

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Průzkum atmosféry a výzkum šíření satelitního signálu pomocí radiometrů
Bc. Karel Pitaš

Diplomová práce
2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Karel Pitaš**
Osobní číslo: **I15170**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Průzkum atmosféry a výzkum šíření satelitního signálu pomocí radiometrů**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Prostudujte odbornou literaturu popisující princip a metody měření atmosféry s pomocí alespoň dvou radiometrů pracujících v různých kmitočtových pásmech. Radiometry, které má k dispozici FEI UPCE a ÚFA AV ČR uveďte do provozu a analyzujte data za účelem výzkumu stavu atmosféry z hlediska šíření mikrovln na dráze družice-Země. Zjistěte, které atmosférické parametry lze určovat radiometricky a měřením ověřte. Odvoďte metody měření atmosférického útlumu s pomocí radiometrů a výsledky porovnejte s měřením útlumu prováděným s pomocí družice Alphasat v pásmech 19 GHz a 39 GHz .

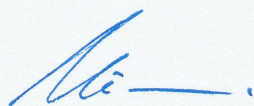
Rozsah grafických prací: 8-20 stran
Rozsah pracovní zprávy: 40 -50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

Pranab Kumar Karmakar. Ground-Based Microwave Radiometry and Remote Sensing: Methods and Applications. CRC Press, 2014
Recommendation ITU-R P.311-14. Acquisition, presentation and analysis of data in studies of radiowave propagation. 2013
M. Yamada, Y. Karasawa, M. Yasuna, B. Arbesser-Rastburg. An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz, Radio Science, Volume 22, Number 6, pp. 1053-1062, November 1987
A. Paraboni, TDP#5/Alphasat The Ka-Q Band Propagation Experiment, NoE in Electromagnetic Waves Propagation, Workshop by ESA/ESTEC, 2008 Další literaturu dodá vedoucí práce.

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

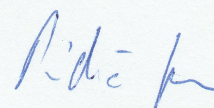
Datum zadání diplomové práce: 31. října 2016
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2017



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Jan Pidanič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2016

Prohlašuji:

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

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

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

V Pardubicích dne 17. 4. 2018

Karel Pitaš

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych zde chtěl poděkovat několika lidem za jejich cenné rady a zkušenosti, které pro mě byly při tvorbě obou částí diplomové práce velkým přínosem. Mé poděkování patří zejména mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ondřejovi Fišerovi, CSc.

Další lidé, kteří mi velmi pomohli s realizací diplomové práce jsou Ing. Jiří Polívka, CSc. a Milan Otisk. Také bych zde chtěl poděkovat firmám Telemeter Electronics a Lineq s.r.o. za bezplatné poskytnutí absorbérů a tekutého dusíku.

ANOTACE

Tato diplomová práce je zaměřena na využití radiometrů pro sledování stavu atmosféry a pro korekci útlumu počítaného z přijatých dat z družice Alphasat. Pojednává zejména o návrhu, kalibraci, funkčnosti soustavy a korekci dat ze dvou radiometrů umístěných na družicovém spoji. Soustava je tvořena radiometrem v pásmu 11 GHz a radiometrem v pásmu 39 GHz. V diplomové práci byl navržen systém, který umožňuje měření útlumu atmosféry, obsahu vodních par a kapalné vody.

KLÍČOVÁ SLOVA

radiometr, šumová teplota, šumový výkon, integrovaný obsah vodních par ve sloupci, integrovaný obsah kapalné vody ve sloupci, útlum, Alphasat, kalibrace radiometru

TITLE

Atmospheric exploration and research of satellite signal propagation using radiometers

ANNOTATION

This thesis is focused on the use of radiometers for atmospheric monitoring and correction of attenuation. The attenuation is calculated from received data from Alphasat satellite. The thesis mainly deals with system design, calibration, system functionality and data correction from two radiometers (11 GHz radiometer and 39 GHz radiometer) focused on the satellite link (path). This thesis proposes a system which combines the two radiometers and is mostly designed for the measurements of atmospheric attenuation, water vapor and liquid water content.

KEYWORDS

radiometer, noise temperature, noise power, integrated water vapor content, integrated liquid water content, attenuation, Alphasat, calibration of radiometers

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam zkratk	12
Úvod	13
1 Motivace.....	14
1.1 Stav řešené problematiky	15
1.2 Projekt Alphasat.....	16
2 Radiometrie	18
2.1 Spektrální jas.....	18
2.2 Radiometrické stanovení útlumu	20
2.3 Absorpce atmosférou	21
2.4 Stanovení obsahu vody v atmosféře	25
2.4.1 Radiometrické stanovení obsahu vody v atmosféře	25
3 Radiometry	27
3.1 Radiometr typu „Total power“	28
3.2 Radiometr typu „Dicke“	30
3.3 Radiometr typu „Noise-Injection“	31
3.4 Další typy radiometrů	32
3.4.1 Radiometr s balancováním zisku	33
3.4.2 Radiometr typu „Graham“	33
3.4.3 Korelační radiometr	33
3.4.4 Radiometr typu „Dual-polarization“	33
4 Kalibrace radiometrů	34
4.1 Kalibrace za pomoci kalibračních těles	36
5 Měření radiometru v pásmu 11 GHz	38
5.1 Parametry radiometru 11 GHz.....	38
5.2 Testování radiometru 11 GHz.....	40

5.2.1	Testování použitelnosti	40
5.2.2	Testování s datalogerem	40
5.2.3	Testování a problémy ve finálním umístění	42
5.3	Finální umístění radiometru 11 GHz	46
5.4	Kalibrace radiometru 11 GHz.....	49
5.5	Funkce radiometru 11 GHz.....	52
5.5.1	Odstranění problémů měření	54
5.5.2	Šumová teplota měřená radiometrem 11 GHz.....	57
6	Měření radiometrem v pásmu 39 GHz	58
6.1	Parametry radiometru 39 GHz.....	58
6.2	Testování radiometru 39 GHz.....	59
6.2.1	Testování v zapojení s přijímačem Alphasat 39 GHz.....	60
6.3	Finální umístění radiometru 39 GHz	62
6.4	Kalibrace radiometru 39 GHz.....	64
6.5	Funkce radiometru 39 GHz.....	66
6.5.1	Šumová teplota měřená radiometrem 39 GHz.....	68
7	Měření radiometrem v pásmu 18 GHz	70
7.1	Parametry radiometru 18 GHz.....	71
7.2	Testování radiometru 18 GHz.....	71
7.3	Finální umístění radiometru 18 GHz	71
8	Použití kombinace Radiometrů	72
8.1	Použití ke korekci záznamů signálu z družic.....	72
8.2	Průzkum atmosféry	77
8.2.1	Určení množství kapalné vody	78
8.2.2	Určení množství vodních par	80
9	Porovnání získaných dat	82
	Závěr	87
	Použitá literatura	90

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Umístění přijímačů družice Alphasat v areálu ÚFA	16
Obrázek 2: Útlum vodních par, suchého vzduchu a celkový útlum [1].....	22
Obrázek 3: Porovnání útlumů pro různé frekvence a různě silné srážky [1]	22
Obrázek 4: Blokové schéma radiometru typu „Total power“ [11]	30
Obrázek 5: Blokové schéma radiometru typu „Dicke“ [11]	31
Obrázek 6: Blokové schéma radiometru typu „Noise-Injection“ [11].....	32
Obrázek 7: EPS kelímek naplněný absorbérem a použitý absorbér EPP 12.....	37
Obrázek 8: Sestrojené kalibrační těleso	37
Obrázek 9: Radiometr 11GHz.....	38
Obrázek 10: Vnitřní schéma radiometru 11 GHz [26].....	39
Obrázek 11: Radiometr 11 GHz s datalogerem	41
Obrázek 12: Záznam z měření radiometrem 11 GHz ve dnech 11.7.-12.7.2017.....	43
Obrázek 13: Detail „špiček" na radiometrickém měření 11 GHz.....	44
Obrázek 14: Detail „schodů" na radiometrickém měření 11 GHz.....	44
Obrázek 15: Detail „kupy" na radiometrickém měření 11 GHz	45
Obrázek 16: Detail „skoků" na radiometrickém měření 11 GHz.....	46
Obrázek 17: Umístění zářiče radiometru 11 GHz pod zářič Alphasatu 19 GHz	47
Obrázek 18: Umístění zářiče radiometru 11 GHz pod zářič Alphasatu 19 GHz	47
Obrázek 19: Umístění radiometru 11GHz v boxu přijímače Alphasatu 19 GHz	48
Obrázek 20: Útlum z přijímače Alphasat 19 GHz v den kalibrace radiometru 11 GHz.....	49
Obrázek 21: Radiometrické měření 11 GHz a útlum z Alphasat 19 GHz při kalibraci.....	50
Obrázek 22: Kalibrační křivka pro radiometr 11 GHz	51
Obrázek 23: Radiometrická data 11 GHz ve dnech 11.7.-12.7.2017.....	52
Obrázek 24: Radiometrická data z radiometru 11 GHz za měsíc červenec 2017.....	52
Obrázek 25: Radiometrická data z radiometru 11 GHz za rok 2017	53
Obrázek 26: Radiometrická data 11 GHz	54
Obrázek 27: Radiometrická data 11 GHz po odstranění špiček	55
Obrázek 28: Radiometrická data 11 GHz po odstranění kup.....	56
Obrázek 29: Radiometrická data 11 GHz za měsíc červenec roku 2017 po úpravách	56
Obrázek 30: Radiometrická data 11 GHz za období 1.6.2017-28.2.2018 po úpravách.....	57
Obrázek 31: Radiometr 39 GHz [19].....	58
Obrázek 32: Vnitřní schéma zapojení radiometru 39 GHz bez zdroje napájení [9], [19] ...	59

Obrázek 33: Testovací umístění radiometru do zařízení Alphasat 39 GHz.....	61
Obrázek 34: Schéma připojení radiometru k zařízení Alphasat 39 GHz [19]	62
Obrázek 35: Rozbočovač signálu v zařízení Alphasat 39 GHz	63
Obrázek 36: Úzkopásmová zádrž radiometru 39 GHz	63
Obrázek 37: Útlum z přijímače Alphasat 39 GHz v den kalibrace radiometru 39 GHz.....	64
Obrázek 38: Radiometrické měření 39 GHz a útlum z Alphasat 39 GHz při kalibraci.....	65
Obrázek 39: Kalibrační křivka pro radiometr 39 GHz	66
Obrázek 40: Radiometrická data 39 GHz ve dnech 11.7.-12.7.2017.....	66
Obrázek 41: Radiometrická data 39 GHz za měsíc červenec roku 2017	67
Obrázek 42: Radiometrická data 39 GHz za rok 2017	67
Obrázek 43: Šumová teplota ve dnech 11.7.-12.7.2017 měřená radiometrem 39 GHz.....	68
Obrázek 44: Šumová teplota za rok 2017 měřená radiometrem 39 GHz	69
Obrázek 45: Úsek šumové teploty vybraný pro další zpracování.....	69
Obrázek 46: Radiometr 18 GHz.....	70
Obrázek 47: Ovládací panel a zářič radiometru 18 GHz	70
Obrázek 48: Porovnání útlumu z radiometru a z přijímače Alphasatu v pásmu 39 GHz	73
Obrázek 49: Porovnání útlumu z radiometru a z přijímače Alphasatu v pásmu 39 GHz	74
Obrázek 50: Rozdíl útlumů z radiometru a z přijímače Alphasatu v pásmu 39 GHz.....	74
Obrázek 51: Rozdíl útlumů v porovnání s korekční křivkou.....	75
Obrázek 52: Porovnání útlumu z přijímače Alphasatu 39 GHz před a po korekci.....	76
Obrázek 53: Porovnání útlumu z přijímače Alphasatu 39 GHz před a po korekci.....	76
Obrázek 54: Porovnání měření radiometru 11 GHz a přijímače Alphasatu 19 GHz.....	77
Obrázek 55: Porovnání útlumů využitých pro další výpočty.....	82
Obrázek 56: Porovnání množství kapalné vody ve dnech 11.7.-12.7.2017.....	83
Obrázek 57: Porovnání množství vodních par ve dnech 11.7.-12.7.2017	83
Obrázek 58: ILWC pro kombinaci útlumů z Alphasatu 19 GHz a z radiometru 39 GHz ...	84
Obrázek 59: ILWC pro kombinaci útlumů z Alphasatu 19 GHz a 39 GHz s korekcí dat ...	85
Obrázek 60: IWVC pro kombinaci útlumů z Alphasatu 19 GHz a z radiometru 39 GHz...	85
Obrázek 61: IWVC pro kombinaci útlumů z Alphasatu 19 GHz a 39 GHz s korekcí dat...	86

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Průměrné hodnoty koeficientů A_0 , a_v a a_L [11]	24
Tabulka 2: Hodnoty koeficientů A_0 , a_v , a_L vypočtené pro město Praha [11]	24
Tabulka 3: Sledování stavu oblohy listopad 2016	35
Tabulka 4: Tabulka vlastností (útlumu) pyramidového absorbéru [2].....	36
Tabulka 5: Tabulka vlastností (útlumu) plochého absorbéru [2].....	37
Tabulka 6: Pokusné měření radiometrem 11 GHz.....	42
Tabulka 7: Měření přibližné hodnoty 300 K radiometrem 39 GHz s LNB	60
Tabulka 8: Měření radiometrem 39 GHz se zapůjčeným LNB	60
Tabulka 9: Testování zastínění zářiče radiometr 39 GHz rukou.....	61
Tabulka 10: Změny síly signálu Alphasat 39 GHz připojením radiometru 39 GHz	64

SEZNAM ZKRATEK

ILWC	integrated liquid water content (integrovaný obsah kapalné vody ve sloupci)
IWVC	integrated water vapor content (integrovaný obsah vodních par ve sloupci)
ESA	European Space Agency (Evropská kosmická agentura)
ČR	Česká Republika
ÚFA	Ústav fyziky atmosféry
AFC	automatic frequency control (automatické frekvenční doladování)
LNB	Low-noise block converter (satelitní konvertor)
EPS	Extruded polystyrene foam (extrudovaný polystyren)
TE	Telemeter Electronics
UTC	Coordinated Universal Time (Koordinovaný světový čas)
SD karta	Secure Digital card (zabezpečená digitální karta)
UPCE	Univerzita Pardubice

ÚVOD

V současné době převládá trend bezdrátové komunikace. Existují spousty druhů bezdrátové komunikace využívajících různých druhů zařízení operujících na různých frekvencích. Většina bezdrátových komunikačních cest probíhá ne příliš vysoko nad povrchem země. Je zde však i mnoho komunikačních řetězců využívajících komunikaci s družicí nebo komunikaci s přenosem ve vyšších vrstvách atmosféry. Každý realizovaný komunikační řetězec může být ovlivňován aktuálním stavem atmosféry. Atmosféra se skládá z různých plynů, vody, pevných částic o různých velikostech tvaru a materiálu. Každá z těchto složek může mít nepříznivý vliv na šíření signálu. Většinou nezávisí pouze na množství obsažených látek v atmosféře, ale také na frekvenci, na které zařízení operuje. Z těchto důvodů je velká pozornost věnována sledování stavu atmosféry. Pro sledování atmosféry bylo vyvinuto značné množství zařízení a metod. Jedná se například o balonové sondy, družicové spoje vyhrazené pro účely výzkumu stavu atmosféry, metody výpočtů z měření různých parametrů atmosféry (tlak, relativní vlhkost a další), radiometry a mnohé další.

Tato diplomová práce se zabývá sledováním stavu atmosféry s využitím radiometrického měření. Zabývá se sestavením měřicí soustavy s využitím alespoň dvou radiometrů ze tří technicky dostupných pro tyto účely. Soustava by měla být schopna měřit některé vlastnosti atmosféry. Radiometr primárně měří šumovou teplotu atmosféry. Z té lze dále vypočítat například obsah kapalně vody v atmosféře, obsah vodních par v atmosféře a útlum atmosférou.

Předpokládaný cíl diplomové práce je vytvoření měřicí soustavy dvou radiometrů schopné sledovat stav atmosféry. Sledování atmosféry by mělo spočívat v určování obsahu kapalně vody, obsahu vodních par a útlumu atmosférou. Pokud to bude možné, provádět sledování stavu atmosféry ve sloupci komunikačního řetězce přijímačů z družice Alphasat. Dalším předpokladem je vytvoření korekční křivky pro korekci útlumu počítaného prostřednictvím měření dat z družice Alphasat. Korekci je zde nutné provádět kvůli prostorové nestabilitě. Vypočtený útlum je tedy ovlivněn změnou útlumu atmosférou a zároveň změnou útlumu vychýlením družice z její polohy.

1 MOTIVACE

Radiometr je přístroj měřící na dálku šumovou teplotu atmosféry i jiných objektů. Je výborným nástrojem pro mnoho aplikací. Používá se například k měření teploty, identifikaci požárů, v medicíně a k mnoha dalším účelům. Velkým pomocníkem je radiometr i pro výzkum atmosféry, kdy lze za pomoci dvou nebo více radiometrů operujících na různých kmitočtech odvodit [11]:

- a) ILWC (integrated liquid water content - integrovaný obsah kapalně vody ve sloupci) a odtud lze snadno odhadnout útlum, který by způsobila oblaka družicovému spoji,
- b) IWVC (integrated water vapor content - integrovaný obsah vodních par ve sloupci), odtud lze snadno odhadnout útlum, který by způsobila vodní pára družicovému spoji,
- c) šumovou teplotu dešťové oblasti a odtud odhadnout útlum deštěm družicového spoje.

Účelem této práce je také co nejvíce napomoci při řešení projektu od European Space Agency (ESA) s názvem „Earth-space path propagation characteristics in the climatic conditions of the Czech Republic from Alphasat Ka/Q band experiment,” jehož řešitelem je Ústav fyziky atmosféry Akademie věd ČR (ÚFA) a zároveň provést vlastní průzkum atmosféry. [30], [31], [32]

ÚFA provádí měření úrovně signálu na komunikačním řetězci mezi družicí Alphasat a Zemí. Z úrovně signálu, která je ovlivněna nejenom stavem atmosféry, ale i prostorovou nestabilitou družice, ÚFA odvozuje matematickými postupy útlum atmosféry [30], [31], [32].

Měření za pomoci radiometru může v tomto ohledu značně napomoci při detekci příčiny způsobených útlumů signálu. Ne každý pokles úrovně přijímaného signálu je totiž způsoben atmosférou (různé technické příčiny).

Radiometrické měření lze pak dále využít pro zkoumání atmosféry z hlediska šíření vln. Lze ho použít jako samostatný měřicí prvek nebo jako součást měřicí soustavy, kde bude plnit funkci vstupních dat pro výpočet útlumu komunikační cesty a dále zjištění obsahu kapalně vody a vodních par ve vertikálním sloupci. Z tohoto údaje lze předpovídat útlum oblaky a útlum vodních par.

1.1 Stav řešené problematiky

Radiometry se používají již desítky let v různých odvětvích. Použití je např. v zemědělství, kdy radiometr na letadle dokáže dálkově zjistit stupeň zralosti pšenice, k indikaci požáru, měření vlhkosti písku atd.

Principům radiometrie se věnují publikace:

- R. H. A Radiometer for measuring thermal radiation at microwave frequencies [33],
- Microwave remote sensing: active and passive [34],
- RF Radiometer Handbook [35],
- A Useful Prediction Tool. Noordwijk: ESA Scientific and Technical Publ [36].

V oblasti šíření vln se radiometrem primárně určuje šumová teplota oblohy včetně srážkových oblastí, oblaků, mlhy a vodní páry a odtud se odhaduje velikost útlumu družicového spoje, jehož signál přichází z toho směru, který radiometr sleduje.

Tradičně se využití radiometrů pro výzkum šíření vln věnuje např. Sapienza Universita di Roma (Itálie), jmenovitě prof. Frank Marzano. Přímo na střeše univerzity provozují několik radiometrů. Radiometry jsou sklopeny směrem dolů na odraznou desku (využívají odrazu od této desky), aby do antény radiometru nezatékala dešťová voda.

Jejich práci nalezneme například v publikacích:

- Modeling and measurement of rainfall by ground-based multispectral microwave radiometry [37],
- Bayesian estimation of precipitating cloud parameters from combined measurements of spaceborne microwave radiometer and radar [38].

V Rakousku používali radiometry na podporu výzkumu šíření radiových vln na experimentálním pracovišti Lustbuhel v Grazu. Vycházelo se především z teoretických popisů jejichž autorem je prof. Walter Randeu.

Publikace:

- Radiometer Diversity Experiment [39],
- Über Messungen der atmosphärischen Rauschtemperatur bei 11,4 GHz im Grazer Becken und die Bestimmung von Ausbreitungsparametern auf Satellitenfunkstrecken im Einzelstations-und Diversitybetrieb [40],

- Quadruple-site radiometric diversity measurements at 12 GHz [41],
- Radiometer diversity results (1. 2. 1983–1. 3. 1986) [42],
- Description of the envisaged propagation measurement equipment for OTS at Lustbühel/Graz/Austria [43].

V České republice se radiometrům systematicky věnuje Katedra elektromagnetického pole FEL ČVUT pod vedením prof. Miloše Mazánka, CSc.

Publikace:

- Short-term Prediction and Detection of Dynamic Atmospheric Effects by Microwave Radiometer [44].

1.2 Projekt Alphasat

Projekt SCIEX s družicí Alphasat spočívá v příjmu majákových vysílačů této kvazi-geostacionární družice. Její prostorová stabilizace je nedokonalá a rozkmit jejího pohybu bohužel stále roste. Důvodem rostoucího rozkmitu je zájem o prodloužení životnosti družice, a tudíž šetření palivem.

Družice se tedy pohybuje (opisuje elipsu), jejíž poloosy se bohužel zvětšují. Pro požadovaný příjem družice je nutné sledovat polohu družice směřováním antény. V případě ÚFA to je jen ve vertikální ose. Důvodem stabilizace pouze jedné osy je, že rozkmit na vertikální ose je přes 3° , zatímco na horizontální ose je „jen“ $0,3^\circ$. Souřadnice družice jsou známy deset dní dopředu.



Obrázek 1: Umístění přijímačů družice Alphasat v areálu ÚFA

Družice Alphasat disponuje dvěma majákovými vysílači na frekvencích v pásmech 19GHz (Ka) a 39GHz (Q). Pro příjem má ÚFA k dispozici dva samostatné přijímače, každý se separátní parabolickou anténou na požadovaných frekvencích. Antény jsou vybaveny pohonem pro směřování v elevaci a přijímač má vypínatelné AFC (automatic frequency control - automatické frekvenční doladování). Směřování je nastavitelné, nejvíce vyhovuje směřování každých 10 minut (automaticky se hledá maximum signálu). [30], [31], [32]

2 RADIOMETRIE

Radiometrii můžeme považovat za část fyziky, která se zabývá měřením nekoherentního vyzařování elektromagnetické energie těles. Toto záření je vyzařováno všemi materiály. Radiometr je potom zařízení, které je velice citlivé, má široké frekvenční pásmo a jeho úkolem je měřit šumovou teplotu. Radiometrické měření nám umožní po přepočtu měřit atmosférický útlum za pomoci atmosférické emise meteorologických cílů. [4], [11], [14]

Příkladem zdroje elektromagnetického záření je Slunce, které dodává energii všem osvětleným předmětům. Tato skutečnost vede ke zvyšování teploty. Příroda má takovou rovnovážnou schopnost, že každé těleso, kterému je dodaná energie formou elektromagnetického záření, energii v nějaké míře opět vyzáří. Intenzita a frekvence takto vyzářené energie je závislá na teplotě a vlastnostech daného ozářeného objektu, materiálu nebo látky. Vzhledem ke všem skupenstvím ozářených látek (plynné, kapalné a pevné), můžeme říci, že vyzařované spektrum je zastoupeno na téměř všech frekvencích. Vedle všech materiálů, látek a objektů existuje také těleso, které je vyrobeno z ideálního materiálu. Takové těleso dokáže absorbovat veškeré záření a žádné neodrazit, je tedy perfektní absorbér i emitör. Nazýváme ho absolutně černé těleso. [4], [5], [6], [11], [14]

2.1 Spektrální jas

Intenzitu vyzařování energie tělesy je nejuvhodnější vyjádřit pomocí spektrálního jasu B_f , který reprezentuje vyzářenou energii na jednotku plochy, úhel a šířku pásma. Planckův radiační zákon založený na kvantizaci úrovní energie se týká spektrálního jasu uniformně vyzářeného ve všech směrech absolutně černým tělesem při jeho frekvenci a teplotě. [4], [5], [11], [14]

Na základě Planckova zákona se uvádí rovnice [5], [11], [14]:

$$B_f = \frac{2 \cdot h \cdot f^3}{c^2 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot f}{k \cdot T}} - 1 \right)} \quad [\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}], \quad (2.1)$$

kde: B_f = spektrální jas absolutně černého tělesa [$\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$],
 h = Planckova konstanta = $6,63 \cdot 10^{-34}$ [Joule],
 f = frekvence [Hz],
 k = Boltzmanova konstanta = $1,38 \cdot 10^{-23}$ [Joule K^{-1}],
 T = absolutní teplota [K],
 c = rychlost světla = $3 \cdot 10^8$ [m s^{-1}].

Pokud budeme uvažovat tělesa z běžných materiálů, dojdeme k tomu, že část dopadajícího záření je odražena v závislosti na směru dopadu. Běžné materiály proto nejsou dobrými absorberými ani emitory. [4], [5], [11], [14]

Spektrální jas je pak v praxi počítán pro daný směr [5], [11], [14]:

$$B_f = \frac{2 \cdot f^2 \cdot k \cdot T_b}{c^2} \quad [\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}], \quad (2.2)$$

kde: B_f = spektrální jas absolutně černého tělesa [$\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$],
 f = frekvence [Hz],
 k = Boltzmanova konstanta = $1,38 \cdot 10^{-23}$ [Joule K^{-1}],
 T_b = měřená teplota jasu - radiometrická teplota [K],
 c = rychlost světla = $3 \cdot 10^8$ [m s^{-1}].

Radiometrická teplota T_b je teplota jasu nebo radiometrická teplota černého tělesa, což je fyzická teplota absolutně černého tělesa, které vyzařuje stejnou energii. [4], [5], [11], [14]

2.2 Radiometrické stanovení útlumu

Radiometrická teplota T_b se dá dále využít pro stanovení útlumu cesty mikrovlnného signálu, v našem případě z družicového vysílače. [11], [4]

Pro tento výpočet ji potřebujeme měřit za pomoci radiometru [11]:

$$A = \frac{4,343 \cdot \log_e(T_{mr} - T_0)}{(T_{mr} - T_b)} \quad [\text{dB}], \quad (2.3)$$

kde: A = útlum cesty [dB],
 T_{mr} = efektivní vyzářená teplota okolí [K],
 T_b = měřená teplota jasu – radiometrická teplota [K],
 T_0 = teplota kosmického pozadí [K].

