

eta=(Pprijaty*2^9*pi^2*log(2)*(1e6*dosah^2))/(lambda^2*zisk^2*Pvyslany*sv
azek^2*strana); % [mm2/m3]
I=eta*V; % [mm2]
Ze=(1000*lambda^4*eta)/(pi^5*kacko2); % [mm6/m3]
Z=10*log10(Ze); % [dBZ]

    fprintf ('%6.1f\t %7.3f\t %6.3f\t %5.3f\t %7.3f\t %5.3e\t %5.3e\t
%5.3f\n',dosah,A^2,S,V,eta,I,Ze,Z);
end

Kr=(lambda*lambda*zisk*zisk^4)/((4*pi)^3)

Cr=(lambda*lambda*zisk*zisk^4*svazek*svazek*3e8*30e6)/((pi^2)*log(2)*(2^1
0))

```