Tato rovnice je běžně používána pro přepočítání radiometrické teploty T_b na útlum signálu spoje. Rovnice je bohužel limitována na nízké útlumy (do 10 dB). Důvodem této limitace je saturace. K saturaci dochází, blíží-li se radiometrická teplota T_b efektivní vyzářené teplotě T_{mr} . [4], [6], [11], [14]

Efektivní vyzářená teplota T_{mr} reflektuje informace o vlivu fyzikálních vlastností atmosféry v závislosti na frekvenci, místních fyzikálních a klimatologických podmínkách. V praxi je tato veličina volena jako konstanta s hodnotou typicky okolo 270 K. Některé zdroje uvádějí její výpočet na základě násobení teploty povrchu Země v blízkém okolí umístění radiometru konstantou. Násobí se pak tedy teplota povrchu T_{surf} konstantou odpovídající operační frekvenci radiometru (například 0,95 pro 20GHz a 0,94 pro 30GHz). Další možností je využití rovnice, která byla stanovena na základě měření útlumu atmosféry pomocí majáků a dále zpětným odvozením. [4], [6], [11], [14]

Rovnice pro přepočet z teploty povrchu T_{surf} na efektivní vyzářenou teplotu T_{mr} má tvar [9], [11]:

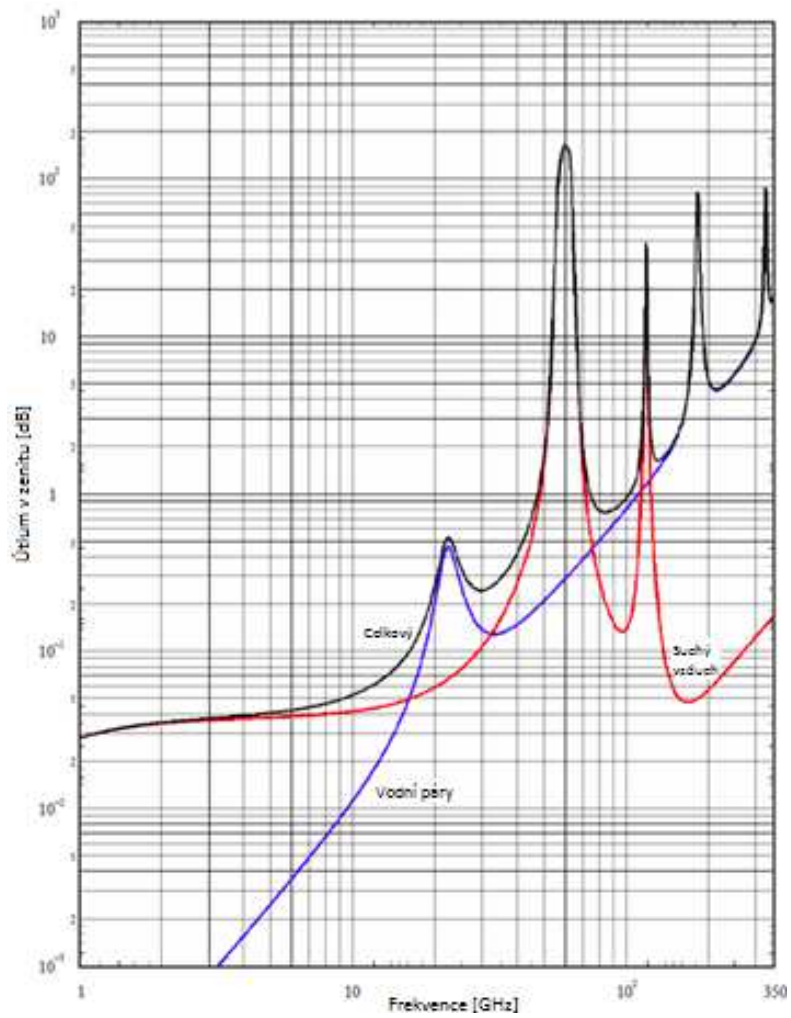
$$T_{\text{mr}} = T_{\text{surf}} - 20 \quad [\text{K}], \quad (2.4)$$

kde: T_{mr} = efektivní vyzářená teplota okolí [K],
 T_{surf} = teplota povrchu Země [K].

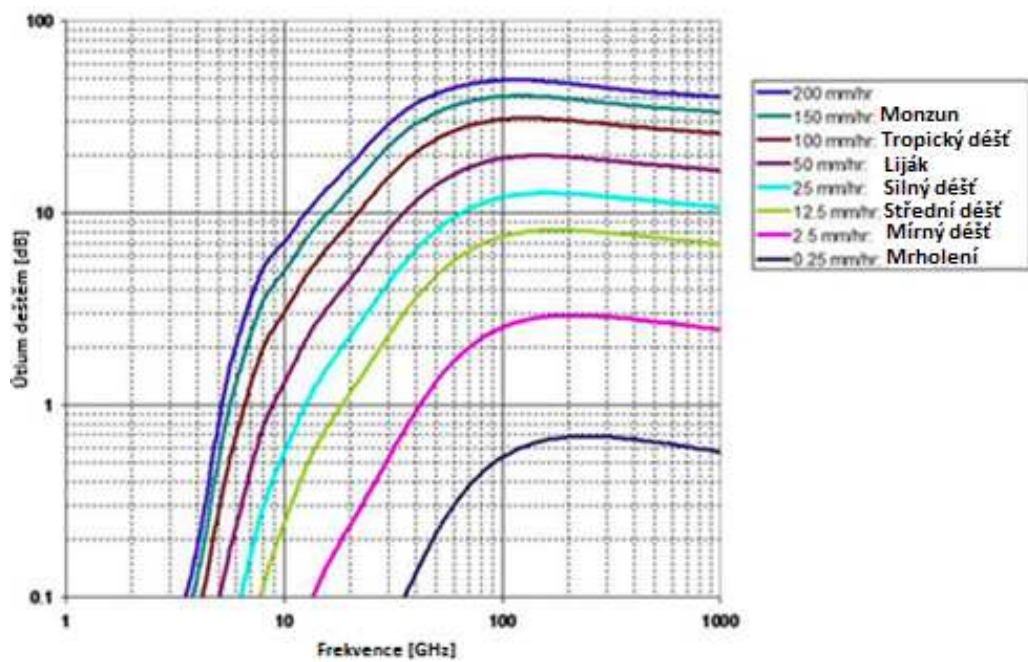
2.3 Absorpce atmosférou

Atmosféra je z velké části tvořena plyny a kapkami různých velikostí. Pokud se budeme soustředit na plyny, které mají menší (nikoliv ale zanedbatelný) vliv na útlum mikrovlnných signálů, budeme mluvit o kyslíku a vodních parách. Atmosféra se zastoupením pouze plynů je definována jako „čistá“ a bez rozptylu. Voda se v atmosféře vyskytuje nejen ve formě dešťových kapek ale také ve formě mikroskopických kapek, které formují oblaka a mlhu. Zmrzlé kapičky vody tvoří ledové krystalky a kroupy. Jejich absorpční efekt je pro nás celkem zanedbatelný. Další složkou atmosféry je aerosol. Jedná se o seskupení velmi malých částic jako je opar, prach a další. Ostatní plyny jako dusík, oxid uhličitý a další, stejně jako aerosol nemají vliv v mikrovlnném pásmu. Tyto plyny a aerosoly se ovšem projeví například při šíření vln v infračervených frekvencích. [4], [6], [11], [14]

Útlum atmosféry je nejen zvýšen samotným množstvím vodních par a kapek, ale také se mění s použitou frekvencí. Při dosažení takzvané kritické frekvence (rezonanční kmitočet) hodnota útlumu velmi roste. Naopak při nízkých frekvencích nemusí drobný déšť způsobit znatelný útlum. Tato skutečnost je zobrazena na následujícím obrázku (obr. 2 a obr. 3). [4], [6], [11]



Obrázek 2: Útlum vodních par, suchého vzduchu a celkový útlum [1]



Obrázek 3: Porovnání útlumů pro různé frekvence a různě silné srážky [1]

Celková absorpce atmosférou A bude složena z několika absorpčních složek. Těmito složkami jsou útlum kyslíkem A_0 , útlum vodními parami A_V a útlum vodou v kapalném skupenství A_L . Pro výpočet útlumů vodními parami a kapalnou vodou musíme vypočítat nejprve jejich množství v milimetrech. [4], [11], [14]

Vzorec pro výpočet útlumu vodními parami je definován jako [11], [14]:

$$A_V = a_V \cdot V \quad [\text{dB}], \quad (2.5)$$

kde: A_V = útlum vodními parami [dB],
 a_V = absorpční koeficient vodních par [dB/mm],
 V = množství vodních par ve sloupci [mm].

Stejným způsobem, jako je definován výpočet útlumu pro vodní páry, je definován i výpočet útlumu pro kapalnou vodu [11], [14]:

$$A_L = a_L \cdot L \quad [\text{dB}], \quad (2.6)$$

kde: A_L = útlum kapalnou vodou [dB],
 a_L = absorpční koeficient tekuté vody [dB/mm],
 L = množství kapalné vody ve sloupci [mm].

Celkový vzorec pro výpočet útlumu má tvar [11], [14]:

$$A = A_0 + A_V + A_L = A_0 + a_V \cdot V + a_L \cdot L \quad [\text{dB}], \quad (2.7)$$

kde: A = celkový útlum [dB],
 A_0 = útlum kyslíkem [dB],
 a_V, a_L = absorpční koeficienty [dB/mm],
 V, L = množství vodních par a vody ve sloupci [mm].

V předchozích vzorcích jsou použity absorpční koeficienty a_V , a_L a také útlum kyslíkem A_0 . Jedná se o konstanty, které jsou vypočítány za pomoci teoretických modelů vycházejících z teorie sondování pomocí radiosond. [4], [11], [14]

Tabulka 1: Průměrné hodnoty koeficientů A_0 , a_V a a_L [11]

Frekvence	Kyslík	Vodní páry	Tekutá voda
[GHz]	A_0[dB]	a_V[dB/mm]	a_L[dB/mm]
12,5	0,037	0,001	0,120
18,7	0,047	0,007	0,263
19,8	0,050	0,012	0,294
23,8	0,062	0,023	0,418
29,7	0,092	0,009	0,636
31,7	0,107	0,008	0,718
39,6	0,225	0,009	1,080
49,5	1,112	0,012	1,605

Tabulka 2: Hodnoty koeficientů A_0 , a_V , a_L vypočtené pro město Praha [11]

Tabulka koeficientů A_0, a_V, a_L vypočtená pro Prahu										
f [dB]	12,5	13,0	18,7	19,8	23,8	29,7	31,7	39,6	49,5	52,0
A_0 [dB]	0,036	0,037	0,047	0,050	0,062	0,092	0,107	0,223	1,102	2,736
a_V [dB/mm]	0,001	0,001	0,007	0,012	0,023	0,008	0,008	0,009	0,012	0,013
a_L [dB/mm]	0,142	0,153	0,309	0,345	0,491	0,743	0,839	1,256	1,853	2,013

2.4 Stanovení obsahu vody v atmosféře

Množství vodních par V a kapalné vody L může být také měřeno za pomoci radiosond (po příslušném přepočtu). Měření je v tomto případě limitováno frekvencí, s jakou mohou být radiosondy vypouštěny. Dále je nutné provést přepočet změřených hodnot. Radiosondy měří vertikální profil těchto veličin, jehož výsledky budou odlišné od cesty satelitních přijímačů, které mohou snímat například pod úhlem 30° . Běžně se ale předpokládá, že atmosférické veličiny jsou v horizontálním směru konstantní. [11], [14]

Druhou možností měření obsahu vodních par a kapalné vody je využití radiometrického měření. Měření za pomoci dvou radiometrů na rozdílných frekvencích nám umožní počítat množství vodních par a kapalné vody v reálném čase a zároveň je možné provést měření v komunikační cestě, která je pro nás zajímavá a nemusíme provádět další přepočty. [11], [14]

2.4.1 Radiometrické stanovení obsahu vody v atmosféře

Pro stanovení množství vodních par a kapalné vody v atmosféře za pomoci radiometrů, budeme potřebovat dva radiometry, operující na rozdílných frekvencích f_1 a f_2 . Rozdílné frekvence se volí účelně tak, aby jedna z frekvencí byla citlivější na obsah vodních par a druhá na obsah kapalné vody. Nejvhodnější je tedy zvolit frekvenci jednoho radiometru ve špičkové hodnotě útlumu vodními parami, která se nachází v rozmezí 20,6GHz - 23,8GHz. Frekvence druhého radiometru se pak volí v okolí špičkové hodnoty útlumu kapalnou vodou, která se nachází na frekvenci 31,5GHz. [11], [14]

Soustava rovnic má tvar [11], [14]:

$$A_1 = A_{01} + a_{V1} \cdot V + a_{L1} \cdot L \quad [\text{dB}], \quad (2.8)$$

$$A_2 = A_{02} + a_{V2} \cdot V + a_{L2} \cdot L$$

kde: A_1, A_2 = celkový útlum pro frekvence f_1 a f_2 [dB],
 A_{01}, A_{02} = útlum kyslíkem pro frekvence f_1 a f_2 [dB],
 a_{V1}, a_{V2} = absorpční koeficienty vodních par pro frekvence f_1 a f_2 [dB/mm],
 a_{L1}, a_{L2} = absorpční koeficienty tekuté vody pro frekvence f_1 a f_2 [dB/mm],
 V, L = množství vodních par a vody ve sloupci [mm].

Řešením soustavy dvou rovnic o dvou neznámých (2.8) dostaneme řešení pro L a V. Při vyjádření V dostaneme vzorec pro výpočet množství vodních par a při vyjádření L naopak vzorec pro výpočet množství kapalné vody. [11], [14]

3 RADIOMETRY

Mikrovlnné radiometry pro účely výzkumu šíření vln atmosférou jsou navrženy tak, aby byly vhodné pro pozorování oblohy a srážek. Způsob pozorování je definován jako detekování šumové teploty cílů ve směru antény. Celkový přijatý šum je tedy součtem několika šumových hodnot. Jedná se o šum přijatý anténou a šum generovaný vlastním zařízením. Dále i šum přijatý anténou můžeme dělit na dvě části. Šum přijatý hlavním vyzařovacím svazkem antény a šum přijatý postranními laloky antény. Zejména šum přijatý postranními laloky může velmi ovlivnit výslednou hodnotu. Pokud postranní lalok zasáhne vegetaci nebo budovu (zejména v teplých dnech a dnech, kdy má vegetace mnoho listů), vnese do měření vysokou hodnotu až 300 K. Postranní lalok má sice mnohem menší zisk, ale může vnášet do měření několikanásobně větší hodnotu než hodnota cíle. Teplota jasu T_b nebo ekvivalentní šumová teplota atmosféry měřena hlavním svazkem antény se nazývá „šumová teplota oblohy“ a značí se T_s . O této šumové teplotě T_s můžeme říci, že je úměrná hustotě vodních par a kapek a také závislá na jejich fyzikální teplotě. [4], [5], [6], [11], [12], [14]

Při měření za pomoci radiometrů je velmi důležité věnovat zvýšenou pozornost místu, kam cílí osa antény radiometru. Pokud dojde k přechodu osy přes Slunce na obloze, bude radiometr v době přechodu vykazovat hodnotu 300 K a měření bude po tuto dobu nepoužitelné. Další problémy mohou způsobit například družice vysílající na kmítočtu, který leží uvnitř šířky pásma radiometru. Signál z družice, který je přijímán, se bude chovat jako zdroj šumové teploty a může různorodě ovlivňovat výsledky měření. Nejméně problematické bude, pokud družice vysílá konstantně a při jejím přechodu způsobí jakýsi „kopec“ na měřených datech (viz dále). Pokud však družice vysílá jiným způsobem, můžou vzniknout nepříjemné skoky v měření. Nejvhodnějším řešením je například za pomoci spektrálního analyzátoru provést kontrolu spektrální oblasti, jestli v průběhu dne nedochází k ovlivnění nežádoucím činitelem. Pokud k této skutečnosti dochází, lze tento problém řešit úzkopásmovou zádrží. Správně vyrobená pásmová zádrž by měla nežádoucí vliv odstranit a při tom minimálně ovlivnit měření odstraněním jen velmi malé části frekvenčního pásma snímaného radiometrem. [4], [5], [6], [11], [12], [14]

Většina moderních radiometrů měří šumový výkon P_s místo přímého měření šumové teploty T_s . Je tedy nutné šumový výkon přepočítat na šumovou teplotu. K realizaci tohoto přepočtu je nutné znát několik parametrů zařízení. Pokud se sestrojuje zařízení jako celek, jsou tyto parametry dány výrobcem. Obtížněji se získává parametr přidaného šumu zařízením T_a

v situaci, kdy je radiometr montován jako přídavné zařízení do satelitního komunikačního řetězce. [4], [5], [6], [11], [12], [14]

Šumový výkon lze vypočítat pomocí rovnice [5], [11]:

$$P_{\xi} = k \cdot B \cdot G \cdot (T_a + T_{rec}) \quad [W], \quad (3.1)$$

kde: P_{ξ} = měřený výkon šumu [W],
 k = Boltzmanova konstanta = $1,38 \cdot 10^{-23}$ [Joule K⁻¹],
 B = šířka pásma [Hz],
 G = celkový zisk zařízení [-],
 T_a = přidaná šumová teplota antény a přijímací cesty [K],
 T_{rec} = šumová teplota přijatá anténou [K].

3.1 Radiometr typu „Total power“

Tento typ radiometru se řadí mezi nejzákladnější typy. V podstatě každé zařízení, které dokáže měřit celkový šumový výkon, můžeme považovat za radiometr typu „Total power.“ Jeho základní součástí je přijímač s přesně definovanou dostatečnou šířkou pásma a stabilním ziskem připojený na anténu. Dále takový radiometr obsahuje detektor, video zesilovač a integrátor. [4], [5], [8], [11], [12]

Výstupní napětí je u tohoto zařízení dáno rovnicí [11]:

$$V_{out} = c \cdot B \cdot G \cdot (T_a + T_{rec}) = c \cdot B \cdot G \cdot T_{sys} \quad [V], \quad (3.2)$$

kde: V_{out} = výstupní napětí [V],
 c = konstanta napěťové citlivosti detekční diody [V Hz⁻¹ K⁻¹],
 B = šířka pásma [Hz],
 G = zisk zařízení [-],
 T_a = přidaná šumová teplota antény a přijímací cesty [K],
 T_{rec} = šumová teplota přijatá anténou [K],
 T_{sys} = celková šumová teplota [K].

U tohoto typu radiometru jsou dvě možnosti výpočtu rozlišovací úrovně. Záleží zde na stabilitě zisku. V prvním případě (rovnice 3.3) [5], [11] je zisk radiometru stabilní a změny fluktuace závisí pouze na fluktuacích náhodného měřeného signálu. Tato skutečnost však nastává jen v ideálním případě. [4], [5], [8], [11], [12]

$$\Delta T = \frac{T_a + T_{rec}}{\sqrt{B \cdot \tau}} \quad [K], \quad (3.3)$$

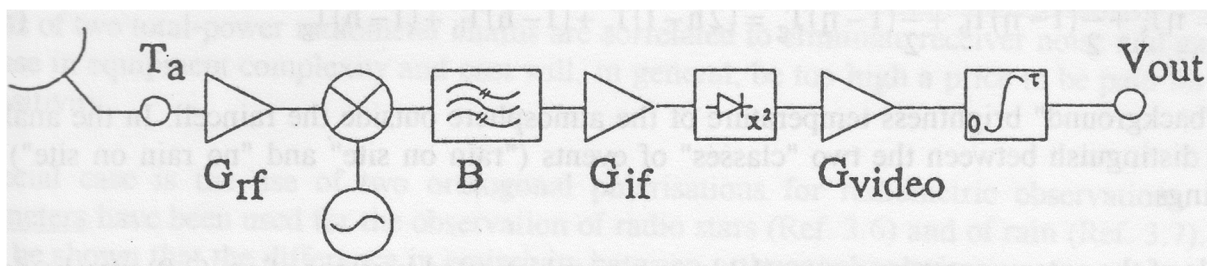
kde: ΔT = rozlišení radiometru [K],
 B = šířka pásma [Hz],
 T_a = přidaná šumová teplota antény a přijímací cesty [K],
 T_{rec} = šumová teplota přijatá anténou [K],
 τ = integrační čas [s].

Z důvodu co nejlepšího rozlišení, tedy co nejnižší hodnoty ΔT volíme přijímač s co nejnižší možnou šumovou teplotou. Šířka pásma závisí na účelu použití výsledného zařízení. [4], [5], [8], [11], [12]

V druhém případě (rovnice 3.4) [5], [11] musíme počítat se skutečností, že dochází ke změnám zisku radiometru v průběhu času. Tyto změny jsou do výpočtu zaneseny v podobě průměrného zisku G a efektivní hodnoty změn zisku ΔG . [4], [5], [8], [11], [12]

$$\Delta T = (T_a + T_{rec}) \cdot \sqrt{\frac{1}{B \cdot \tau} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2} \quad [K], \quad (3.4)$$

kde: ΔT = rozlišení radiometru [K],
 B = šířka pásma [Hz],
 T_a = přidaná šumová teplota antény a přijímací cesty [K],
 T_{rec} = šumová teplota přijatá anténou [K],
 τ = integrační čas [s],
 G = průměrný zisk zařízení [-],
 ΔG = efektivní hodnota změn zisku [-].



Obrázek 4: Blokové schéma radiometru typu „Total power“ [11]

(kde G_{rf} je zisk VF zesilovače, G_{if} je zisk MF zesilovače, G_{video} je zisk videozesilovače a V_{out} je výstupní napětí)

Při návrhu radiometru tohoto typu je tedy nutné se soustředit na co nejlepší stabilizaci zisku zařízení. Jedením z faktorů, který výrazně ovlivní zisk je teplotní stabilizace. Tento faktor lze jednoduše eliminovat umístěním celého zařízení do teplotně stabilizovaného boxu. [4], [5], [8], [11], [12]

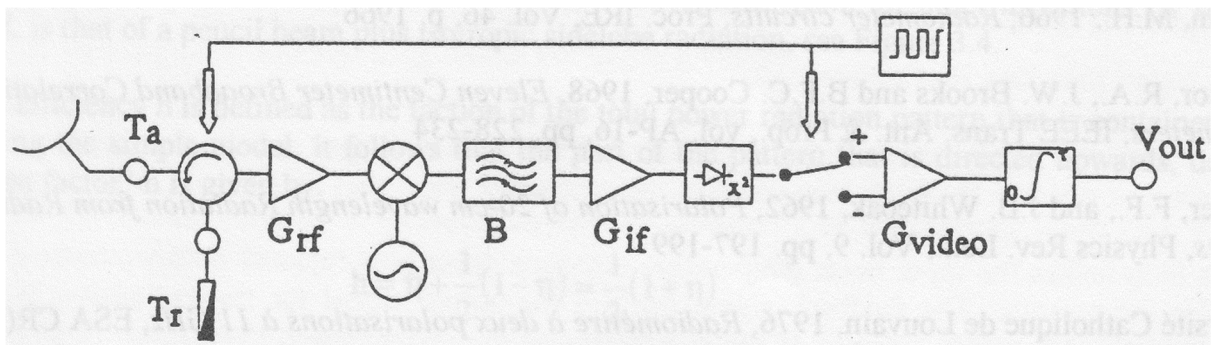
3.2 Radiometr typu „Dicke“

Tento typ radiometru, jehož autorem je pan Dicke, dosahuje velké stability a umožňuje nám měřit velmi malé změny šumové teploty. Jedná se o modifikaci radiometru typu „Total power.“ Oproti „Total power“ je vybaven navíc přepínačem umístěným co nejbližší k anténě a synchronním demodulátorem, který je umístěn mezi detektorem a filtrem typu dolní propust. Radiometr je dále vybaven kalibračním zdrojem šumové teploty, který je připojen na vstupní přepínač. Kalibračním zdrojem šumové teploty může být například absolutně černé těleso nebo jiný stálý zdroj šumové teploty 300 K. Princip pak spočívá v přepínání těchto dvou vstupů, a to již zmíněného zdroje 300 K a anténou. Toto přepínání lze realizovat jako přepínání polarizace v LNB, přičemž je ve vstupním vlnovodu vložena absorpční destička (zdroj 300 K), která ovlivní pouze jednu polarizaci LNB. Frekvence přepínání musí být dostatečně vysoká, aby se eliminovaly poklesy měřené šumové teploty během jednoho přepínacího cyklu. Výstupem takového radiometru je pak přímo změřená šumová teplota převedená na výstupní napětí o definovaném rozsahu (například 0-300 K = 0-5 V). [3], [4], [5], [11], [12]

Rozlišovací schopnost tohoto typu radiometru lze vypočítat pomocí následujícího vzorce [11]:

$$\Delta T = \sqrt{\frac{2 \cdot (T_a + T_{rec})^2 + 2 \cdot (T_r + T_{rec})^2}{B \cdot \tau} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2 \cdot (T_a + T_r)^2} \quad [\text{K}], \quad (3.5)$$

kde: ΔT = rozlišení radiometru [K],
 τ = integrační čas [s],
 B = šířka pásma [Hz],
 G = průměrný zisk zařízení [-],
 ΔG = efektivní hodnota změn zisku [-],
 T_a = přidaná šumová teplota antény a přijímací cesty [K],
 T_{rec} = šumová teplota přijatá anténou [K],
 T_r = šumová teplota referenčního zdroje [K].



Obrázek 5: Blokové schéma radiometru typu „Dicke“ [11]

(kde G_{rf} je zisk VF zesilovače, G_{if} je zisk MF zesilovače, G_{video} je zisk videozesilovače a V_{out} je výstupní napětí)

3.3 Radiometr typu „Noise-Injection“

Tento typ radiometru je další modifikací na typy „Dicke“ a „Total power.“ Pokud se podíváme na výpočet citlivosti u předešlých typů, zjistíme, že se zde počítá s jistou fluktuací zisku zařízení. Tato fluktuace je ale nežádoucí. Tento typ radiometru se tedy zaměřuje především na její odstranění. [5], [11]

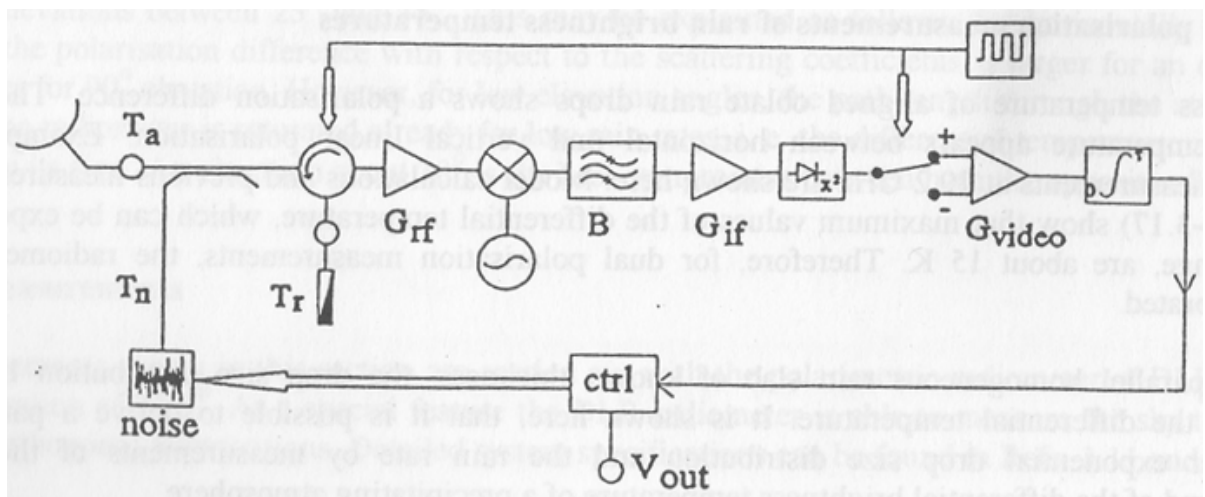
Způsob odstranění fluktuace zisku je řešen doplněním radiometru typu „Dicke“ o zpětnou vazbu, která má za úkol hlídat množství šumu vpuštěného do vstupu přijímače. Toto hlídání probíhá jako snaha o udržení rovnosti mezi šumem referenčního zdroje T_r a vstupní šumovou teplotou T_{sys} (T_{sys} je součet přidané šumové teploty anténou a přijímací cestou T_a a šumové

teploty přijaté anténou T_{rec}) za pomoci přivádění (vstřikování/přičítání) zpětnovazebního signálu T_i k T_{sys} . Výstup té části radiometru, která odpovídá typu „Dicke“, je po takovémto zásahu rovna nule. [5], [11]

Výstup radiometru „Noise-Injection“ je řešen jako detektor zisku zpětné vazby neboli detektor množství vstřikované šumové teploty T_i . Největší výhodou takto řešeného radiometru je, že veškerý vliv nestálosti zisku z důvodu tepelné závislosti byl odstraněn. [5], [11]

Existuje mnoho různých variant zpětných vazeb pro tento typ radiometru. Nejběžnější používané varianty pro kontrolu množství vstřikované šumové teploty T_i jsou proměnný útlum aktivního referenčního zdroje šumu, pulsně-široková nebo pulsně-frekvenční modulace. [5], [11]

Kalibrace takového zařízení závisí především na kalibraci zpětné vazby a tím pádem přesnost kalibrace zpětné vazby se rovná přesnosti radiometru. [5], [11]



Obrázek 6: Blokové schéma radiometru typu „Noise-Injection“ [11]

(kde G_{rf} je zisk VF zesilovače, G_{if} je zisk MF zesilovače, G_{video} je zisk videozesilovače, T_i je vstřikovaný šum a V_{out} je výstupní napětí)

3.4 Další typy radiometrů

Další typy radiometrů vycházejí především z modifikací těch základních („Dicke“ a „Total power“). Modifikace jsou většinou prováděny za účelem zlepšení vlastností a ve snaze odstranit nedokonalosti. [11]

3.4.1 Radiometr s balancováním zisku

Jedná se o radiometr, jehož vstup je doladován na základě synchronní změny zisků zesilovacích prvků obvodu. Zpětná vazba řídí zisk jednoho z nich tak, aby byl výstup nulový. Měřenou hodnotou je zde zpětnovazební signál. Princip funkce je velmi podobný radiometru typu „Noise-Injection.“ [11]

3.4.2 Radiometr typu „Graham“

Odstranění nedokonalostí radiometrů předchozích typů může být dosti komplikované, pokud jsme omezeni šířkou pásma nebo integračním časem. Tento typ je tedy postaven na využití dvou radiometrických přijímačů. Funkce druhého přijímače pak spočívá v měření po dobu, kdy první neměří (měří šumovou teplotu referenčního tělesa a nepřímá hodnotu z antény). Dochází tedy k paralelní spolupráci, kdy se radiometrické přijímače navzájem doplňují ve své práci a anténní výstup je neustále monitorován. Tento typ vylepšení ovšem nepřináší velké zlepšení citlivosti radiometru. [11]

3.4.3 Korelační radiometr

U tohoto typu radiometru se používá modifikace podobně řešená jako u radiometru typu „Graham.“ Pro měření jsou zde určeny dva radiometrické přijímače typu „Total power,“ které jsou korelovány. Korelace zde slouží pro odstranění fluktuací zisku a přijatého šumu. Zařízení s takovými modifikacemi je čím dál složitější a dražší, avšak zlepšení citlivosti nedosahuje takové míry, aby se vyplatilo takovýto typ radiometru vyrábět. [11]

3.4.4 Radiometr typu „Dual-polarization“

Jak už samotný název radiometru vypovídá, tato modifikace využívá pro účely radiometrického pozorování dvou ortogonálních polarizací. Vyzařovací schopnost těles pro dvě ortogonální polarizace je téměř totožná. Využitím dvou polarizací získáme dvě rozdílné anténní charakteristiky, které nám mohou výrazně pomoci v zpřesnění výsledků. [11]

4 KALIBRACE RADIOMETRŮ

Většina radiometrů je vybavena potenciometry pro přizpůsobení vnitřních parametrů zařízení. Radiometr nejen že měří danou veličinu, ale převádí ji na veličinu, kterou dále můžeme snadno zpracovat. Takovou veličinou je pro nás napětí ve voltech. Potenciometry pak lze nastavit nulu napětí a jeho rozsah.

Vzhledem k umístění radiometrů na anténách přijímačů Alphasatu by bylo nejvhodnější celou tuto parabolickou anténu namířit na těleso se známou šumovou teplotou (kalibrační těleso). To by způsobilo změnu výstupního napětí odpovídající šumové teplotě a při použití druhého kalibračního tělesa s jinou teplotou by bylo možné vytvořit lineární kalibrační přímkou. Takto definovaná kalibrační přímkou by nám umožnila převod jakéhokoliv změřeného napětí na odpovídající šumovou teplotu. Problém u takto umístěných zařízení je, že takovéto antény nelze mechanicky jednoduše nasměrovat na požadovaný cíl. Došlo by totiž k narušení jejich běžné funkce na poměrně dlouhou dobu (vzhledem ke složitosti opětovného správného nasměrování na družici).

Je tu tedy možnost pokusit se vložit takovéto kalibrační těleso do vyzařovacího svazku antény. Bohužel ani tato možnost není úplně ideální, protože anténa díky svým postranním lalokům přijímá šumovou teplotu z okolí. Do těchto postranních laloků tak může zasahovat blízká vegetace, která nijak neovlivní silný signál z družice, ale ovlivní radiometrické měření, které je velmi citlivé. Dalším problémem by byla velikost kalibračního tělesa, která by musela být poměrně veliká, aby obsáhla alespoň hlavní vyzařovací svazek antény.

V úvahu tedy přichází zkusit udělat kalibraci na základě paralelního měření dvou radiometrů a útlumu signálu z přijímačů Alphasatu a pak na jejich základě spočítat konstantu pro přepočítání na šumovou teplotu. Tuto metodu jsme vyzkoušeli, ale číselné hodnoty šumové teploty vypočítané ze signálu družice Alphasat nabývaly nereálných hodnot. Proto jsme se rozhodli využít jinou metodu.

Zkontaktovali jsme tedy dva z výrobců radiometrů, kteří mají dlouholeté zkušenosti i s jejich praktickým užíváním a byla nám doporučena metoda kalibračních těles [9]. Tato metoda spočívá ve vložení kalibračního tělesa mezi zářič a parabolu antény. Velkou nevýhodou takovéto kalibrace je, že měřený signál je pouze signál vyzářený z kalibračního tělesa a není zesílen vlastním ziskem paraboly jako v případě vlastního měření signálu z atmosféry.

V průběhu listopadového testování v roce 2016 byla zaznamenávána náhodně data o stavu počasí a odpovídajících hodnot napěťového výstupu radiometru zobrazovaného datalogerem (programovatelné zařízení určené pro záznam dat z více kanálů).

Tento záznam byl prováděn za účelem získání kalibračních dat pro následující zpracování. Radiometr zaujímal své finální umístění.

Tabulka 3: Sledování stavu oblohy listopad 2016

Datum	Čas	Radiometr 39 GHz	Radiometr 11 GHz	Popis stavu oblohy
3.11.2016	11:00 SEC	2.048 V	1.321 V	mix modré oblohy a bílých "letních" oblaků
3.11.2016	13:00 SEC	2.045 V	1.399 V	modrá obloha, částečně bílá roztrhaná "letní" oblaka
3.11.2016	13:34 SEC	2.053 V	1.550 V	jen modrá obloha
4.11.2016	14:45 SEC	2.053 V	1.675 V	spíše modrá obloha, částečně bílá oblaka
4.11.2016	15:20 SEC	2.065 V	1.926 V	oblaka slabá, šedivá
7.11.2016	14:31 SEC	2.046 V	1.8 V	bílo-šedá oblaka, souvislá
8.11.2016	11:40 SEC	2.048 V	1.338 V	spíše modrá obloha, lehce "zašpiněná" bílými mlžnými útvary
10.11.2016	15:35 SEC	2.047 V	2.254 V	mírný déšť, ve směru pohledu těžká oblačnost nacucaná vodou (hodně tmavé ale ještě ne černé)
10.11.2016	17:55 SEC	2.068 V	2.160 V	oblaka mix černých a bílých
11.11.2016	14:05 SEC	2.043 V	1.808 V	souvislá vrstva oblačnosti, střídají se pásy černých a šedo-bílých oblaků
14.11.2016	10:20 SEC	2.041 V	1.283 V	modrá obloha částečně "zašpiněna" bílým oparem, který se zvedal ze země
14.11.2016	13:30 SEC	2.056 V	1.733 V	modrá obloha, slunečno, slábnoucí souvislý bílý opar ve směru antén
14.11.2016	14:16 SEC	2.058 V	1.867 V	modrá obloha, slabší bílý opar, ale velmi zřetelný
18.11.2016	13:18 SEC	2.056 V	1.649 V	spíše modrá obloha, přes ní se táhnou táhlé pásy bílých oblaků
21.11.2016	13:56 SEC	2.049 V	1.947 V	hustá mlha ale ne čistě bílá
29.11.2016	14:35 SEC	2.062 V	2.26 V	modrá obloha, velmi jemná bílá mlha

Z tabulky č. 3 můžeme jasně vidět změny v napětí získaného z měření radiometrem 11 GHz. Tyto změny jsou chaotické a neodpovídají změnám pozorované oblačnosti. Později bylo zjištěno, že toto zvláštní chování je způsobeno proměnným příspěvkem šumu od zdroje rušení (pravděpodobně z nějaké družice). Dále v kapitole č. 5.5.

4.1 Kalibrace za pomoci kalibračních těles

Jak už bylo zmíněno, tato metoda má své problémy, které je nutné odstranit, aby bylo možné správně zkalibrovat výstupní napětí s měřenou šumovou teplotou.

Doporučené kalibrační tělesa: tekutý dusík (-195,80 °C, tedy 77,35 K) a mokré dřevěné prkénko. Tekutý dusík je vhodné umístit do kelímku z EPS izolačního materiálu (extrudovaný polystyren) namísto klasického plastového kelímku. Do kelímku s tekutým dusíkem je nutné přidat absorpční materiál, který dokáže absorbovat okolní šum v daném frekvenčním pásmu. [9]

Jako těleso s velmi nízkou teplotou byl použit také tekutý dusík. Druhé těleso jsme volili také tekuté, abychom mohli využít kelímek s absorbérem. Zvolili jsme vodu o dvou teplotách. Vodu s ustálenou venkovní teplotou 4 °C/277,15 K a horkou vodu z rychlovarné konvice, která při přenosu k anténám zchladla na 66 °C/339,15 K.

Podle doporučení jsme využili kelímek z EPS izolačního materiálu, který jsme naplnili absorbérem poskytnutým firmou Telemeter Electronics (TE) s označením EPP 12 (tabulka č.4). Kelímek byl naplněn absorbérem rozstříhaným na malé kousky.

Tabulka 4: Tabulka vlastností (útlumu) pyramidového absorbéru [2]

Označení	Typ	Plošné rozměry [cm]	Výška [cm]	Útlum v závislosti na frekvenci [dB]									
				100 MHz	200 MHz	300 MHz	500 MHz	1 GHz	3 GHz	5 GHz	10 GHz	18 GHz	50 GHz
29480	EPP 51	50 x 50	5	-	-	-	-	-	15	35	40	50	50
29481	EPP 12	50 x 50	10	-	-	-	-	15	30	45	50	50	50



Obrázek 7: EPS kelímek naplněný absorbérem a použitý absorbér EPP 12

Dále bylo nutné vymyslet, jak zabránit ostatním zdrojům šumové teploty, aby se dostaly do zářiče antény. Pro tento účel jsme využili desky vyrobené z absorpčního materiálu poskytnuté také firmou TE s označením EPF 11 (tabulka č.5). Tato ohebná absorpční deska vytvoří obal, který se nasadí přímo na zářič antény. V tomto obalu bude vložen kelímek s kalibrační látkou.

Tabulka 5: Tabulka vlastností (útlumu) plochého absorbéru [2]

Označení	Typ	Plošné rozměry [cm]	Výška [cm]	Útlum v závislosti na frekvenci [dB]									
				100 MHz	200 MHz	300 MHz	500 MHz	1 GHz	3 GHz	5 GHz	10 GHz	18 GHz	50 GHz
29487	EPF 11	50 x 50	1	-	-	-	-	-	10	25	35	40	40
29498	EPF 51	50 x 50	5	-	-	-	-	10	25	30	40	50	50
29499	EPF 12	50 x 50	10	-	-	-	8	-	15	30	45	50	50

Takto navržené kalibrační těleso obepíná zářič téměř dokonale a je tak minimalizováno zkreslení kalibrace jiným zdrojem šumové teploty. Měření je ovlivněno jen ziskem, který nám poskytne parabolická anténa. Tento zisk byl dorovnán programově za pomoci analýzy měřených hodnot ve slunečné a deštivé dny.



Obrázek 8: Sestrojené kalibrační těleso

5 MĚŘENÍ RADIOMETRU V PÁSMU 11 GHz

Měření radiometrem v tomto frekvenčním pásmu nebylo nijak cílené. Radiometr je vlastnictvím ÚFA a byl poskytnut k měření. Vzhledem k rozměrům a provedení jsme rozhodli, že i přes jeho ne úplně ideální vlastnosti a frekvenční pásmo bude využit. Dále bude radiometr nazýván jako „radiometr 11 GHz.“

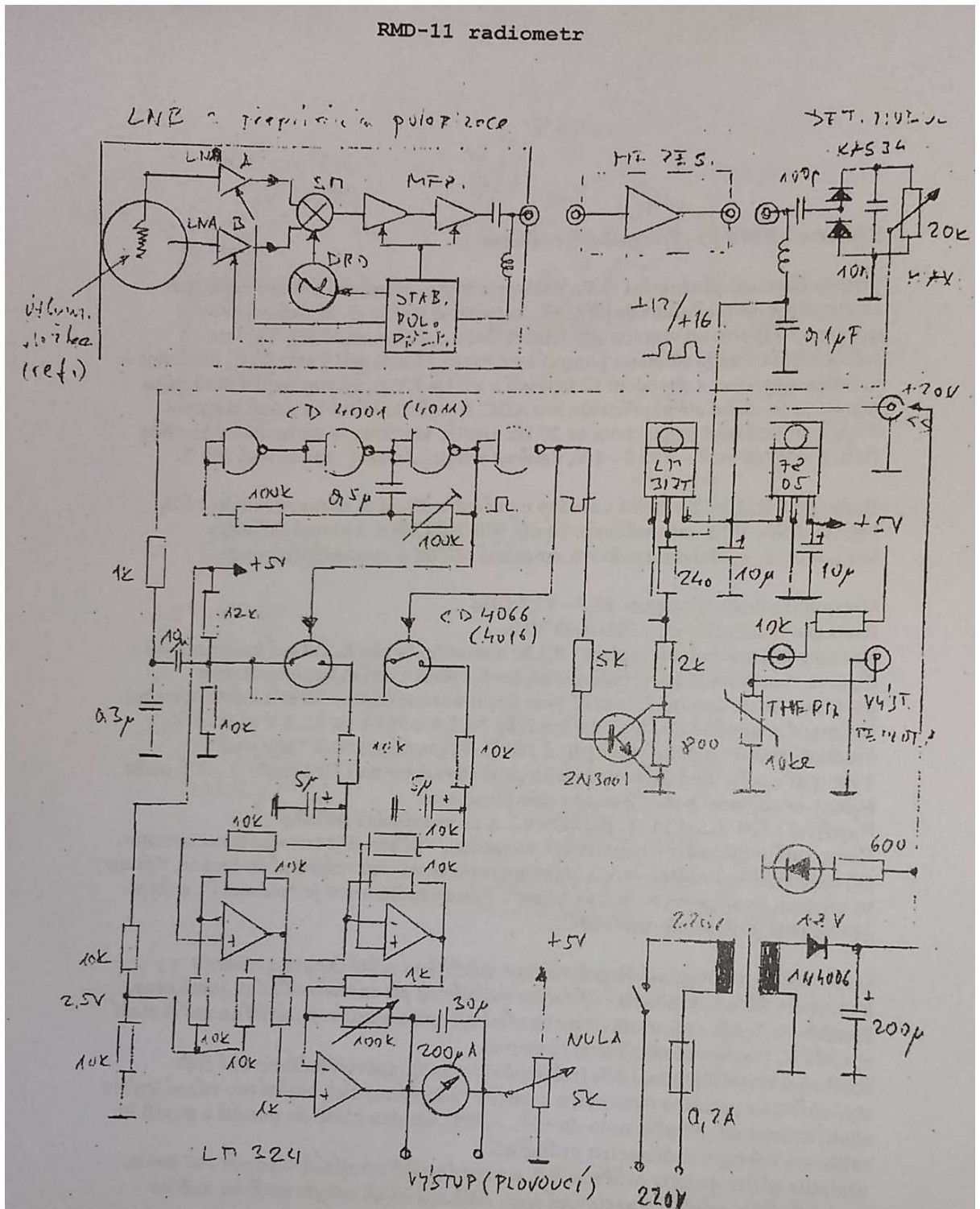


Obrázek 9: Radiometr 11GHz

5.1 Parametry radiometru 11 GHz

Jedná se o modulační radiometr typu „Dicke“ s přepínáním anténa-referenční elektrickým přepínáním vstupu LNB. Referenční vložka je Malarová fólie pokovená odporovou vrstvou, útlum asi 30 dB. Teplota vložky je snímána pomocí termistoru. Přepínací kmitočet je nastaven na 27 Hz. Stejnoseměrný výstup je nastavitelný knoflíky „NULA“ a „MAX“ na 0-1 V a 0-4 V, úměrné vstupní šumové teplotě 0 až 300 K. Kmitočet oscilátoru umístěného v LNB je 9,75 GHz. Vstupní frekvenční rozsah tohoto radiometru je 10,7 – 11,7 GHz (odtud vyplývá naše označení „radiometr 11 GHz“). Dále je mezi anténu a radiometr vložen mezifrekvenční zesilovač 20 dB, 900-2100 MHz. Radiometr je napájen za sítě 230 V, 50 Hz. Zisk radiometru je nestálý, mění se s teplotou. Je potřeba radiometr umístit do teplotně stabilizovaného boxu nebo na místo s minimálně se měnící teplotou, aby nedocházelo ke změnám zisku, tudíž ke změnám citlivosti zařízení. [9], [26]

Radiometr obsahuje vlastní ukazatel pro zobrazení měřené hodnoty šumové teploty. Tento ukazatel je pouze orientační a nelze jeho výsledky brát jako směrodatné. Pro získání přesných výstupních hodnot je na radiometru umístěn konektor typu „Jack“. Pomocí tohoto konektoru lze získat výstupní napětí a přenést ho do záznamového zařízení. [9], [26]



Obrázek 10: Vnitřní schéma radiometru 11 GHz [26]

5.2 Testování radiometru 11 GHz

Testování tohoto radiometru probíhalo s malou parabolickou anténou o průměru 32 cm. Testování bylo nutné provést, abychom ověřili, zda je tento radiometr schopen měřit a reagovat na změny šumové teploty atmosféry.

5.2.1 Testování použitelnosti

První test byl prováděn v létě za slunečného dne s občasnou slabou (čistě bílou) oblačností. Tato oblačnost nezpůsobovala žádné změny ukazatele radiometru. Namíření zařízení na ohřátou zeď budovy naopak způsobilo maximální výchylku (oproti modré obloze). Dalším poznatkem bylo, že i při nejopatrnějším a nejpomalejším přibližování svazku ke koruně stromu došlo v jednu chvíli ke skokové změně ukazatele z minima na maximum. Není tedy zcela jasné, jestli se jedná o špatně nastavenou citlivost nebo špatně řešený způsob zobrazení s nepřihlédnutím k nastavenému napěťovému rozsahu.

O radiometru jsme v této chvíli mohli říct, že reaguje na změnu šumové teploty, jen je potřeba zajistit přesné zobrazení měřené hodnoty.

5.2.2 Testování s datalogerem

Druhé testování probíhalo opět s již zmíněnou parabolickou anténou. Aby bylo možné lépe sledovat změny měřené šumové teploty cíle, byl výstup radiometru opatřen zařízením pro zobrazení a záznam napětí (dataloger). Dataloger je jednoduché programovatelné zařízení, na kterém je možné při aktuálním nastavení zobrazovat a ukládat hodnoty napětí ze dvou kanálů. Zařízení provádí zápis zobrazovaných dat rozdělených do 24 souborů po jednotlivých hodinách záznamu za den. Frekvence zápisu do souboru na micro SD kartu je pětkrát za minutu. Data jsou zapsána ve formátu čas v UTC, kanál 1 (radiometr 39 GHz) ve voltech a kanál 2 (radiometr 11 GHz) ve voltech.



Obrázek 11: Radiometr 11 GHz s datalogerem

Při tomto měření byla „nula“ nastavena na 0,01 V při čisté obloze. Při takto nastavené citlivosti se neprojevovala změna v napětí na datalogeru při snaze namířit radiometr na Slunce. Obloha byla jasná, ve směru pohledu radiometru (Jih) se na obzoru nacházely panelové domy. Z poza těchto budov se směrem k naší pozici blížila velká tmavá oblačnost. Pokus měření spočíval tedy v namíření paraboly kolmo vzhůru a postupný pokles osy antény radiometru až na horizont. Trasa radiometru tedy představovala postupně čistou oblohu, Slunce, čistou oblohu, vrcholky oblačnosti, oblačnost a panelovou zástavbu. Vzhledem k oblačnosti, která nedosahovala na horizontu moc vysoko nad panelové domy vzdálené 700 metrů od místa měření, bylo celkem těžké udržet parabolickou anténu radiometru tak, aby zasáhla jen oblačnost, a ne tyto panelové domy. Zasažením budov docházelo totiž ke značnému snížení hodnoty zobrazené datalogerem.

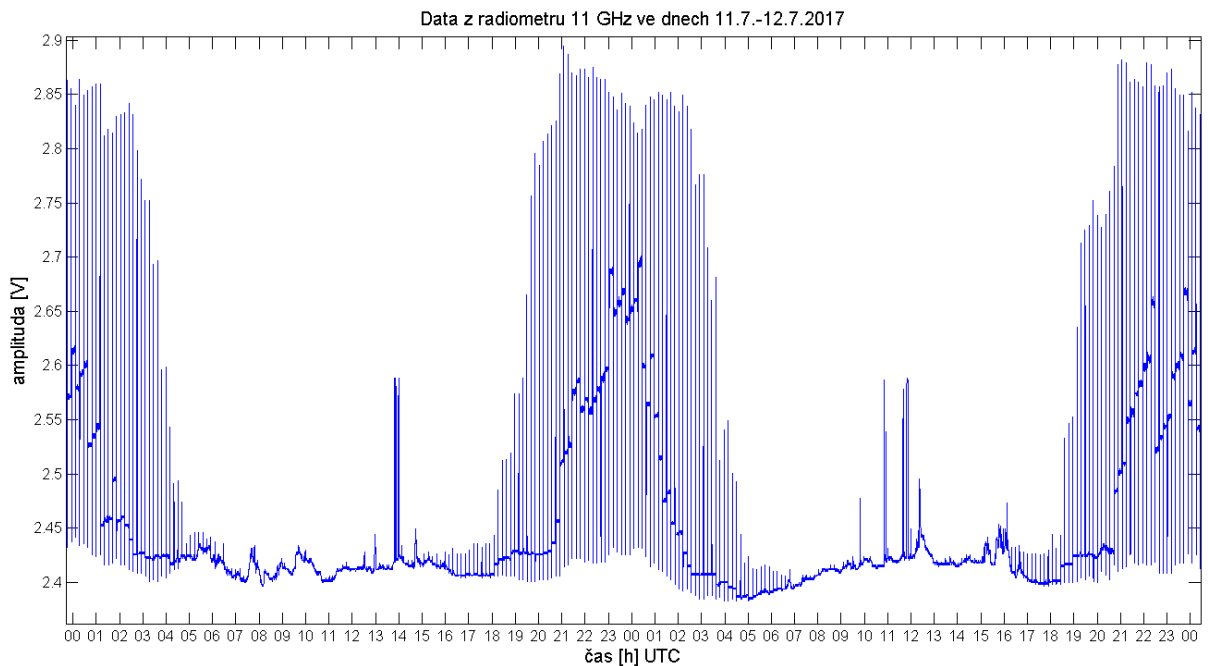
Tabulka 6: Pokusné měření radiometrem 11 GHz

měření radiometrem s připojeným datalogerem	
čistá obloha [V]	0,010
oblačnost [V]	0,075 - 0,090
panelová zástavba [V]	0,010 - 0,012
opětovné měření	
čistá obloha [V]	0,007
oblačnost [V]	0,130
panelová zástavba [V]	0,016

Z těchto výsledků již můžeme říci, že radiometr dokáže výrazně napěťově odlišit oblačnost a čistou oblohu. Je zapotřebí nastavit mnohem větší citlivost, aby bylo možné dále sledovat změny v typech oblačnosti a v množství vodních par a kapalné vody v atmosféře.

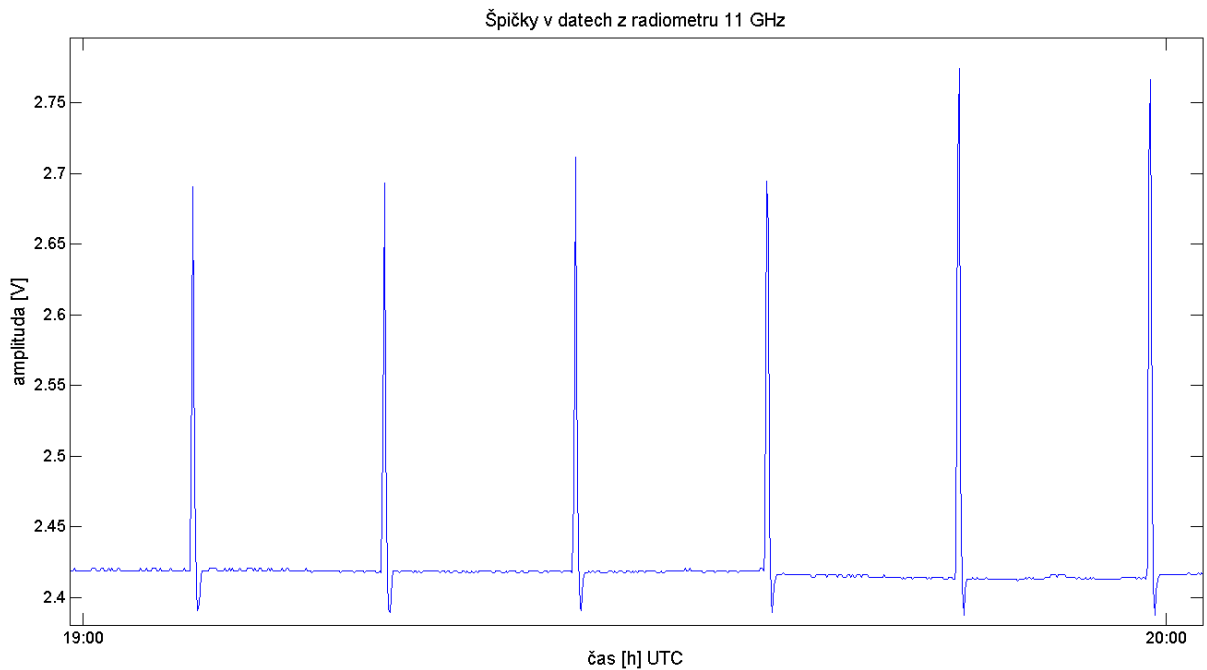
5.2.3 Testování a problémy ve finálním umístění

Při analýze měřených dat z radiometru jsme narazili na několik problémů. Problémy se týkají frekvenčního pásma pro měření. V použitém pásmu 10,7 – 11,7 GHz se na stanovišti, kde je radiometr umístěn (areál ÚFA, Praha 4 Spořilov) vyskytují rušivé vlivy, které zkreslují měření. Díky postranním lalokům i úhlu, pod kterým radiometr sleduje atmosféru, mohou do měřeného signálu přispívat družice, signál satelitní televize, bezdrátová pojítka a mnoho dalších zdrojů radiového smogu v okolí.



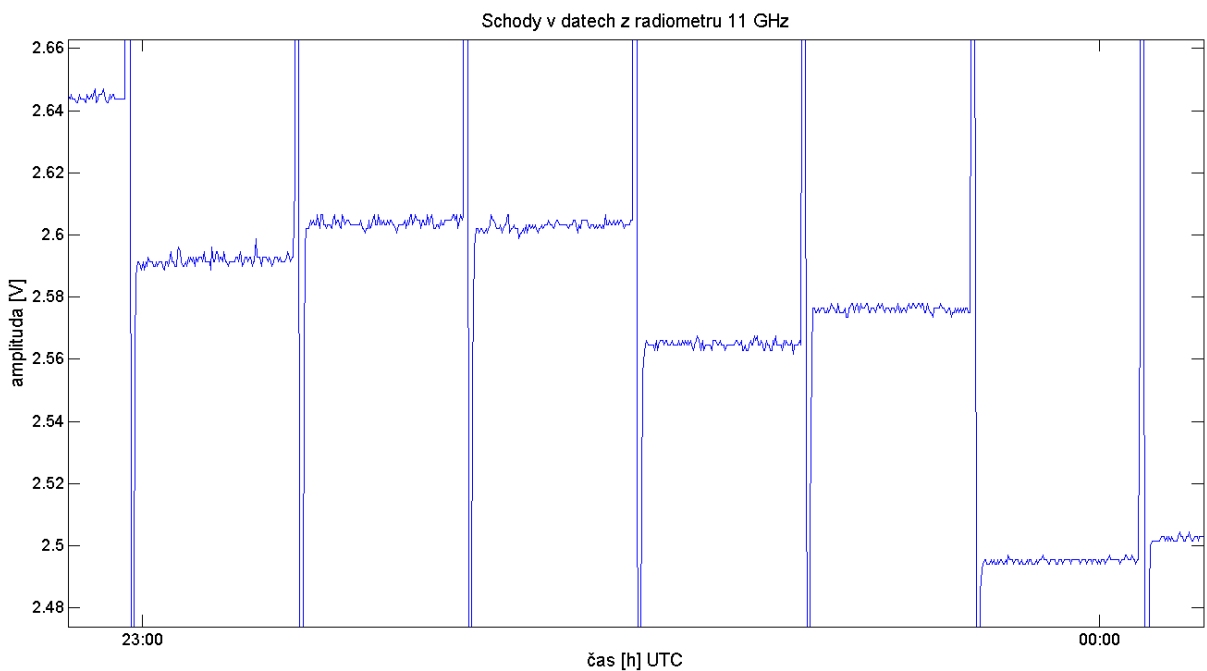
Obrázek 12: Záznam z měření radiometrem 11 GHz ve dnech 11.7.-12.7.2017

Na obrázku č. 12 můžeme vidět signál, který je zaznamenán datalogerem. Můžeme zde pozorovat několik částí, které je nutné ze signálu odstranit nebo upravit. Bez těchto úprav jsou data nepoužitelná. Obrázek č. 13 pak poskytuje detail na část signálu nazvanou „špičky.“ Jsou to jakési vrcholky a propady o různé velikosti vznikající při pohybu anténní parabolou přijímače Alphasatu. Tento vertikální pohyb (změna úhlu) anténa provádí v nastavených časových intervalech kvůli směřování (hledání maxima signálu z družice, typicky nastavujeme 10 minut). Důvodem vzniku špiček je zdroj rušivého signálu ve frekvenčním pásmu radiometru (10,7 - 11,7 GHz). Při směřování přijímací antény Alphasatu dochází k pohybu vyzářovacího svazku antény radiometru (zářič radiometru je umístěn těsně pod zářičem antény pro příjem signálu Alphasatu v pásmu 19 GHz) v blízkosti nebo přímo přes zdroj rušení. Tímto pohybem dochází ke změně velikosti příspěvku tímto zdrojem. Radiometr v tento časový úsek tedy měří šumovou teplotu atmosféry sečtenou s měnící se šumovou teplotou zdroje rušivého signálu.



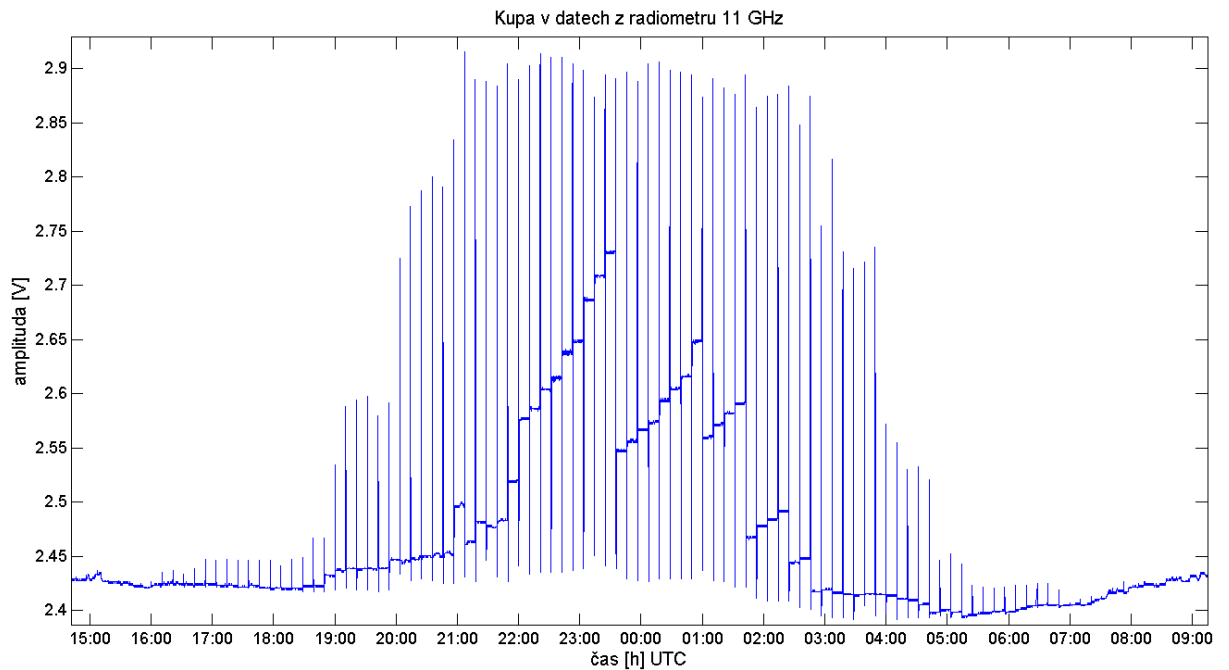
Obrázek 13: Detail „špiček" na radiometrickém měření 11 GHz

Pokud nastane situace, že přijímač Alphasatu provede směrování a po směrování zaujme novou vertikální polohu (jiný úhel), změní se tím i úhel pod kterým je namířen radiometr. Při této změně úhlu často dochází ke změně úrovně příspěvku rušivým signálem. Změna příspěvku rušivého signálu pak vyvolá změnu úrovně měřeného signálu radiometru. Rozdíl v napěťových úrovních před a po směrování nazýváme „schod“ v datech (obrázek č. 14).



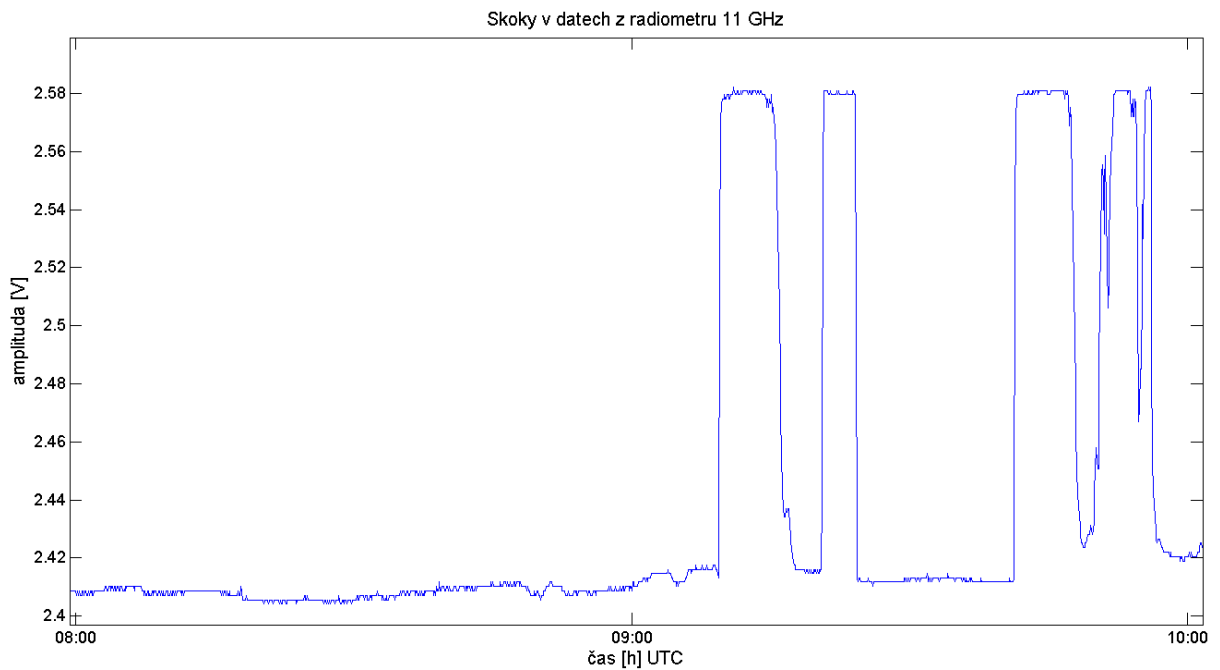
Obrázek 14: Detail „schodů" na radiometrickém měření 11 GHz

V průběhu dne pak jednotlivé schody v datech vytvoří jakési „kupy,“ na kterých můžeme jasně vidět, jak se v průběhu dne vyvíjí příspěvek šumové teploty rušivým zdrojem signálu způsobený pohybem paraboly radiometru.



Obrázek 15: Detail „kupy“ na radiometrickém měření 11 GHz

Dalším problémem u tohoto radiometru jsou občasné, nepravidelné skoky v měřených datech (obrázek č. 16). Zkoušeli jsme prověřit jednotlivé spoje i samotnou kabeláž používanou pro přenos signálu. Ty se jeví být v pořádku. Tyto skoky tedy s největší pravděpodobností vznikají přímo v radiometru. Je možné, že dochází k přehřívání nebo špatné funkci některé z jeho součástí a tím ke skokovým změnám v zisku celého zařízení.



Obrázek 16: Detail „skoků“ na radiometrickém měření 11 GHz

Pro využití dat z tohoto radiometru je nutné všechny tyto problémy odstranit.

5.3 Finální umístění radiometru 11 GHz

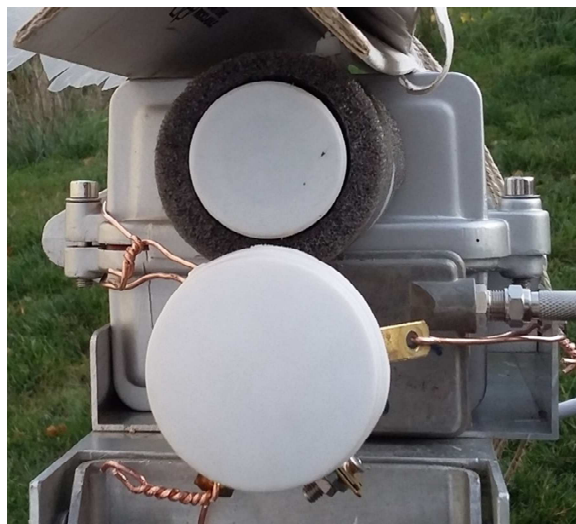
Umístění radiometru jako celku i se svou parabolou o průměru 32 cm bylo zamýšleno poblíž stávajících parabolických antén přijímače Alphasatu. Jednou z variant bylo umístění na travnatou plochu u antén Alphasatu. To by vyžadovalo držák, který by odolal poryvům větru a zároveň střížku či box, ve kterém by byl radiometr umístěn. Zároveň by bylo nutné zajistit stabilizaci teploty za pomoci vyhřívání. Toto umístění by bylo velmi náročné.

Druhá varianta zahrnovala umístění celého zařízení do dřevěné boudy stojící nedaleko plánovanému umístění. Zde by odpadla nutnost krytí zařízení před deštěm, kterou by nám poskytla bouda, ale nikoli nutnost teplotní stabilizace. Jelikož není bouda nijak vyhřívána, bylo by nutné zařízení umístit do boxu s vyhříváním.

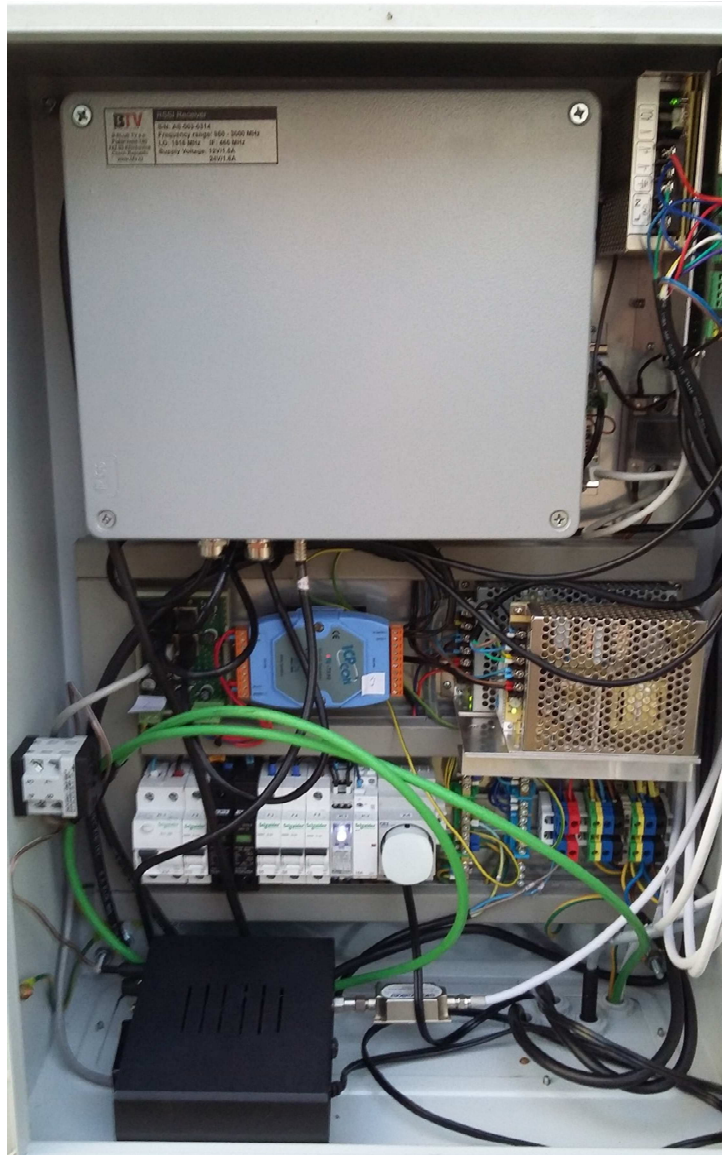
Pro finální umístění jsme se rozhodli využít zařízení antény Alphasatu 19 GHz. Provedli jsme demontáž zářiče radiometru od paraboly a samotný zářič jsme umístili pod zářič přijímače Alphasatu 19GHz. Radiometr tedy využívá parabolické antény tohoto zařízení. Bohužel zde není docíleno přesného měření v cestě komunikace přijímače Alphasatu s družicí, ale odchylka od této komunikační cesty by neměla být příliš vysoká.



Obrázek 17: Umístění zářiče radiometru 11 GHz pod zářič Alphasatu 19 GHz



Obrázek 18: Umístění zářiče radiometru 11 GHz pod zářič Alphasatu 19 GHz

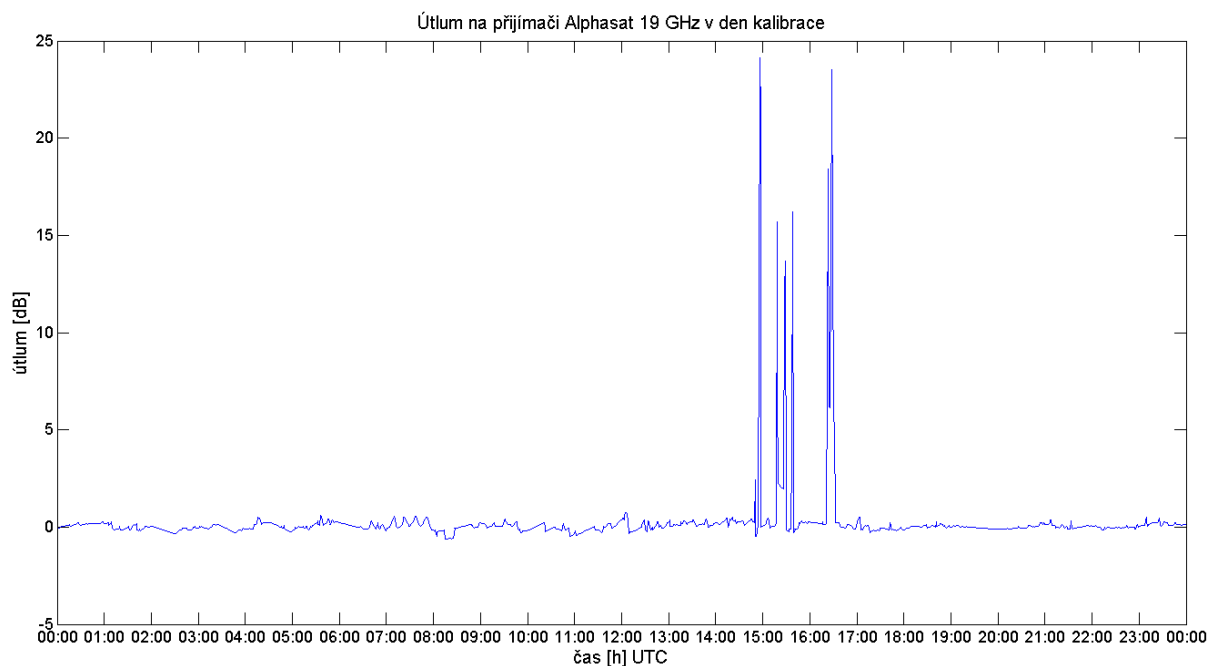


Obrázek 19: Umístění radiometru 11GHz v boxu přijímače Alphasatu 19 GHz

Na obrázku č. 19 můžeme v dolní části vidět radiometr 11 GHz v černém obalu. Výstup ze zářiče tohoto radiometru je přiveden pomocí bílého koaxiálního kabelu do předzesilovače a následně do samotného radiometru. Napěťový výstup z radiometru je pomocí zeleného koaxiálního kabelu veden pod zemí do nedaleké garáže, kde je připojen na zařízení pro uložení dat (dataloger).

5.4 Kalibrace radiometru 11 GHz

Kalibrace tohoto radiometru byla prováděna za pomoci kalibračního tělesa popsaného v kapitole č. 4.1. Kalibrační těleso obepínalo celý zářič radiometru bez jakéhokoliv problému. Vzhledem k umístění zářiče radiometru pod zářičem Alphasatu 19 GHz došlo při přiložení kalibračního tělesa také k částečnému překrytí (zastínění) zářiče Alphasatu. Vliv tohoto zastínění na signál Alphasatu můžeme vidět na obrázku č. 20.

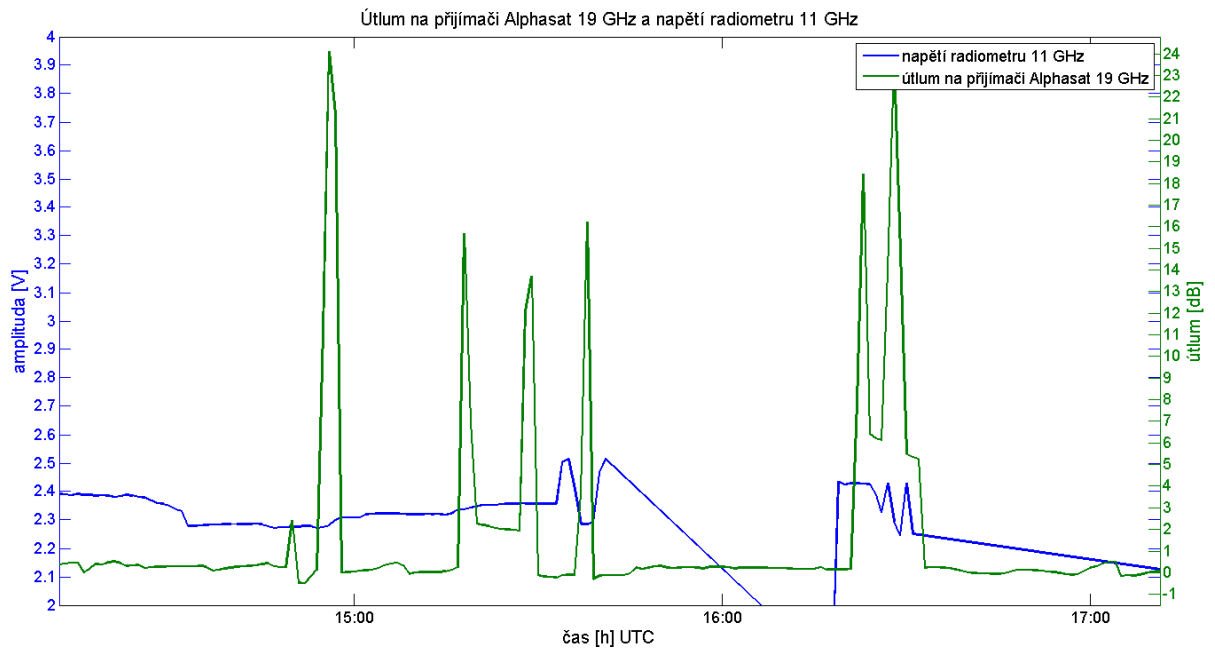


Obrázek 20: Útlum z přijímače Alphasat 19 GHz v den kalibrace radiometru 11 GHz

Jak můžeme vidět, vložení kalibračního tělesa způsobilo značný útlum v signálu Alphasatu. Pokud porovnáme dosažený útlum signálu družice Alphasat způsobený vložení kalibračního tělesa s vlastnostmi použitých absorpčních materiálů, zjistíme, že útlum nedosahoval ideálních 50 dB podle výrobce. Vzhledem k nedokonalému zakrytému zářiči však můžeme předpokládat, že se signál mohl do zářiče Alphasatu dostat. Zářič radiometru byl zakryt dokonale, tudíž předpokládáme kvalitnější odstínění vstupu radiometru s větším útlumem. Zároveň síla měřeného signálu, který nás zajímá, je mnohem menší než síla signálu z družice.

Při pozdější analýze dat z průběhu kalibračního měření bohužel nedokážeme určit data potřebná pro kalibraci. V době provádění kalibrace totiž data neobsahují žádnou reakci na vložení kalibračního tělesa. Dále data obsahují nepochopitelné skoky. Tyto skoky mohou být problémem

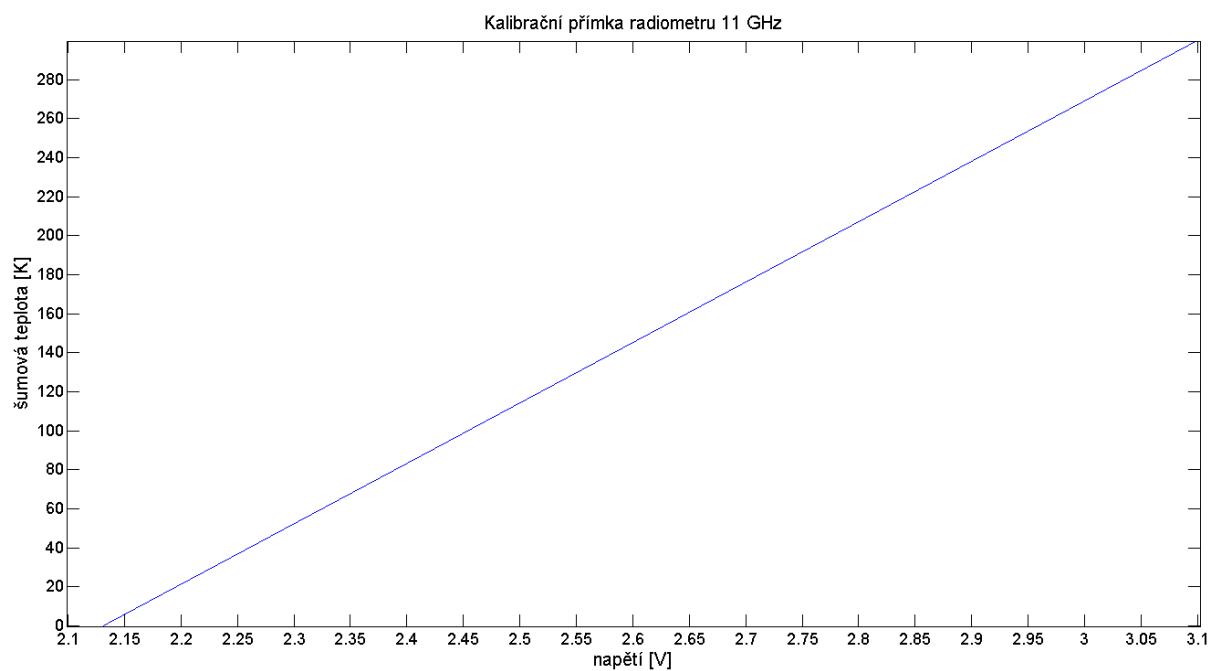
zmíněným v kapitole 5.2.3. (odpovídající obrázek č. 16). Další možností, která by mohla zapříčinit takovéto chování, může být skoková změna vstupního měřeného signálu způsobená vložením kalibračního tělesa. Reakce systému radiometru na takovouto skokovou změnu může být chaotická a radiometr se s ní nedokáže během krátké doby vypořádat.



Obrázek 21: Radiometrické měření 11 GHz a útlum z Alphasat 19 GHz při kalibraci

Kalibraci tedy bylo nutné provést jiným způsobem. Pro stanovení hodnoty napětí odpovídající šumové teplotě čisté oblohy jsme zvolili jinou hodnotu napětí zjištěnou téhož dne. Hodnotu jsme vybrali z oblasti, kde data neobsahovala anomálie (špičky, kupy, skoky apod.). Vzhledem k chladnému počasí a čisté jasné obloze mohla být této hodnotě napětí přiřazena odpovídající hodnota šumové teploty. Druhý kalibrační bod jsme bohužel z těchto dat nemohli získat. Z vlastnosti tohoto radiometru, že je schopen měřit šumovou teplotu pouze do 300 K, jsme se rozhodli pokusit se odvodit hodnotu napětí, která této hodnotě bude odpovídat. Analýzou všech změřených dat jsme stanovili naměřené maximum napětí. Toto maximum bylo naměřeno při směřování přijímače Alphasatu, jedná se tedy o špičku v datech, kdy je osa antény radiometru nasměřována do zdroje rušení s maximální silou. Výslednou hodnotu napětí tedy můžeme považovat za hodnotu blízkou napětí odpovídající šumové teplotě 300 K.

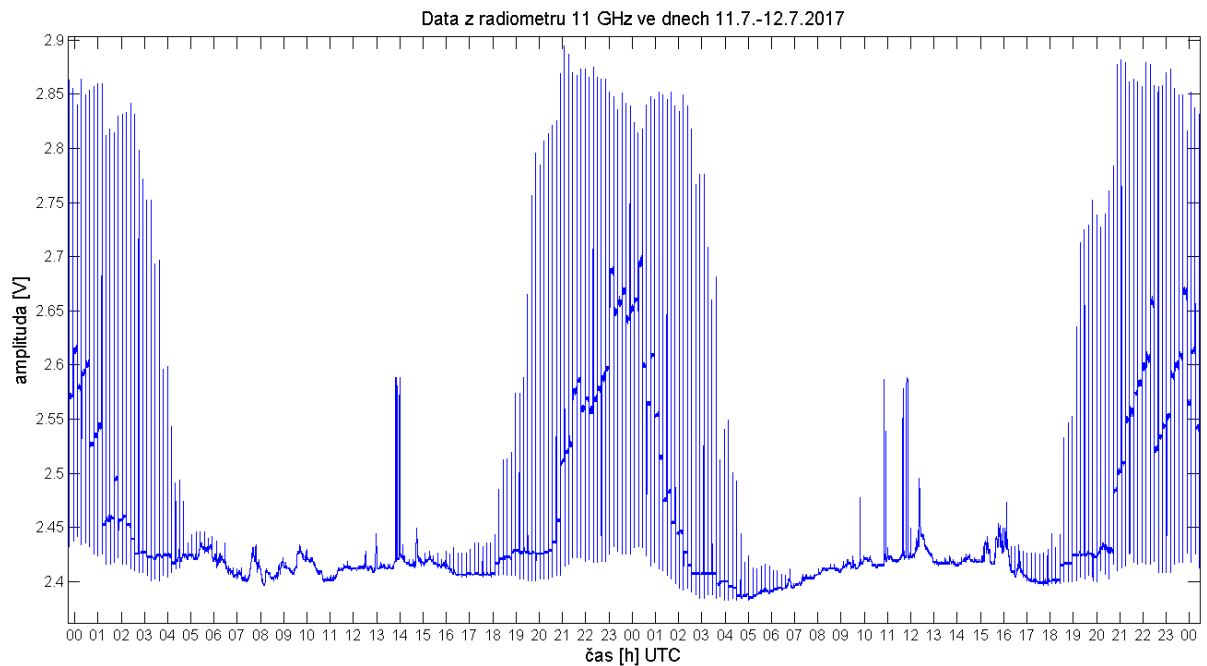
Tyto dva stanovené kalibrační body jsme proložili kalibrační přímkou. Rovnice kalibrační přímky pak slouží jako nástroj pro přepočítání měřeného napětí na šumovou teplotu atmosféry.



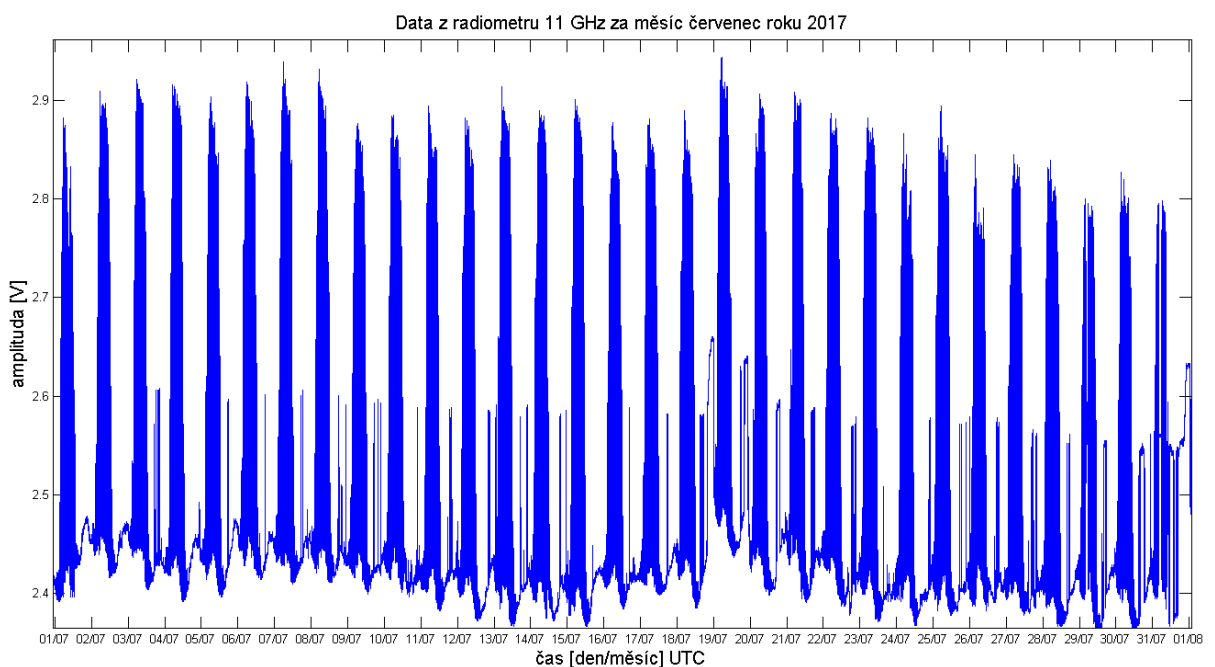
Obrázek 22: Kalibrační křivka pro radiometr 11 GHz

5.5 Funkce radiometru 11 GHz

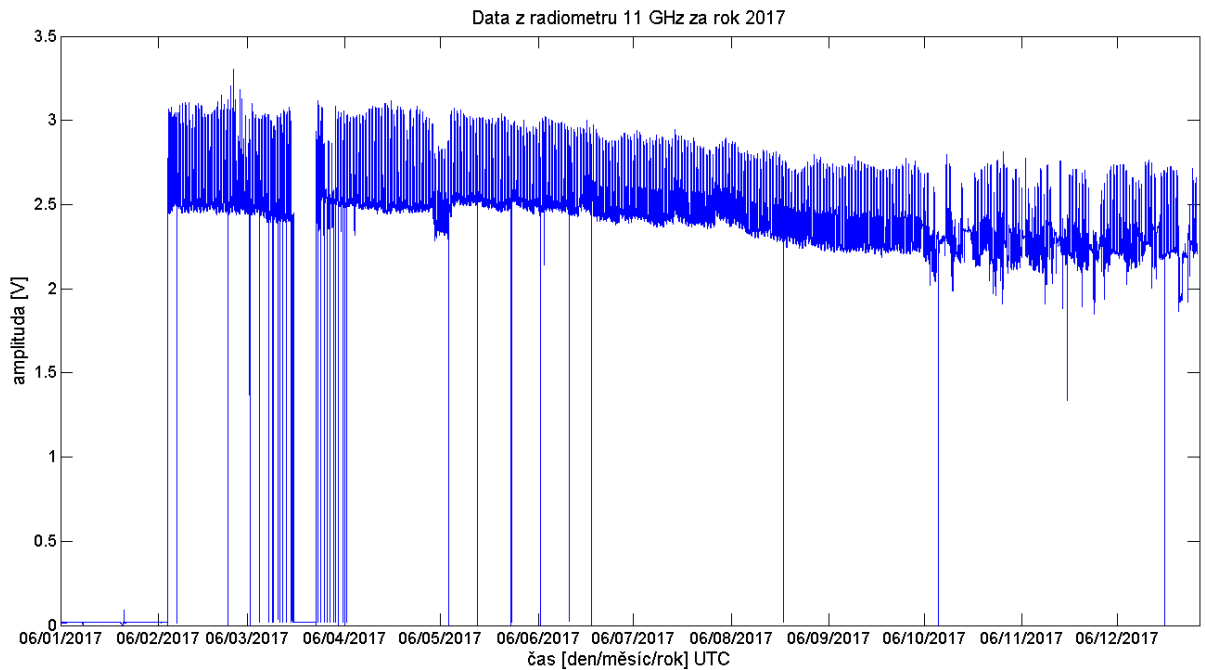
Radiometrická data disponují již zmíněnými problémy, které je potřeba vyřešit. Bez odstranění těchto problémů jsou zaznamenaná data nepoužitelná pro další zpracování.



Obrázek 23: Radiometrická data 11 GHz ve dnech 11.7.-12.7.2017



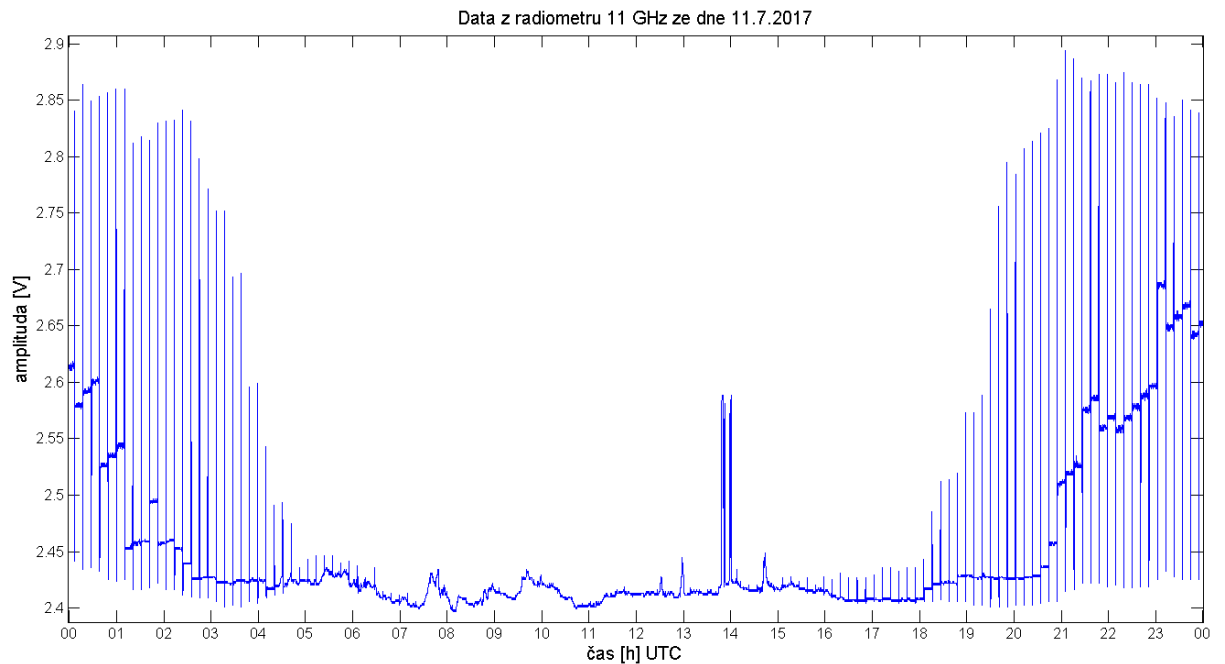
Obrázek 24: Radiometrická data z radiometru 11 GHz za měsíc červenec 2017



Obrázek 25: Radiometrická data z radiometru 11 GHz za rok 2017

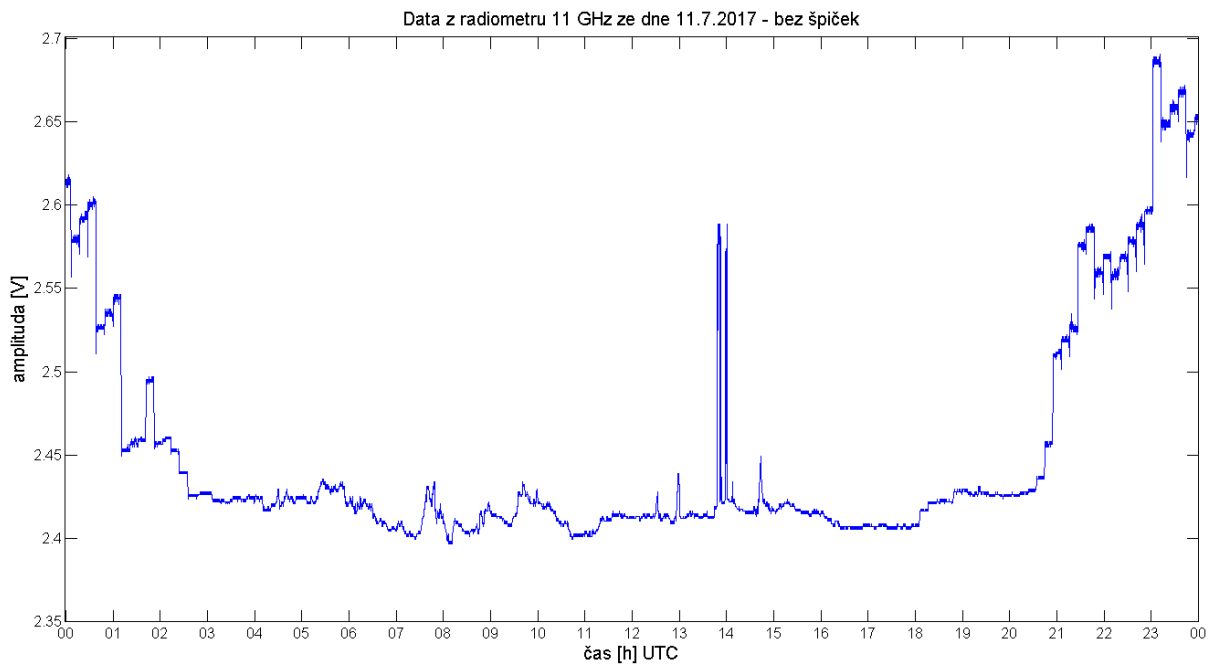
V obrázku č. 24 můžeme vidět velmi výrazné kupy vzniklé příspěvkem od zdroje rušení, ale také značné zvlnění. Toto zvlnění dosahuje vždy maxima přes den a minima v noci. Bude tedy způsobeno množstvím energie, kterou atmosféra vyzáří. V nočních hodinách, kdy Slunce nedodává naší atmosféře takové množství energie, která by byla dále v určité míře vyzářena, radiometr měří pouze vlastní šum atmosféry. Díky postupné změně příspěvku tedy dochází ke zvlnění v datech. Roční data (obrázek č. 25) obsahují řadu propadů napětí na nulovou hodnotu. Jedná se převážně o vypínání datalogeru.

5.5.1 Odstranění problémů měření



Obrázek 26: Radiometrická data 11 GHz

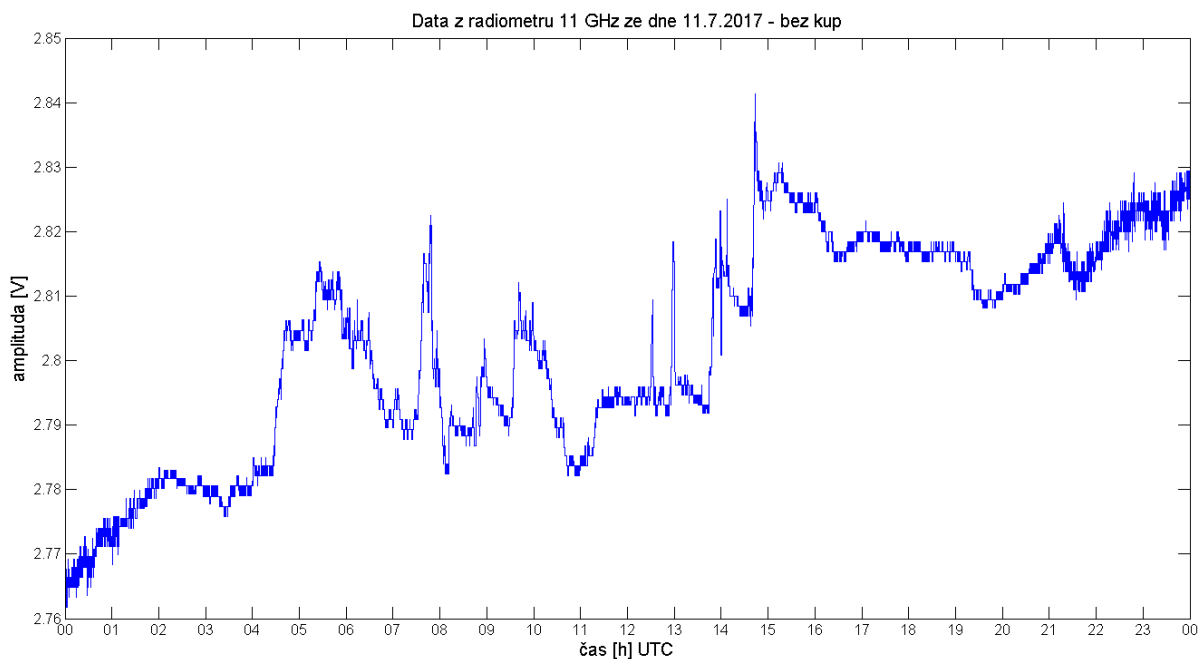
Prvním zmíněným problémem jsou napěťové špičky v záznamu. Jednou z možností, jak vyřešit problém špiček, bylo odstranit všechna data, kdy přijímač Alphasatu směřuje bez ohledu na přítomnost nebo nepřítomnost špiček. Tím by ale došlo k odstranění i měření, kdy směrování neovlivnilo radiometrická data. Vzhledem k množství problémů, které znehodnocují data, je nutné zachovat co nejvíce neponičených dat. Vyvinuli jsme tedy program, který detekuje většinu špiček a zajistí jejich odstranění z dat.



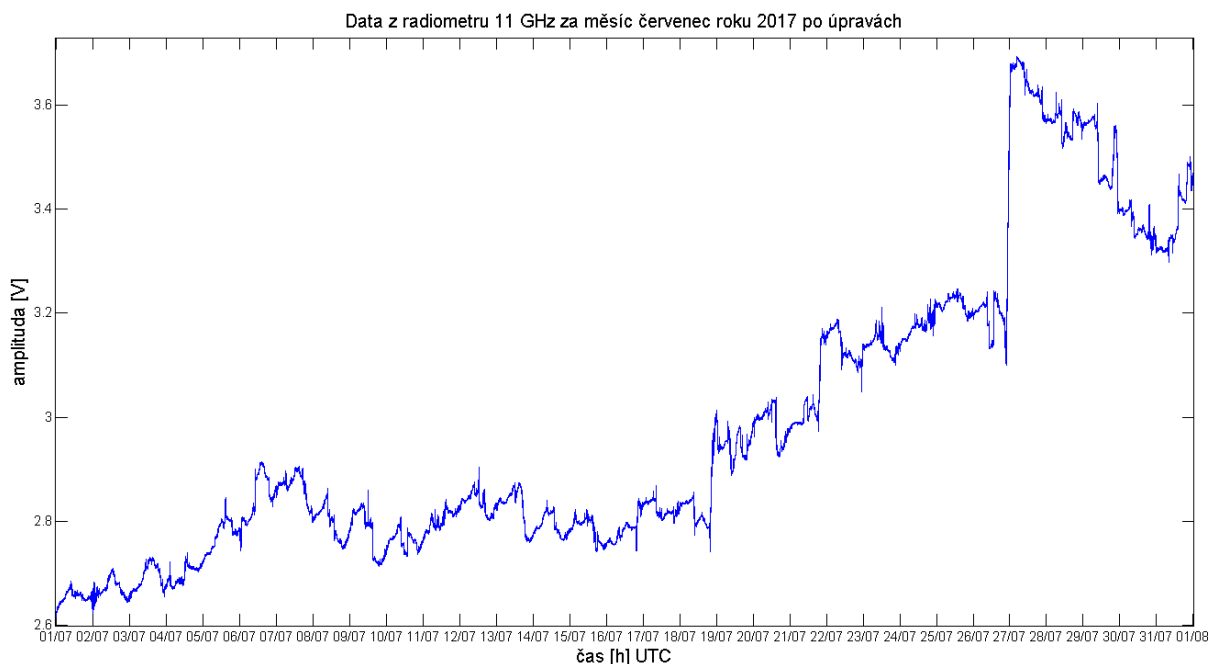
Obrázek 27: Radiometrická data 11 GHz po odstranění špiček

Po odstranění špiček získáme zdánlivě použitelný signál. Dále je nutné odstranit úrovně skoky, které tvoří „kupu“ a zároveň další úrovně skoky vzniklé v signálu. Je tedy nutné provést jakési narovnání dat.

Pokus o rovnání dat každého dne zvlášť byl sice úspěšný, ale výsledná úroveň signálu byla pro každý den odlišná. Rovnání bylo tedy předěláno tak, aby data byla rovnána od výchozí pozice. Výchozí pozice byla zvolena jako pozice v datech, která byla využita zároveň i jako dolní kalibrační bod. Od této pozice pak byla všechna data postupně procházena směrem zpět a rovnána na správnou napěťovou hladinu. Bohužel ani tento pokus o narovnání nebyl úspěšný a data vykazovala rostoucí trend.



Obrázek 28: Radiometrická data 11 GHz po odstranění kup

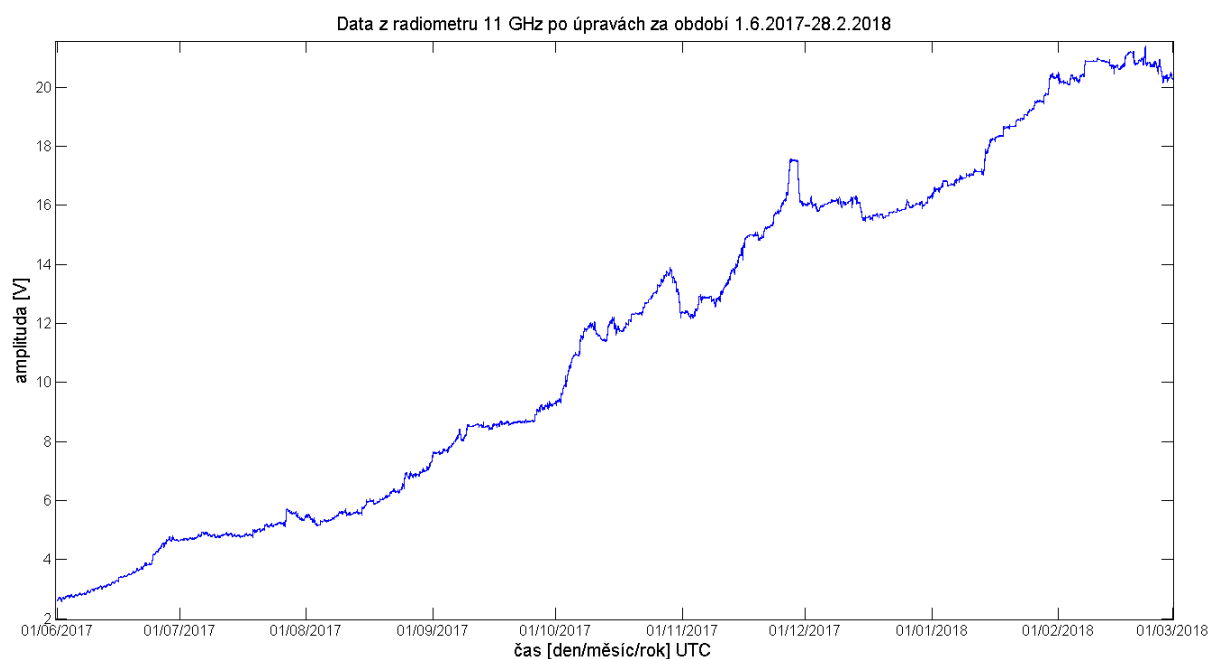


Obrázek 29: Radiometrická data 11 GHz za měsíc červenec roku 2017 po úpravách

Data zobrazená na obrázcích č. 28 a č. 29 nejsou zbavena nežádoucích napěťových skoků. Bohužel ani odstranění těchto skoků nepomůže ke srovnání rostoucího trendu napětí výstupních dat. Pouze při zvolení velmi nízké úrovně detekce napěťového skoku, docílíme výraznějšího narovnání. Nevýhodou takto nízko zvolené detekční úrovně je rovnání dat v místech kde pouze

radiometr reagoval na větší změnu šumové teploty. Narovnání i v těchto místech způsobí znehodnocování dat.

Je zde pouze jediná možnost, jak využít data alespoň částečně. Pokud by se přikročilo k razantnímu kroku odstranění dat v místě kupy, špiček i skoků, zůstala by přibližně jedna čtvrtina až jedna třetina dat z každého dne. Tato část dat by byla rušivým signálem ovlivněna minimálně. Za předpokladu, že v časech zbylých dat je příspěvek rušivého signálu stejný, můžeme tato data využít a pomocí kalibrace stanovit šumovou teplotu atmosféry. Takovýto pokus o záchranu dat by byl v rámci této diplomové práce bezúčelný vzhledem k míněnému využití pro celoroční sledování stavu atmosféry a korekci počítaného útlumu z přijatých dat družice Alphasat.



Obrázek 30: Radiometrická data 11 GHz za období 1.6.2017-28.2.2018 po úpravách

5.5.2 Šumová teplota měřená radiometrem 11 GHz

Díky rostoucímu trendu v napětí radiometru nemůžeme využít žádný přepočít pro získání šumové teploty atmosféry. I přes nesčetné pokusy se nám nepodařilo data zpracovat do takové podoby, aby byla použitelná pro převod na šumovou teplotu.

V pokusech o narovnání se data jevila v pohledu pouze na jeden den použitelně. Jejich nereálnost však vyšla najevo při pohledu na dlouhodobější záznam. Z takto nereálných dat jsme se již nepokoušeli spočítat šumovou teplotu, protože při aplikaci kalibrační křivky by vyšly naprosto nesmyslné hodnoty šumové teploty.

6 MĚŘENÍ RADIOMETREM V PÁSMU 39 GHz

Jedná se o radiometr vyrobený na zakázku firmou B PLUS TV a.s. pro UPCE (Univerzita Pardubice). Výroba radiometru byla zadána přímo pro účely této diplomové práce. Radiometr je uzpůsoben pro přímou montáž do přijímače družice Alphasat 39 GHz. Pokud radiometr opatříme jinou anténou, bude možné ho využít i jako samostatnou měřicí jednotku v pásmu 1,7 GHz, popřípadě na jiném kmitočtovém pásmu bude-li předřazen kmitočtový konvertor.

Jedná se o nejlepší zařízení typu radiometr, které bylo od UPCE a ÚFA poskytnuto pro účely této práce. I když mnou nebylo možné ovlivnit zadání parametrů pro jeho výrobu, jedná se o velmi funkční zařízení, které je ideální k požití pro řešení problematiky této diplomové práce. Zařízení bude dále nazýváno jako „radiometr 39 GHz“.

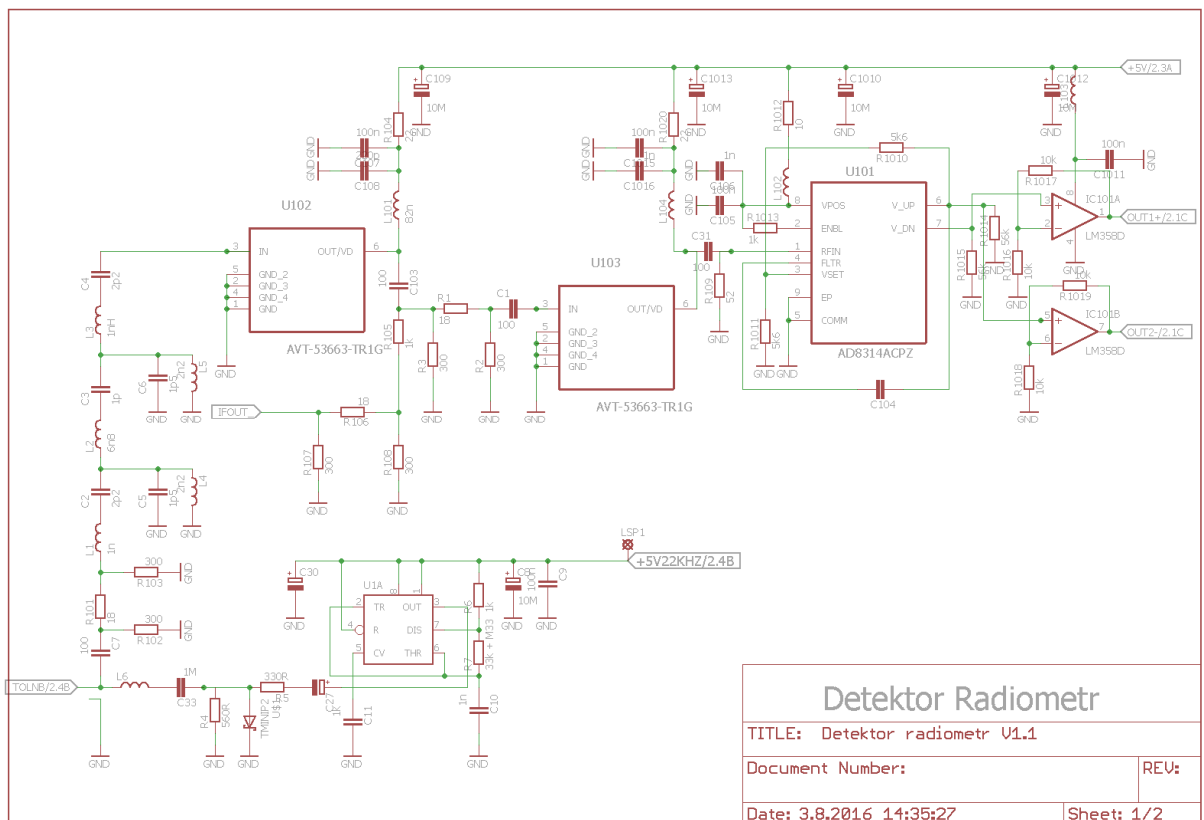


Obrázek 31: Radiometr 39 GHz [19]

6.1 Parametry radiometru 39 GHz

Jedná se o radiometr typu „Total power“ operující v pásmu 1,7 GHz s šířkou pásma 1 GHz. Radiometr využívá dvou zesilovačů AVT-53663-RT1G s celkovým ziskem 30 dB. V radiometru za zesilovačem následuje detektor AD8314ACPZ s frekvenčním rozsahem 100 MHz - 2,7 GHz. Dynamický rozsah detektoru je 45 dB. Celkový dynamický rozsah zařízení je 30 dB. [9], [19]

Radiometr je vybaven digitálním zobrazovačem měřeného signálu. Zobrazovač je naprogramován pro zobrazování v reálném čase s historií o délce 1 minuta. Rozsah ukazatele se automaticky mění v průběhu měření v závislosti na měřené hodnotě šumového výkonu. Dále radiometr disponuje potenciometrem „ZERO“, který slouží k nastavení nulového napětí odpovídající šumové teplotě. Černé přepínače slouží k zapnutí radiometru (nejvíce vlevo), napájení LNB (možnost napájení 0 V, 18 V, 12 V) a zapnutí 22 kHz pro LNB (nejvíce vpravo). Zadní strana radiometru je opatřena několika konektory pro výstup. Pro napěťový výstup jsou zde dva konektory s rozdílným výstupním převodem OUT1 a OUT2. Výstup první využívá převod měřeného šumového výkonu na napětí v poměru 50 mV/dBm a výstup druhý v poměru 100 mV/dBm. [9], [19]



Obrázek 32: Vnitřní schéma zapojení radiometru 39 GHz bez zdroje napájení [9], [19]

6.2 Testování radiometru 39 GHz

První testování radiometru probíhalo jako měření se samostatnou měřicí jednotkou. K radiometru jsme připojili zapůjčený LNB a provedli zkušební měření za slunečního dne. Jednalo se o měření Sluncem ohřáté zdi, která by měla mít šumovou teplotu blízkou 300 K a čisté (modré) oblohy, která by měla mít naopak nízkou šumovou teplotu okolo 77 K.

Tabulka 7: Měření přibližné hodnoty 300 K radiometrem 39 GHz s LNB

Testovací měření se zapůjčeným LNB		
	Radiometr [dBm]	Dataloger [V]
lidské tělo	4,64	0,343
zem, koruna stromu	4,84	0,357

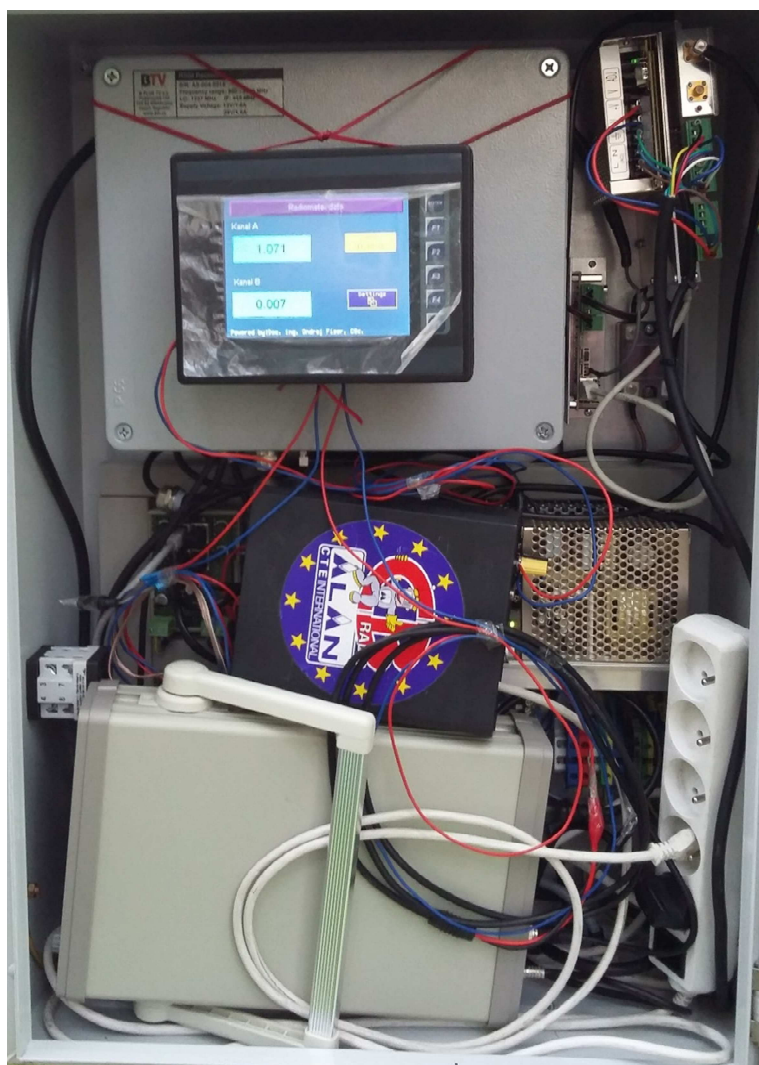
Tabulka 8: Měření radiometrem 39 GHz se zapůjčeným LNB

Měření se zapůjčeným LNB - 5 opakování					
opakování	1.	2.	3.	4.	5.
modrá obloha [dBm]	1,18	1,45	0,16	0,14	0,12
zed' [dBm]	4,55	4,69	4,39	4,26	4,34

Rozdíl v měřených hodnotách je zde dosti velký, ale ne tak velký, jako bylo přislíbeno výrobcem. Výrobce deklaroval rozdíl mezi šumovou teplotou čisté oblohy a ohřáté zdi až 10 dB. Takovouto hodnotu bylo možné údajně naměřit v jejich podmínkách. Při příležitosti opravy radiometru po poruše bylo dále prováděno výrobcem kontrolní měření, které při použití stejného principu ohřáté zdi a čisté oblohy poskytovalo výsledný rozdíl 5 dB.

6.2.1 Testování v zapojení s přijímačem Alphasat 39 GHz

Pro testování s využitím antény Alphasatu bylo nutné do zařízení zapojit rozbočovač signálu. Přesné místo pro umístění radiometru i zařízení potřebné k tomu připojení bylo dodáno výrobcem radiometru. Na rozbočovač signálu bylo dále nutné umístit filtr, který odstraní signál z družice Alphasat. Dále již bylo možné propojit radiometr spolu s datalogerem. Jelikož se jednalo o zkušební měření, byl radiometr s datalogerem provizorně namontován do ochranného boxu přijímače Alphasatu. Dataloger je zde připojen na výstup radiometru s převodem 100 mV/dBm. [9], [19]



Obrázek 33: Testovací umístění radiometru do zařízení Alphasat 39 GHz

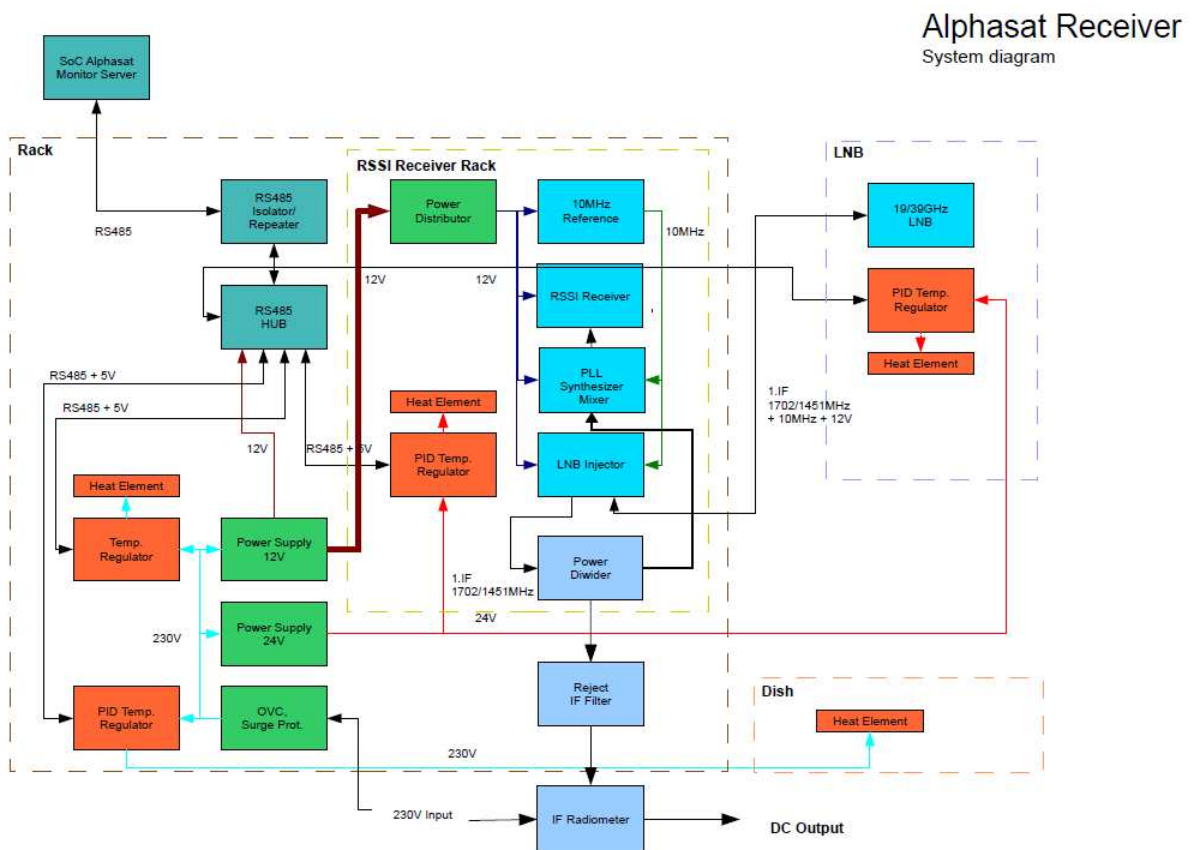
Tabulka 9: Testování zastínění zářiče radiometr 39 GHz rukou

Testovací měření		
	Radiometr [dBm]	Dataloger [V]
deštivá obloha	19,40	1,940
zastínění zářiče rukou	20,13	2,013

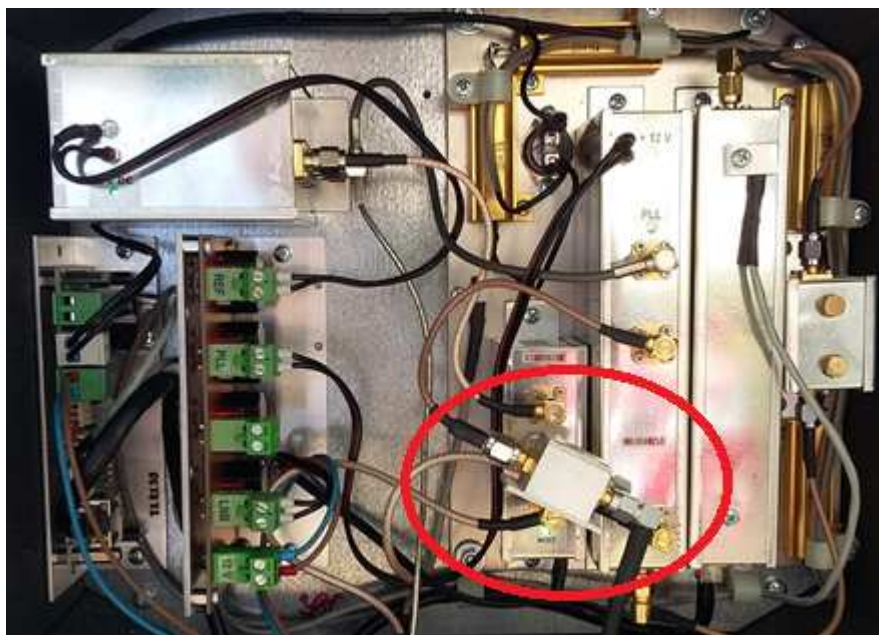
Testování takto zapojeného radiometru sčítalo mnoho pokusů o zastiňování zářiče a směrování zářiče kovovou deskou. Výsledky jsou zde ale viditelně ovlivněny ziskem paraboly, který je tímto způsobem vyřazen.

6.3 Finální umístění radiometru 39 GHz

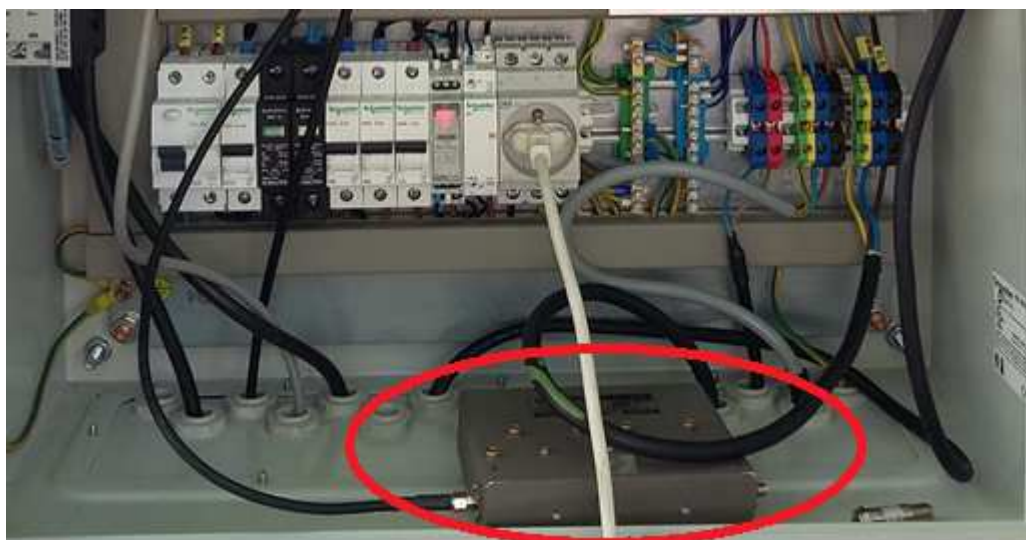
Finální umístění radiometru bylo nutné upravit oproti umístění k testování. Do zařízení Alphasatu byl vložen rozbočovač signálu, za rozbočovač byla připojena úzkopásmová zadrž pro odstranění signálu z družice. Samotný radiometr byl přemístěn do nedaleké vytápěné garáže. Signál po filtraci je přenášen pod zemí za pomoci stíněného koaxiálního kabelu. Spolu s radiometrem byl do garáže přesunut i dataloger. [9], [19]



Obrázek 34: Schéma připojení radiometru k zařízení Alphasat 39 GHz [19]



Obrázek 35: Rozbočovač signálu v zařízení Alphasat 39 GHz



Obrázek 36: Úzkopásmová zadrž radiometru 39 GHz

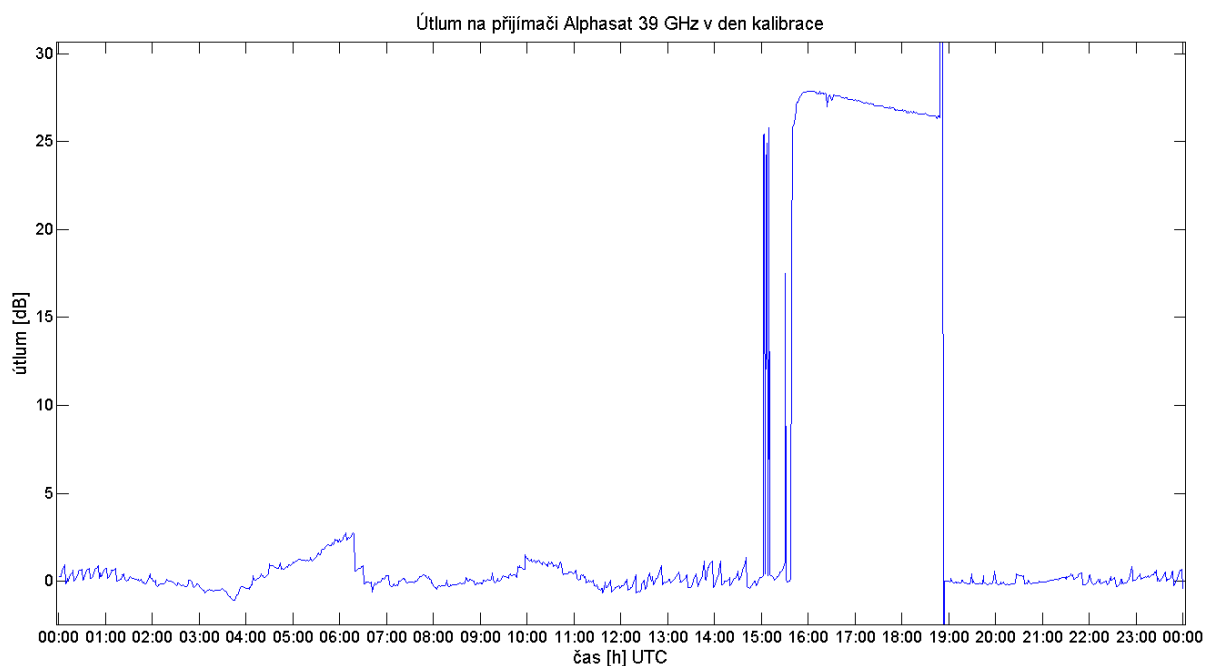
Takovéto umístění radiometru se zdá být ideální, pokud nebudeme brát ohledy na zařízení Alphasat. Vložení rozbočovače a připojením radiometru jsme způsobili pokles výkonu signálu na zařízení Alphasat přibližně o 4 dB. Tento pokles nebyl extrémní a jeho pozorování bylo zkresleno časovými rozestupy mezi odečtem hodnot a zároveň měnící se dešťovou oblačností.

Tabulka 10: Změny síly signálu Alphasat 39 GHz připojením radiometru 39 GHz

Změny signálu Alphasatu 39GHz		
	čas odečtení hodnoty [h]	úroveň signálu Alphasat [dBm]
původní hodnota	13:34	-28
vložen pouze rozbočovač	14:32	-31,5
připojený celý Radiometr	15:30	-34

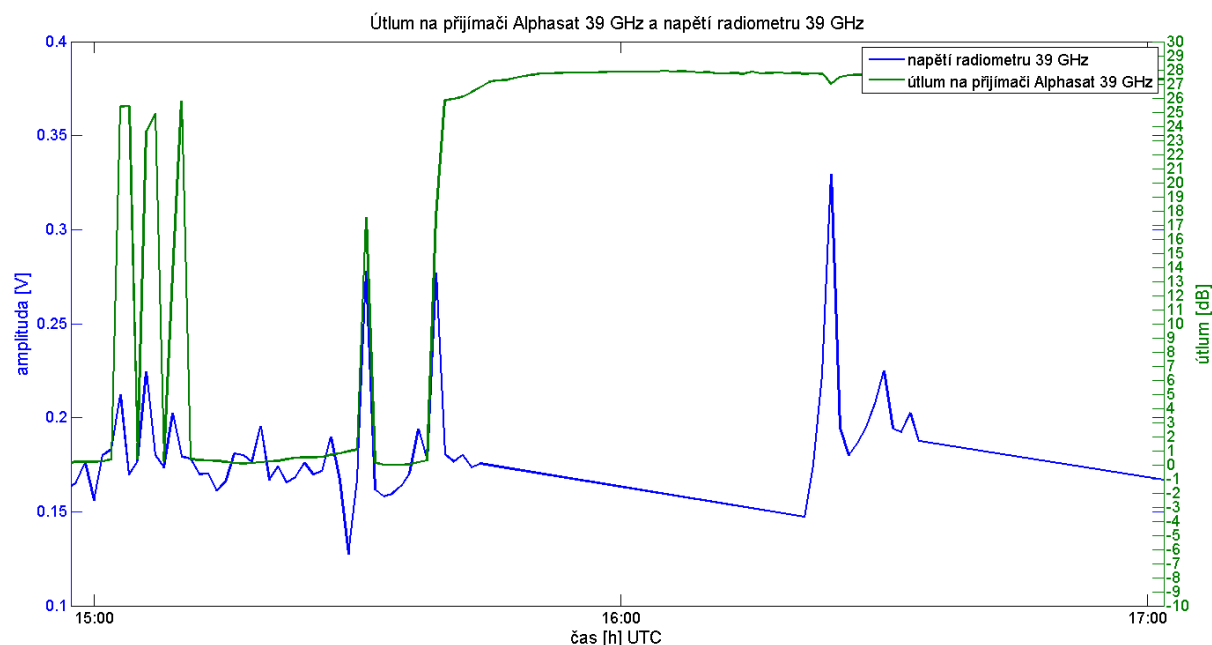
6.4 Kalibrace radiometru 39 GHz

Kalibrace u tohoto radiometru byla provedena metodou kalibračních těles popsaných v kapitole č. 4.1. Zářič byl dokonale obklopen kalibračním tělesem. Zastíněním zářiče kalibračním tělesem jsme nejen ovlivnili měření radiometru, ale také zamezili vstupu signálu z družice. Díky tomuto společnému využití zářiče tak můžeme analyzovat vlastnosti kvality konstrukce kalibračního tělesa. Kalibrační těleso by mělo dokázat utlumit signály kolem frekvence 39 GHz o hodnotu specifikovanou výrobcem absorberu až 50 dB.



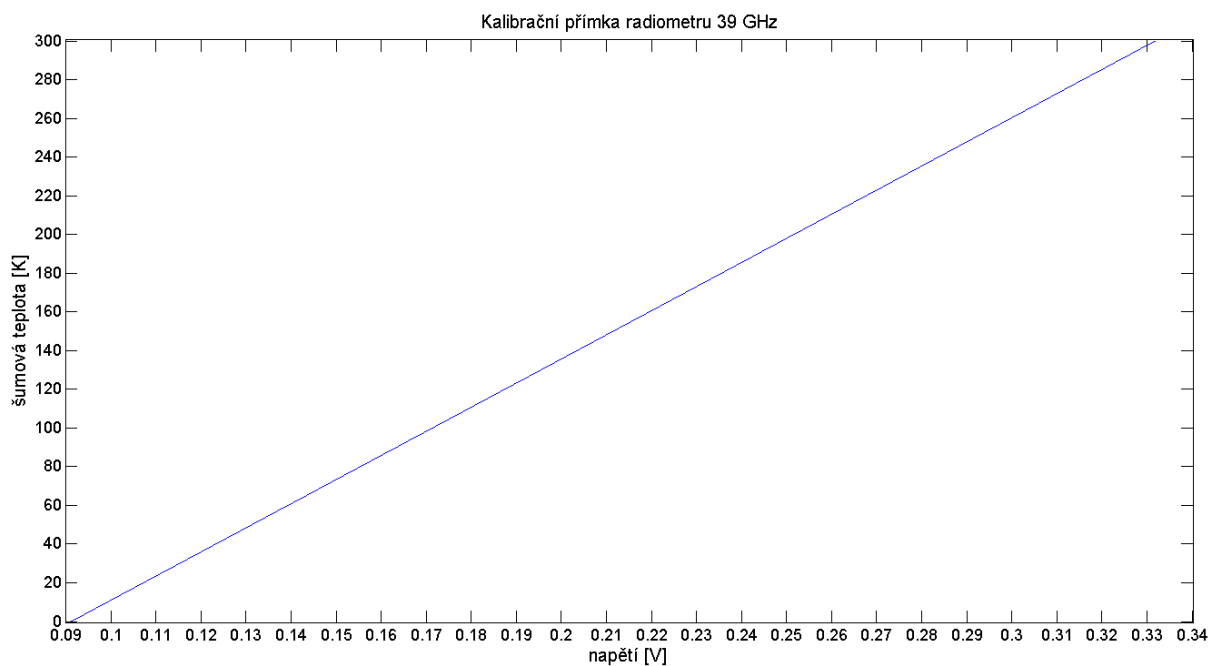
Obrázek 37: Útlum z přijímače Alphasat 39 GHz v den kalibrace radiometru 39 GHz

Jak je patrné z obrázku č. 38, útlum nedosahuje hodnot deklarovaných výrobcem. Útlum je však dostatečně velký abychom mohli říci, že signál z družice byl potlačen, tudíž se dá předpokládat že i okolní zdroje šumové teploty byly dostatečně potlačeny. Skok v útlumu přijímače Alphasatu je způsoben odsměrováním přijímače z pozice družice. Bylo tomu způsobeno automatickým směřováním přijímače v době vložení kalibračního tělesa.



Obrázek 38: Radiometrické měření 39 GHz a útlum z Alphasat 39 GHz při kalibraci

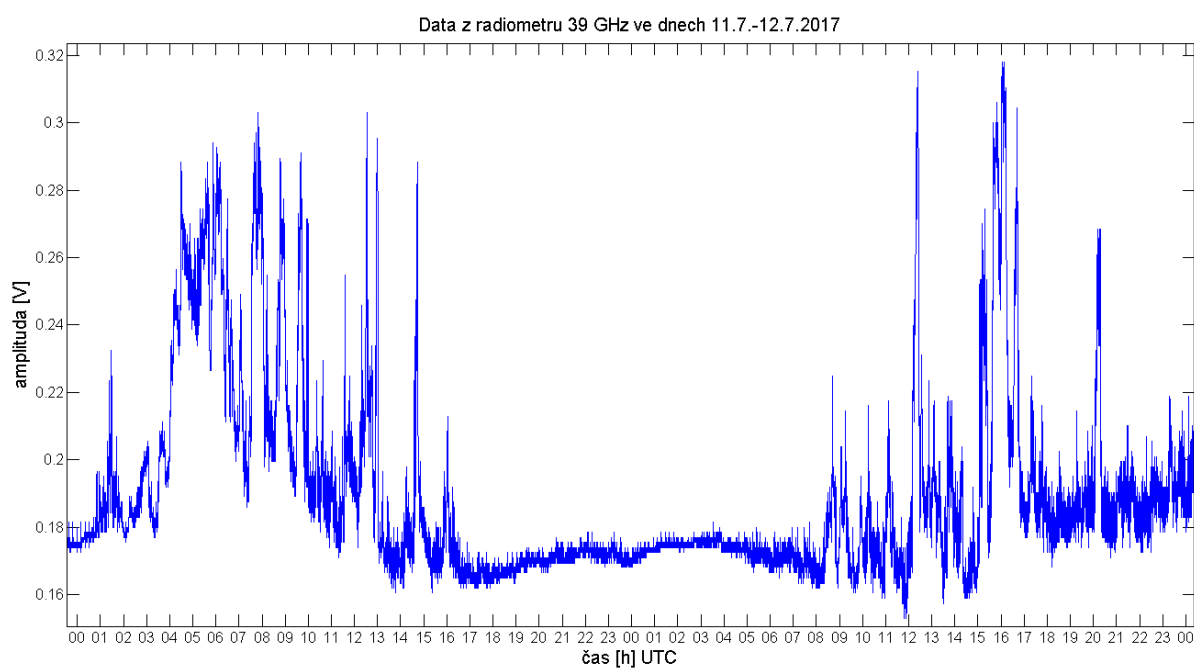
Z radiometrických dat lze za pomoci sledování dat z Alphasatu stanovit, šumovou teplotu atmosféry. Změna napětí radiometru vložení kalibračního tělesa s tekutým dusíkem není příliš znatelná. Obloha v době kalibrace totiž byla naprosto čistá bez oblačnosti. Po záměně média z tekutého dusíku na vodu o dvou různých teplotách již lze vidět na radiometrických datech poměrně znatelný nárůst napětí. Z kalibrace máme 6 bodů o známé šumové teplotě. S jejich využitím stanovíme kalibrační přímku pro následný převod dat z napětí na šumovou teplotu.



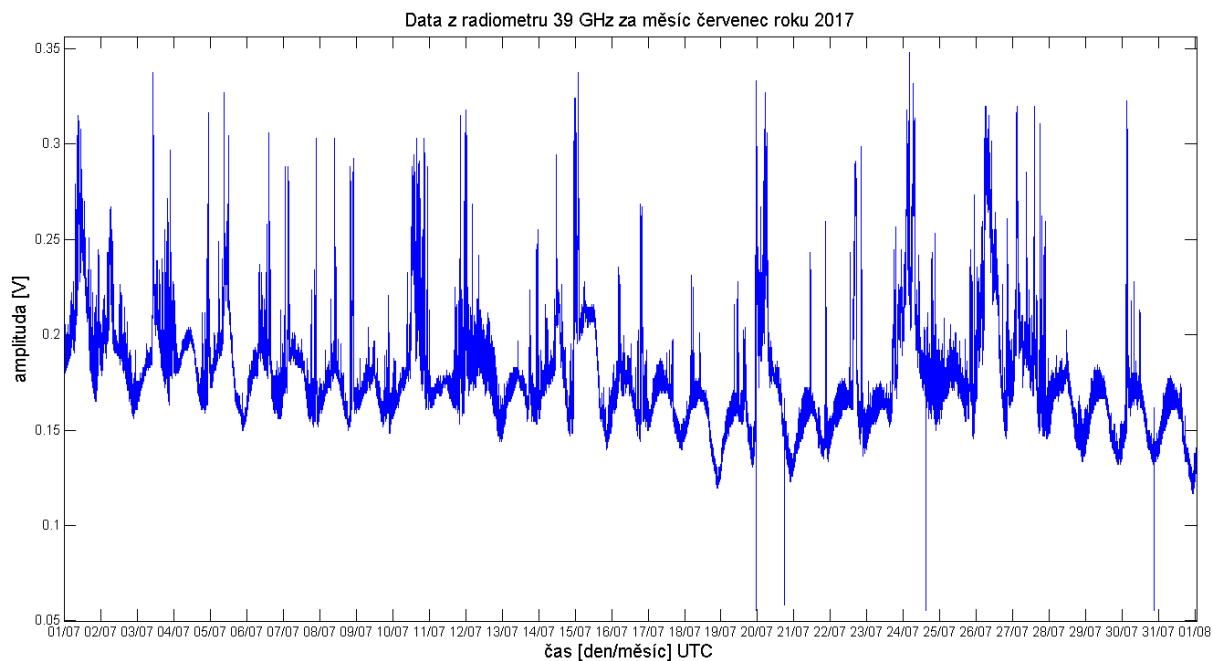
Obrázek 39: Kalibrační křivka pro radiometr 39 GHz

6.5 Funkce radiometru 39 GHz

Tento typ radiometru na výstup nepřivádí měřenou šumovou teplotu převedenou na napětí, jako tomu dělá radiometr 11 GHz, ale výstupem je šumový výkon v jednotkách [dBm]. Šumový výkon je dále převáděn podle zvolené výstupní svorky na napětí v určitém poměru.

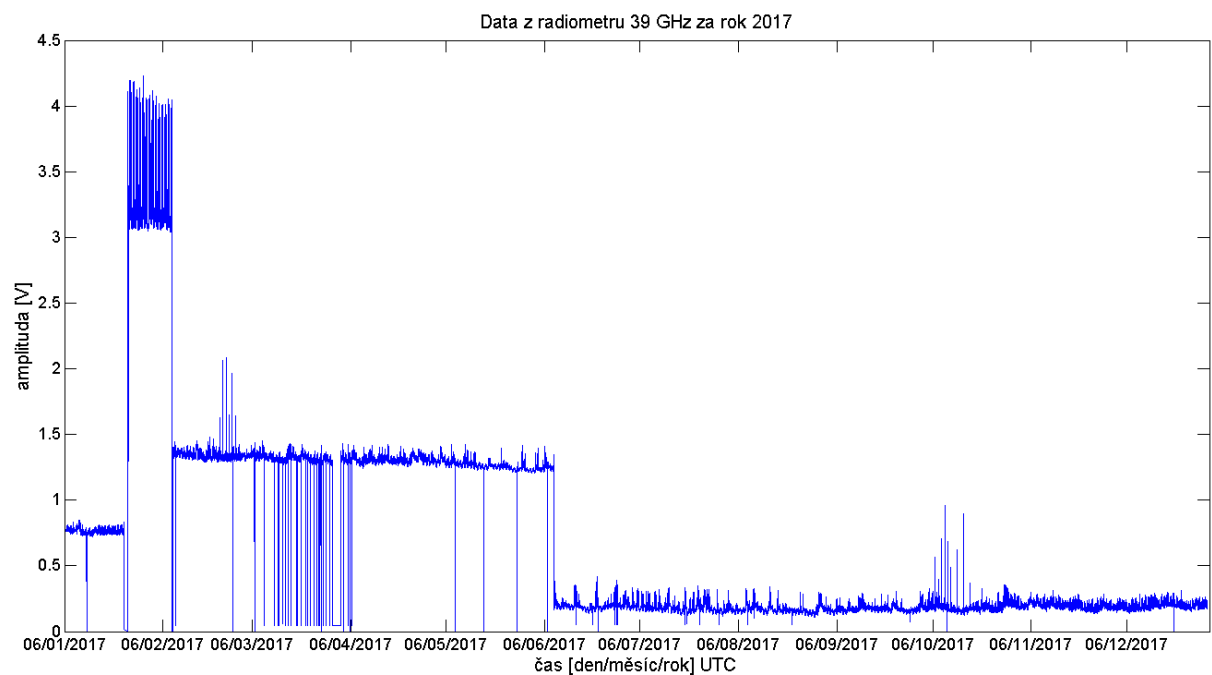


Obrázek 40: Radiometrická data 39 GHz ve dnech 11.7.-12.7.2017



Obrázek 41: Radiometrická data 39 GHz za měsíc červenec roku 2017

Na obrázku č. 41 je zobrazeno měsíční měření radiometrem. Můžeme si zde povšimnout značného zvlnění. Toto zvlnění dosahuje vždy maxima přes den a minima v noci. Zvlnění bude tedy způsobeno množstvím energie, kterou atmosféra vyzáří. V nočních hodinách, kdy Slunce nedodává naší atmosféře takové množství energie, která by byla dále v určité míře vyzářena, radiometr měří pouze vlastní šum atmosféry. Díky postupné změně příspěvku tedy dochází ke zvlnění v datech.

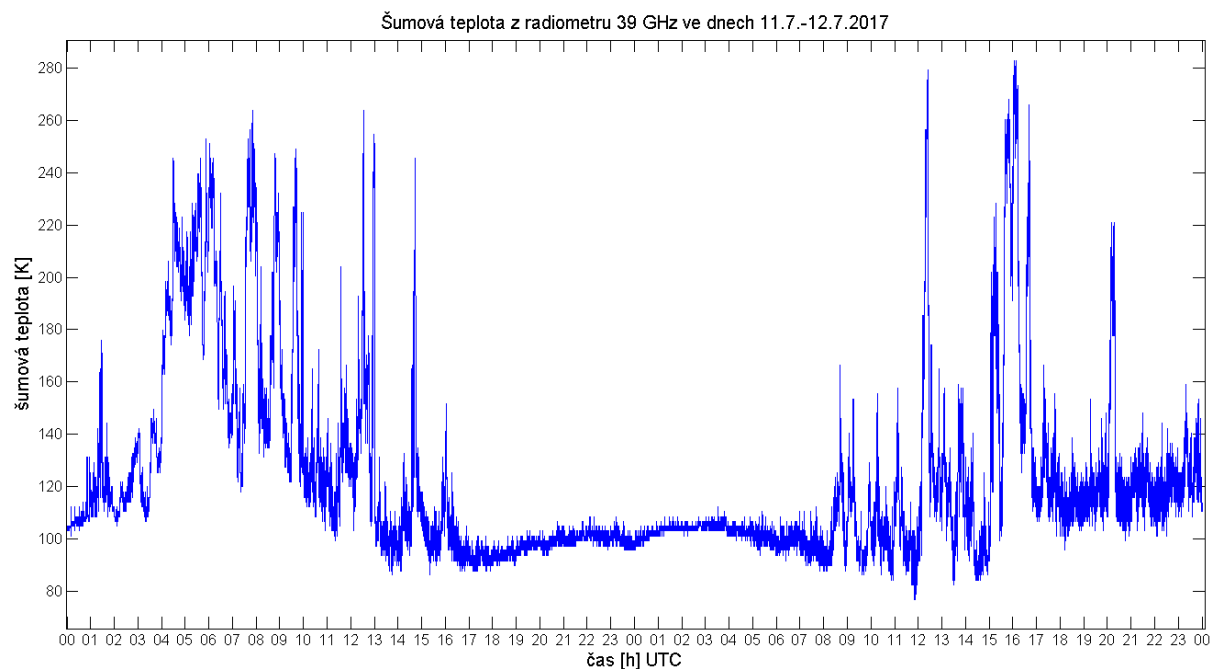


Obrázek 42: Radiometrická data 39 GHz za rok 2017

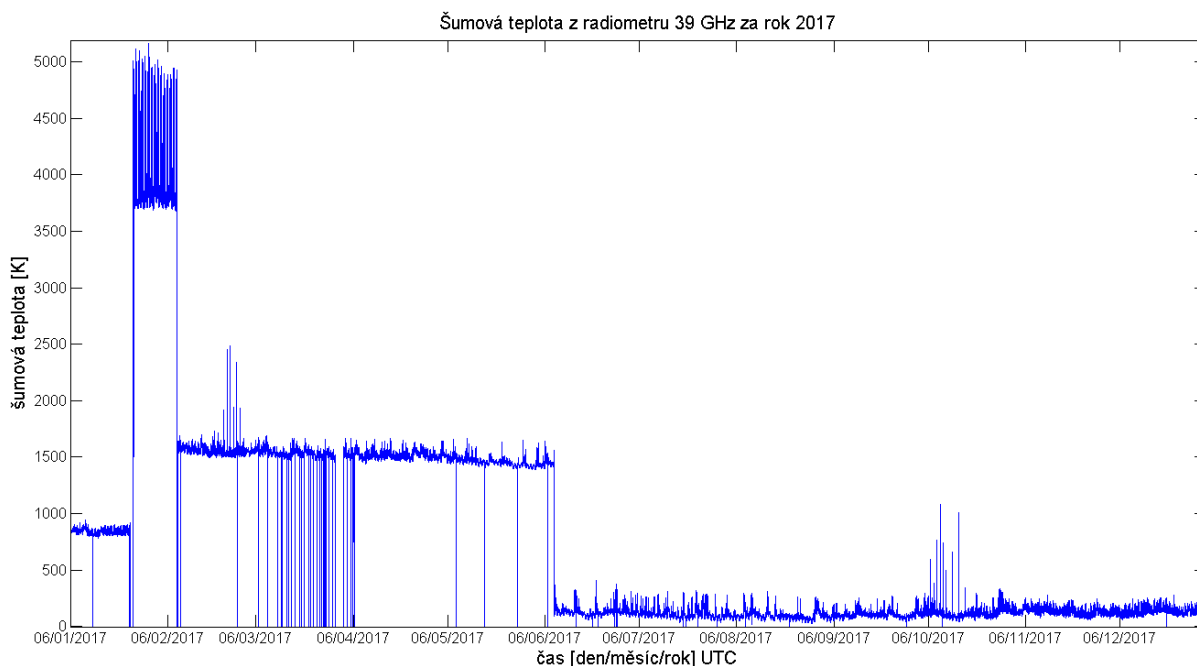
Na obrázku č. 42 můžeme vidět několik napěťových úrovní v tomto celoročním záznamu z radiometru. Jedná se zleva o prvotní měření ve finálním umístění. Dále následuje část s nejvyšší úrovní, která vykazuje stejné problémy jako radiometrické měření 11 GHz. Tyto problémy jsou způsobeny změnou frekvence vysílače (+10,8 kHz), která způsobila, že signál z družice není odfiltrován vloženou pásmovou zadrží. Třetí napěťová úroveň je po úpravě pásmové zadrže tak, aby odstranila signál z družice. Poslední napěťová úroveň je po přenastavení radiometru za pomoci potenciometru s označením „ZERO“.

6.5.1 Šumová teplota měřené radiometrem 39 GHz

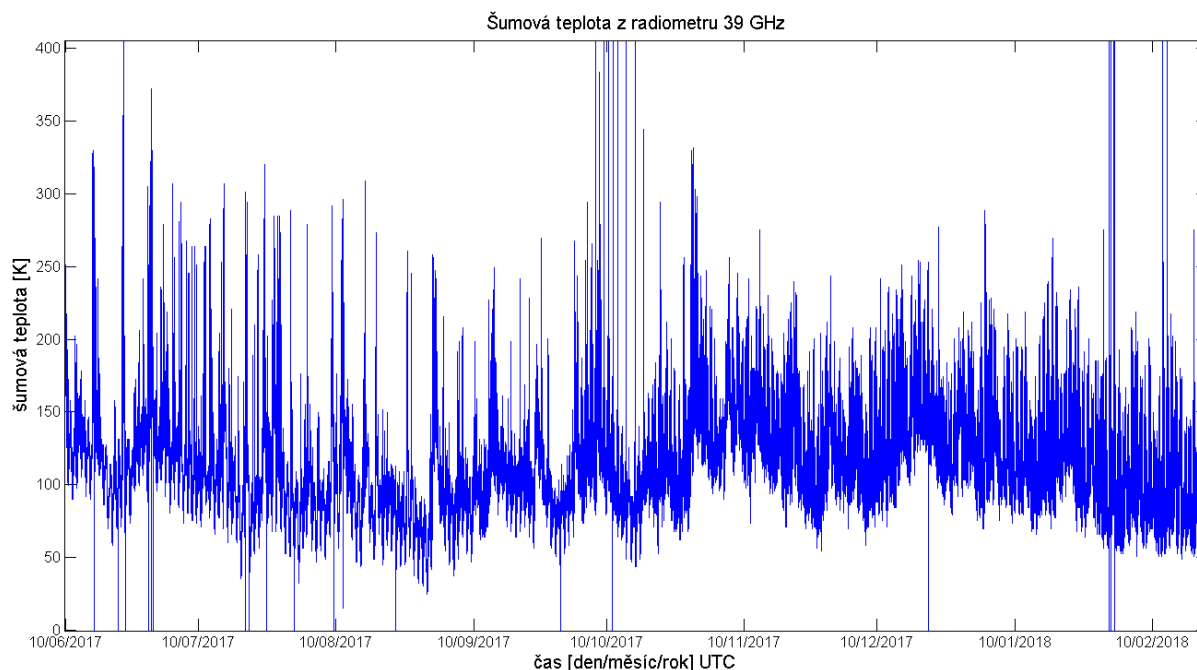
Provedením kalibrace jsme odstranili problém s převodem šumového výkonu na šumovou teplotu. Postačí nám využít rovnici kalibrační křivky, s jejíž pomocí jsme schopni udělat jednoduchý přepočítání napětí na šumovou teplotu.



Obrázek 43: Šumová teplota ve dnech 11.7.-12.7.2017 měřené radiometrem 39 GHz



Obrázek 44: Šumová teplota za rok 2017 měřená radiometrem 39 GHz



Obrázek 45: Úsek šumové teploty vybraný pro další zpracování

Jak můžeme vidět na obrázku č. 45, tak i tato data vybraná pro další zpracování (období 10.6.2017-21.2.2018) obsahují chybná data. Jedná se zejména o data vypnutí datalogeru, kdy po jeho opětovném zapnutí dochází k postupnému načítání hodnoty. Další chybná data se zde vyskytují jako občasné špičky do vysokých hodnot. Tyto špičky jsou způsobeny prováděným výzkumem na přijímači Alphasat.

7 MĚŘENÍ RADIOMETREM V PÁSMU 18 GHz

Jedná se taktéž o radiometr, který je vlastnictvím ÚFA. V minulosti na něm bylo prováděno několik úspěšných měření, ale také oprav a nutných předělávek. Technický stav radiometru není uzpůsoben k možnému použití. Radiometr byl shledán nevyužitelným pro účely této diplomové práce. Dále jako „radiometr 18 GHz“.



Obrázek 46: Radiometr 18 GHz



Obrázek 47: Ovládací panel a zářič radiometru 18 GHz

7.1 Parametry radiometru 18 GHz

Jedná se o radiometr typu „Dicke“ jehož přepínání je zajištěno motorkem původně z gramofonu. Rotace motorku způsobuje pravidelné vkládání referenčního zdroje šumové teploty do vlnovodu mezi přijímač a anténu. Tímto způsobem je tedy zajištěn požadovaný princip přepínání zdroje šumové teploty.

Radiometr je vybaven knoflíky „NULA“ a „RG“. Potenciometr s označením „NULA“ umožňuje nastavení napětí odpovídající nulové šumové teplotě a „RG“ slouží pro nastavení citlivosti zařízení. Dále je radiometr opatřen tlačítkem pro kalibraci a výstupními svorkami pro možnost záznamu dat externím zařízením. K vlnovodu radiometru je připevněna trychtýřová anténa.

7.2 Testování radiometru 18 GHz

Testování radiometru probíhalo nejprve v kanceláři pokusem měřit šumovou teplotu stěny a lidského těla. Následně jsme se pokoušeli změřit šumovou teplotu oblohy a koruny listnatého stromu. Nedostatečná jemnost v možnosti nastavení citlivosti způsobila neúspěšnost tohoto testování. Radiometr buď nereagoval na žádnou změnu šumové teploty, nebo reagoval maximální výchylkou ukazatele při minimální změně šumové teploty. Uchycení trychtýřové antény k vlnovodu není optimální a vnášelo další chybu do testovacího měření.

7.3 Finální umístění radiometru 18 GHz

Radiometr 18 GHz byl shledán nepoužitelným pro naše účely, zejména z důvodů nemožnosti zajistit pro takto velké zařízení, aby bylo kryto před deštěm nebo teplotně stabilizováno. Nastavení radiometru je také velmi obtížné. Rozsah potenciometrů určených k nastavení je velmi nedostatečný. Radiometr je vybaven trychtýřovou anténou s neideálními vlastnostmi a zjevným problémem v místě spojení antény a radiometru.

8 POUŽITÍ KOMBINACE RADIOMETRŮ

Z tří dostupných radiometrů jsme vybrali pouze dva radiometry (radiometry 11 GHz a 39 GHz). Tyto radiometry byly zvoleny díky jejich vhodnějším parametrům.

Výběr dvou radiometrů pro jejich vzájemnou spolupráci je prováděn vždy tak, aby frekvenční pásma byla vzájemně odlišná. Odlišnost se volí zejména z důvodu citlivosti různých frekvencí na určité složky atmosféry. Obrázek č. 3 nám zobrazuje například útlum způsobený různým množstvím srážek pro různé frekvence. Můžeme tedy konstatovat, že radiometry na nižších frekvencích mají mnohem menší reakci na malé srážky a malé kapky. Nejvhodnější je tedy využití dvou radiometrů, kdy jeden bude nejcitlivější na obsah kapalné vody a druhý na obsah vodních par. [11], [14]

8.1 Použití ke korekci záznamů signálu z družic

Jak již bylo řečeno, ÚFA provádí měření úrovně signálu na komunikačním řetězci mezi družicí Alphasat a Zemí. Úroveň signálu je ovlivněna nejenom stavem atmosféry, ale i prostorovou nestabilitou družice. Z měřeného signálu z družice ÚFA odvozuje matematickými postupy útlum atmosféry [30], [31], [32].

Útlum takto vypočtený nemůže být považován za čistý útlum cesty. Je totiž ovlivněn i prostorovou nestabilitou družice. S touto skutečností nám napomůže měření radiometrem. Z měřené šumové teploty lze vypočíst útlum způsobený atmosférou v daném směru. K tomuto přepočtu lze využít tuto rovnici [11], [14]:

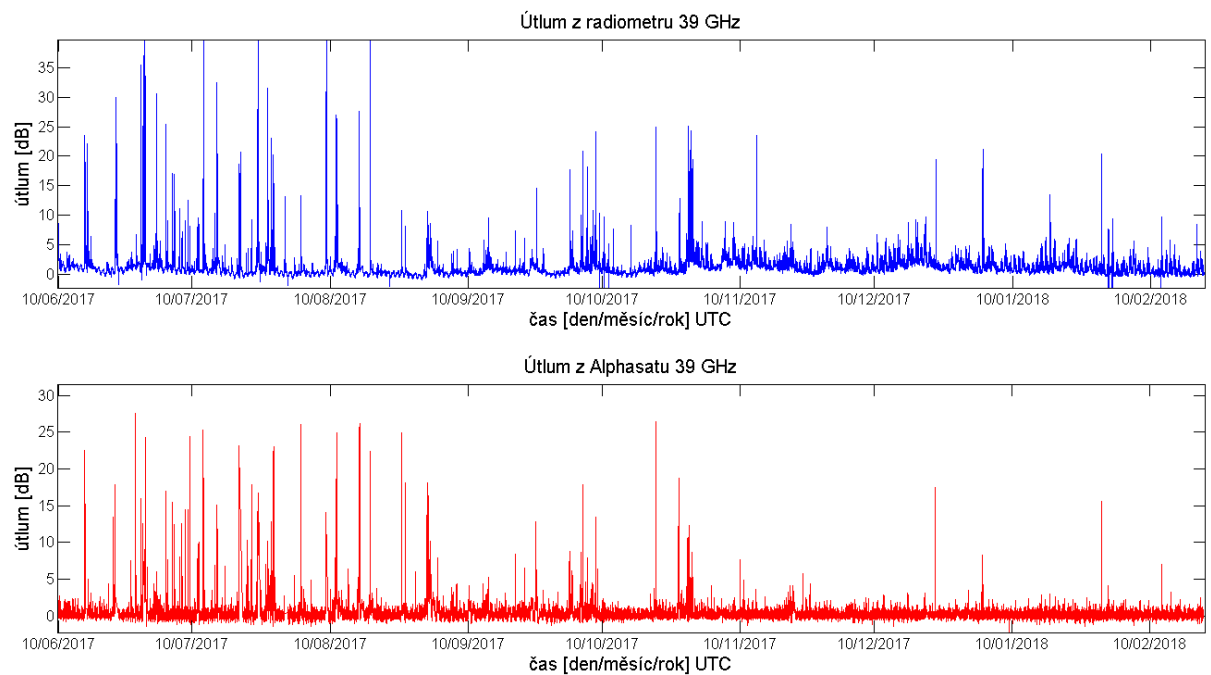
$$A = 10 \cdot \log \frac{(T_{mr} - T_0)}{(T_{mr} - T_b)} \quad [\text{dB}], \quad (8.1)$$

kde:

- A = útlum cesty [dB],
- T_{mr} = efektivní vyzářená teplota okolí [K],
- T_b = měřená teplota jasu – radiometrická teplota [K],
- T_0 = teplota kosmického pozadí [K].

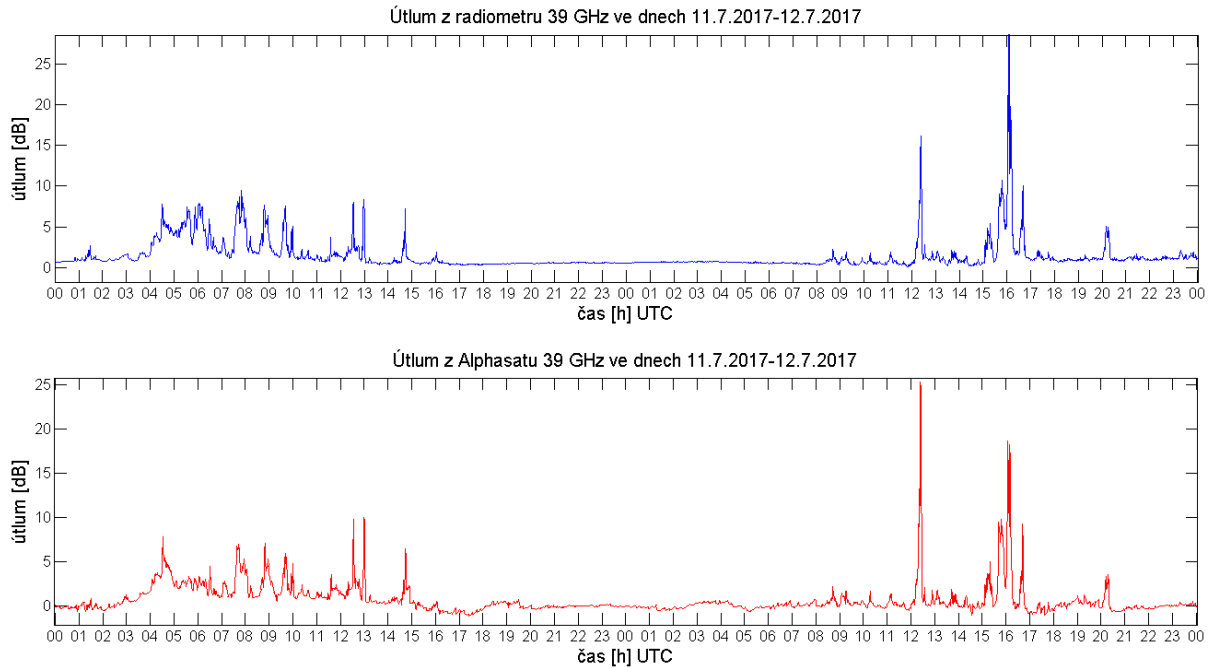
Po výpočtech obou útlumů (útlum z dat radiometru a útlum z dat Alphasatu) a jejich vzájemném porovnání, můžeme blíže zhodnotit správnost nebo míru vlivů, které nesouvisí se stavem atmosféry.

Radiometr 39 GHz díky svému umístění měří přímo v komunikační cestě družice s přijímačem. Měření probíhá i ve stejném frekvenčním pásmu. Tato skutečnost nám poskytuje obrovskou výhodu oproti radiometru 11 GHz, kde neměříme stejný sloupec ani na stejných frekvencích.

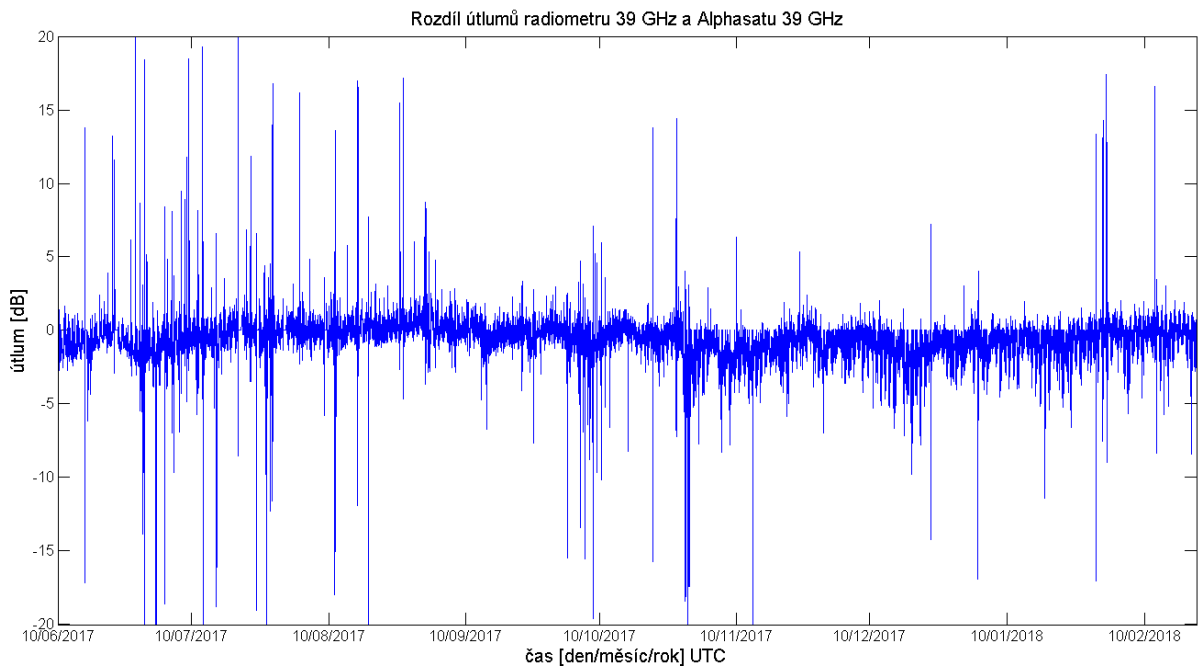


Obrázek 48: Porovnání útlumu z radiometru a z přijímače Alphasatu v pásmu 39 GHz

Na obrázku č. 48 můžeme vidět pro porovnání útlumy z uvažovaného období. Jedná se o úsek dat z 10.6.2017 - 21.2.2018. Z následujícího obrázku (obrázek č. 49) obsahujícího detail dvou dnů můžeme říci, že útlumy vzájemně korelují.



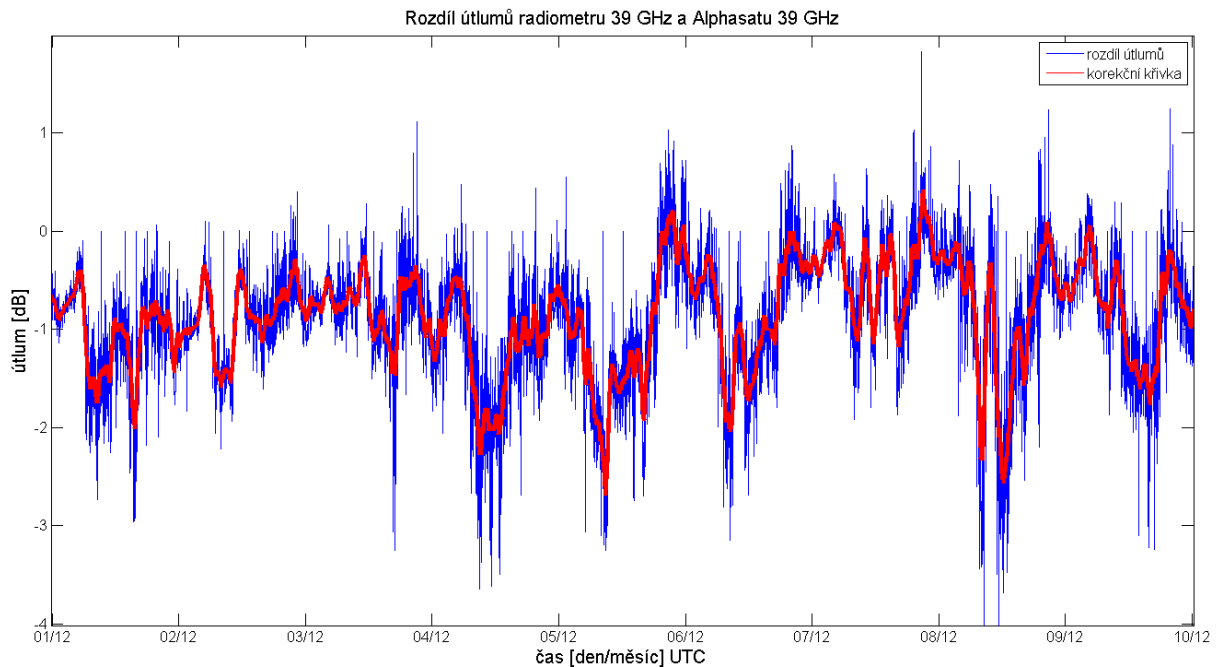
Obrázek 49: Porovnání útlumu z radiometru a z přijímače Alphasatu v pásmu 39 GHz



Obrázek 50: Rozdíl útlumů z radiometru a z přijímače Alphasatu v pásmu 39 GHz

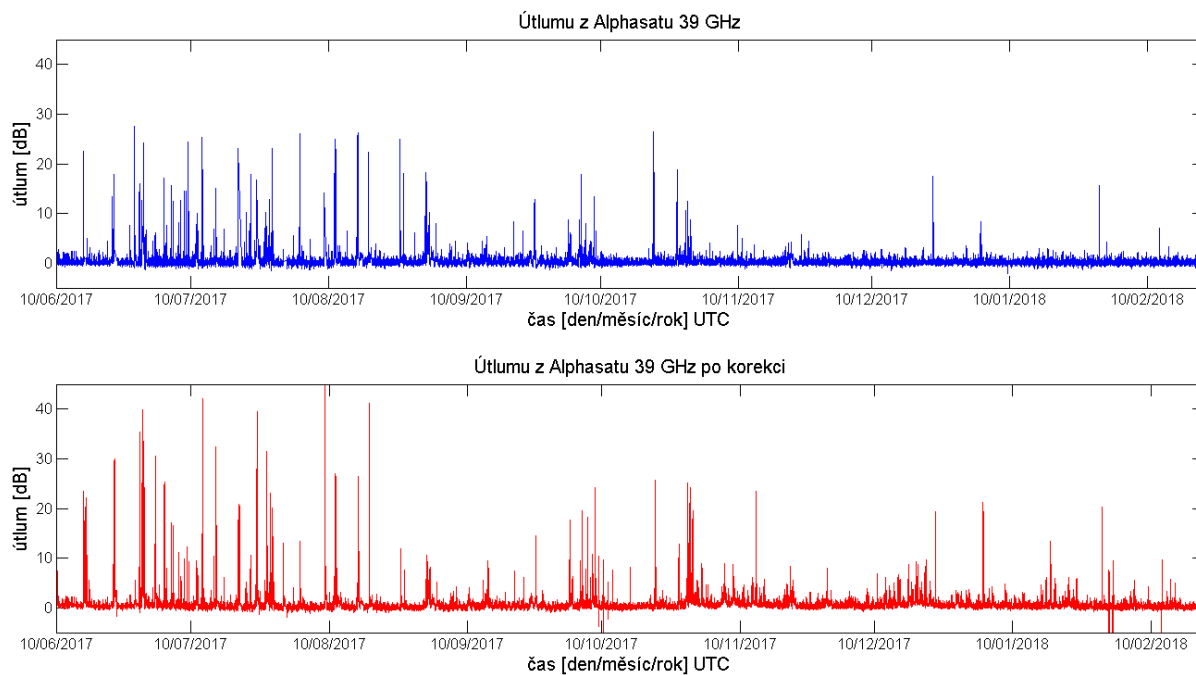
Rozdíl útlumu vypočteného z dat přijímače Alphasatem 39 GHz a radiometru 39 GHz můžeme vidět na obrázku č. 50. Z tohoto rozdílu byla dále vytvořena korekční křivka. Pomocí této křivky lze upravit útlum z Alphasatu 39 GHz.

Další možností, jak provést korekci útlumu je analýza vývoje útlumu a vytvoření korekční rovnice. Tato rovnice by sloužila pro přepočítání útlumu komunikační cesty v závislosti na poloze družice (především odchýlení od středu hlavního laloku přijímače Alphasatu).

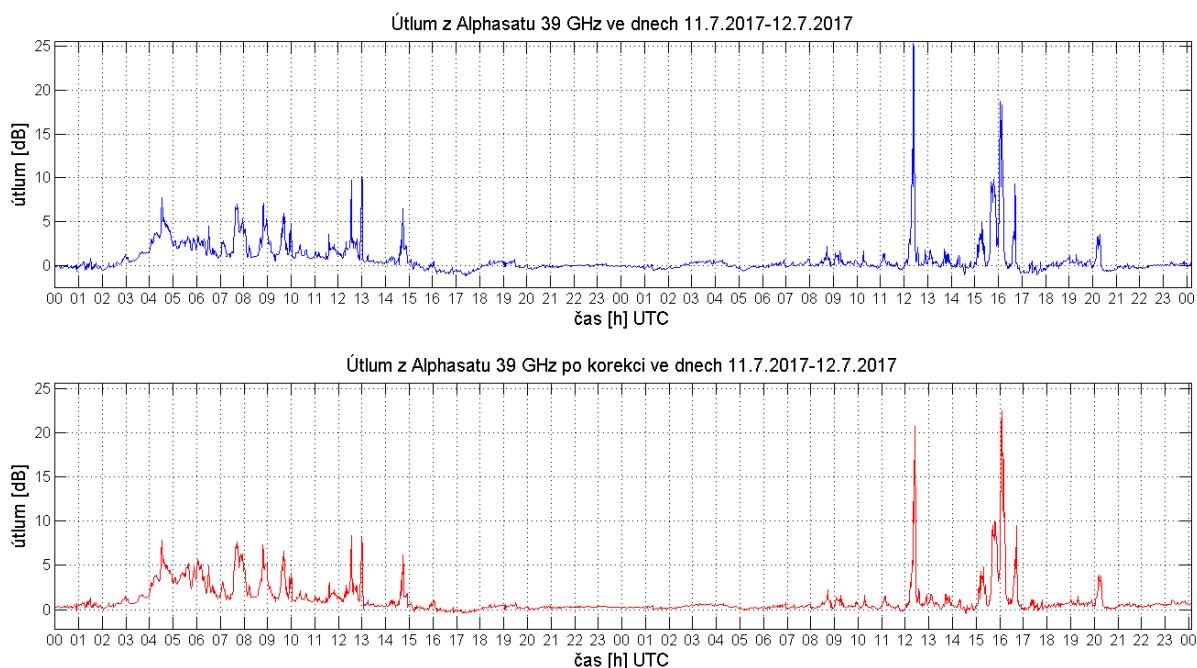


Obrázek 51: Rozdíl útlumů v porovnání s korekční křivkou

Aplikováním korekční křivky na útlum počítaný z dat Alphasatu 39 GHz jsme docílili značných změn. Jednalo se především o snížení útlumu v místech, kde radiometr poskytoval menší útlum, a naopak zvýšení v místech kde byl útlum z radiometru větší. Místa s chybějícími útlumy z Alphasatu byla doplněna o útlumy vypočtené z radiometru.



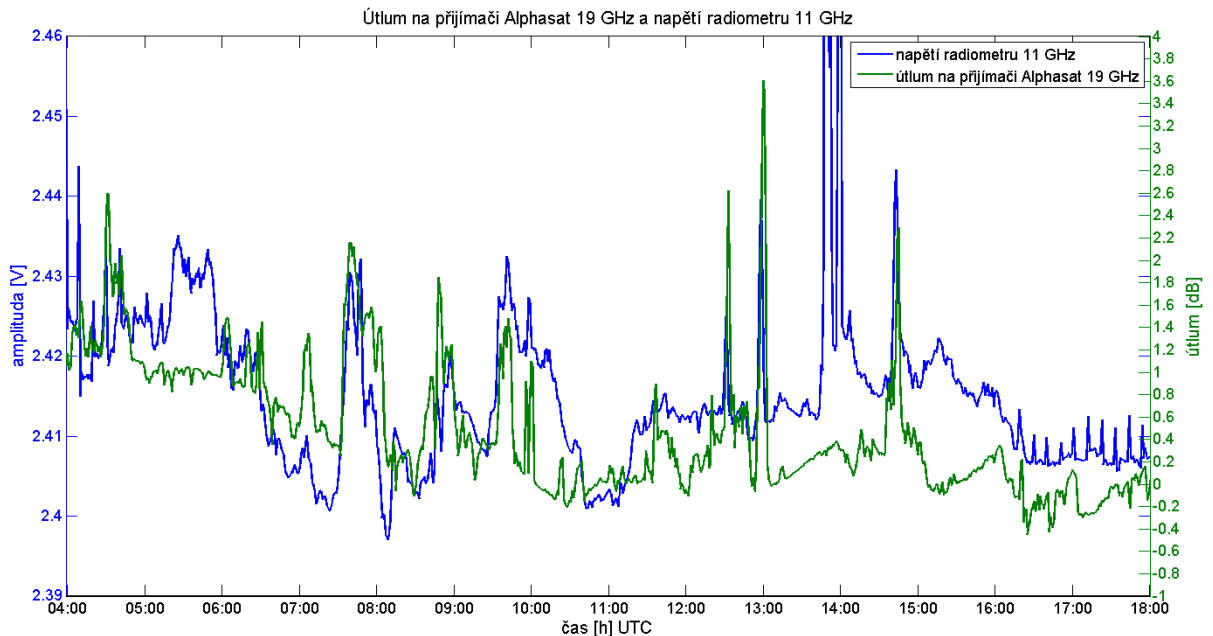
Obrázek 52: Porovnání útlumu z přijímače Alphasatu 39 GHz před a po korekci



Obrázek 53: Porovnání útlumu z přijímače Alphasatu 39 GHz před a po korekci

Jak již bylo zmíněno v kapitole č. 5.5.1, radiometrické měření za pomoci radiometru 11 GHz nelze využít. Důvodem je vysoký obsah chybných dat.

Na obrázku č. 54 můžeme vidět detail na část přijatých dat, která zřetelně koreluje s útlumem spočteným z přijatého signálu Alphasat 19 GHz. Je tedy zřejmé že radiometr funguje správně alespoň v místech, kde nejsou data zatížena chybou.



Obrázek 54: Porovnání měření radiometru 11 GHz a přijímače Alphasatu 19 GHz

8.2 Průzkum atmosféry

Radiometr má díky svým vlastnostem mnoho různorodých využití. Jedním z nich je i průzkum atmosféry. Díky svým vlastnostem byl radiometr velmi oblíben pro sledování různých vlastností atmosféry. Velmi často se používá pro nahrazení majákového měření.

Pro stanovení útlumu atmosférou z měření radiometru bylo stanoveno několik rozdílných rovnic. Jedná se například o rovnici č. 8.1 nebo jiné složitější, které pro výpočet útlumu atmosférou využívají podrobnější parametry radiometru a jiné vlastnosti okolního prostředí. Jsou to například parametry vyzařovacího svazku, délka vyzařovacího svazku, tlak okolního vzduchu, zisk radiometru a další. Pokud tedy využijeme jiné zařízení (jiný radiometr, komunikační řetězec s družicí, majákové měření a další) pro měření útlumu atmosférou, lze tyto rovnice přepočítat a vyjádřit z nich i jiné vlastnosti atmosféry. Zde je pak spousta možností, co přesně budeme z radiometrických dat počítat.

8.2.1 Určení množství kapalné vody

Jedná se o jeden z parametrů atmosféry, který je nejčastěji počítán. Jeho využití je zejména zajímavé pro družicové spoje, mikrovlnná pojítka, optické spoje i v meteorologii.

Pro určení množství kapalné vody lze využít pouze jeden radiometr, ale bude nutné znát mnohem více parametrů.

Výpočet umožní následující rovnice [11]:

$$L = \frac{A_R(f) - V \cdot a_V(f) - A_0(f)}{a_L(f)} \quad [\text{mm}], \quad (8.2)$$

kde: L = množství kapalné vody [mm],
 A_R = útlum spočtený radiometrem [dB],
 A_0 = útlum kyslíkem [dB],
 V = množství vodních par [mm],
 a_V = absorpční koeficient vodních par [dB/mm],
 a_L = absorpční koeficienty tekuté vody [dB/mm].

Takto napsaná rovnice č. 8.2 obsahuje jen jeden parametr, který je nutno měřit. Jedná se o množství vodních par. Ty lze samozřejmě vypočítat (viz kapitola 8.2.2) nebo využít jiné zařízení pro jejich změření.

Druhou možností, jak měřit obsah kapalné vody je využití měření dvou radiometrů na rozdílných frekvencích. K vypočtení množství kapalné vody využijeme rovnice zmíněné v kapitole 2.4.1.

Jedná se o tyto rovnice [11], [14]:

$$\begin{aligned} A_1 &= A_{01} + a_{V1} \cdot V + a_{L1} \cdot L \\ A_2 &= A_{02} + a_{V2} \cdot V + a_{L2} \cdot L \end{aligned} \quad [\text{dB}], \quad (8.3)$$

kde: A_1, A_2 = celkový útlum pro frekvence f_1 a f_2 [dB],
 A_{01}, A_{02} = útlum kyslíkem pro frekvence f_1 a f_2 [dB],
 a_{V1}, a_{V2} = absorpční koeficienty vodních par pro frekvence f_1 a f_2 [dB/mm],
 a_{L1}, a_{L2} = absorpční koeficienty tekuté vody pro frekvence f_1 a f_2 [dB/mm],
 V, L = množství vodních par a vody [mm].

Z těchto dvou rovnic za pomoci řešení soustavy dvou rovnic o dvou neznámých vyjádříme množství kapalné vody. Rovnice bude mít tvar:

$$L = \frac{a_V(f_1) \cdot (A(f_2) - A_0(f_2)) + a_V(f_2) \cdot (A_0(f_1) - A(f_1))}{a_V(f_1) \cdot a_L(f_2) - a_V(f_2) \cdot a_L(f_1)} \quad [\text{mm}], \quad (8.4)$$

kde: L = množství kapalné vody [mm],
 A = útlum vypočtený z radiometrických dat [dB],
 A_0 = útlum kyslíkem [dB],
 a_V = absorpční koeficient vodních par [dB/mm],
 a_L = absorpční koeficienty tekuté vody [dB/mm].

Za pomoci takto vyjádřené rovnice lze již pouhým dosazením vypočítat obsah kapalné vody. Absorpční koeficienty a útlum kyslíkem lze vyčíst z příslušných tabulek (jako jsou například tabulky č.1 a č.2 v této diplomové práci). Použitý útlum získaný radiometrickým měřením na dvou frekvencích lze z šumové teploty přepočítat za pomoci rovnice č. 8.1 (viz. kapitola č. 8.1).

Vzhledem k nemožnosti využít radiometrické měření radiometru 11 GHz nebylo počítáno množství kapalné vody za pomoci měření dvou radiometrů. Je zde však možnost, jak toto chybějící radiometrické měření nahradit. Rovnice jsou konstruovány na výpočet z měřeného útlumu atmosférou. Z tohoto důvodu lze útlum vypočtený z radiometrického měření nahradit útlumem měřeným jiným způsobem. Dále v kapitole č. 9.

8.2.2 Určení množství vodních par

Jedná se o další velmi zajímavý parametr stavu atmosféry, zejména pro zkoumání jeho vlivu na bezdrátová komunikační zařízení.

Množství vodních par v atmosféře lze taktéž počítat i bez měření radiometrem. K výpočtu bude nutné znát hustotu vodních par ρ , kterou získáme měřením nebo ji vypočítáme za pomoci měřené relativní vlhkosti rH a měřené teploty okolí T . Výsledná rovnice pro výpočet hustoty vodních par má tvar [11], [14]:

$$\rho = 216,7 \cdot \frac{rH}{100} \cdot 5854 \cdot \frac{10^{\frac{20-2950}{T}}}{T^6} \quad [\text{g/m}^3], \quad (8.5)$$

kde:

- ρ = hustota vodních par [g/m^3],
- rH = relativní vlhkost [%],
- T = okolní teplota [K].

Dalším parametrem nutným pro výpočet množství vodních par je vzdálenost, na které provádíme měření. Pokud provedeme výpočet nebo měření hustoty vodních par a známe vzdálenost na které provádíme měření, lze množství vodních par vypočíst podle následující rovnice [11]:

$$V = \rho \cdot s \quad [\text{mm}], \quad (8.6)$$

kde:

- V = množství vodních par [mm],
- ρ = hustota vodních par [kg/m^3],
- s = vzdálenost na které je prováděno měření [m].

Měření množství vodních par je možné realizovat s využitím měření dvou radiometrů na rozdílných frekvencích. K výpočtu je nutné opět řešit soustavu rovnic o dvou neznámých jako tomu bylo v kapitole 8.2.1 (rovnice č. 8.3). Tentokrát je nutné vyjádřit množství vodních par V na místo množství kapalné vody L .

Vyjádřená rovnice má tvar:

$$V = \frac{a_L(f_1) \cdot (A(f_2) - A_0(f_2)) + a_L(f_2) \cdot (A_0(f_1) - A(f_1))}{a_V(f_2) \cdot a_L(f_1) - a_V(f_1) \cdot a_L(f_2)} \quad [\text{mm}], \quad (8.7)$$

kde:

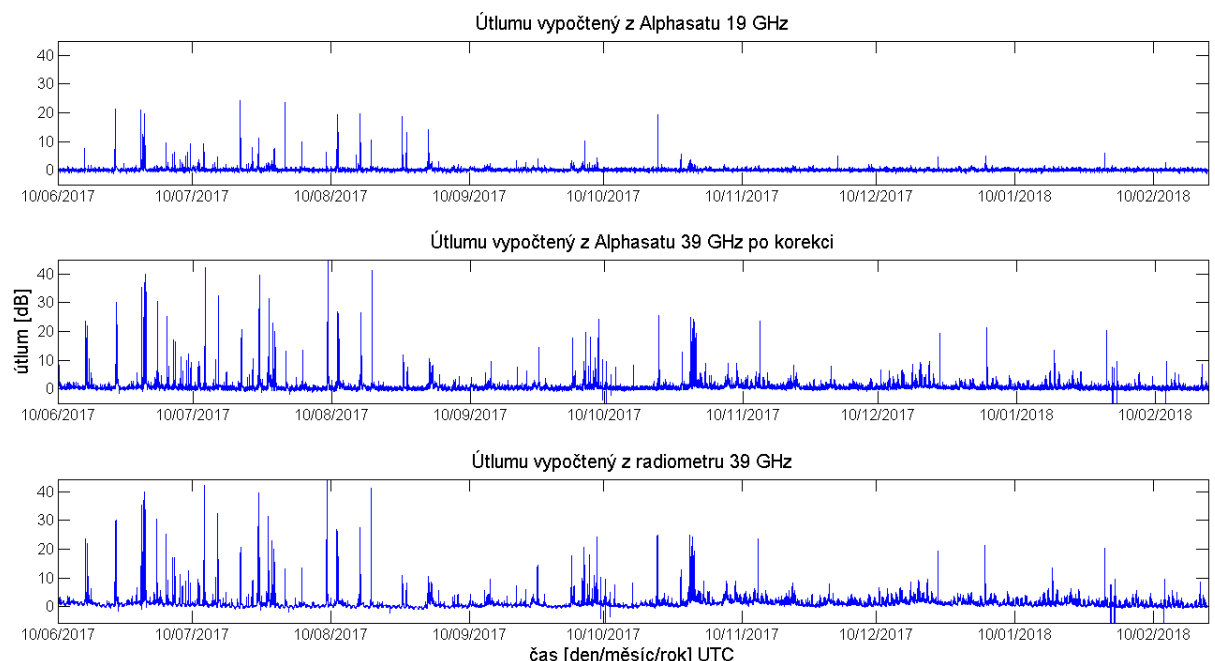
- V = množství vodních par [mm],
- A = útlum vypočtený z radiometrických dat [dB],
- A_0 = útlum kyslíkem [dB],
- a_V = absorpční koeficient vodních par [dB/mm],
- a_L = absorpční koeficienty tekuté vody [dB/mm].

Po dosazení známých hodnot do rovnice získáme množství vodních par ve sloupci pohledu radiometrů. Absorpční koeficienty a útlum kyslíkem lze vyčíst z příslušných tabulek (jako jsou například tabulky č.1 a č.2 v tomto dokumentu). Použitý útlum získaný radiometrickým měřením na dvou frekvencích lze z šumové teploty přepočítat za pomoci rovnice č. 8.1 (viz. kapitola č. 8.1).

Vzhledem k nemožnosti využít útlum z radiometru 11 GHz nebylo možné vypočítat množství vodních par za pomoci měření dvou radiometrů. Jak již bylo zmíněno v kapitole č. 8.2.1 existuje možnost, jak toto radiometrické měření nahradit. Útlum počítaný z radiometrického měření lze nahradit útlumem měřeným jiným způsobem. Dále v kapitole č. 9.

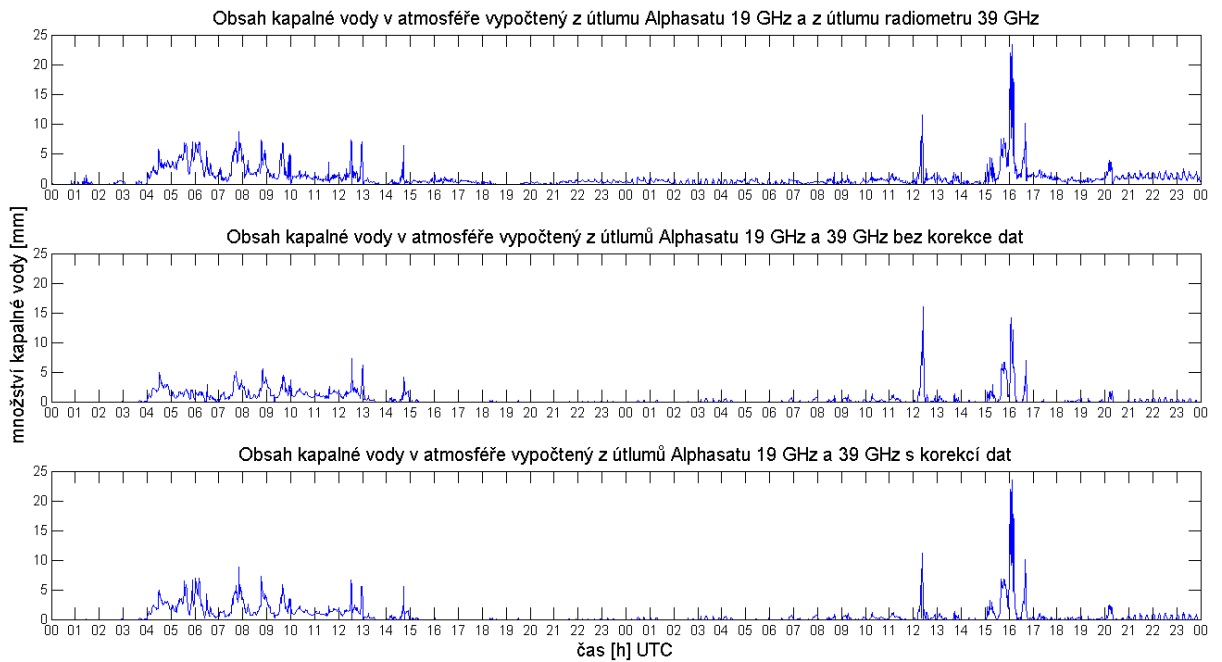
9 POROVNÁNÍ ZÍSKANÝCH DAT

Pro výpočty množství kapalné vody a vodních par v atmosféře je nutné znát útlum atmosférou. Ten lze získat několika různými způsoby. Pokud tedy známe útlumy na družicovém přijímači Alphasatu (dokonce na dvou frekvencích), je možné tyto útlumy taktéž využít pro výpočet kapalné vody a vodních par v atmosféře. Jak již bylo ukázáno v kapitole 8.1, není možné útlumy využít bez příslušné korekce. Pokud by tyto neupravené útlumy byly použity, došlo by ke změnám v množství kapalné vody a vodních par v čase, kdy v atmosféře k žádným změnám nedošlo. Tyto změny by byly pouze projevem změny útlumu na přijímači Alphasatu způsobené například prostorovou nestabilitou družice.

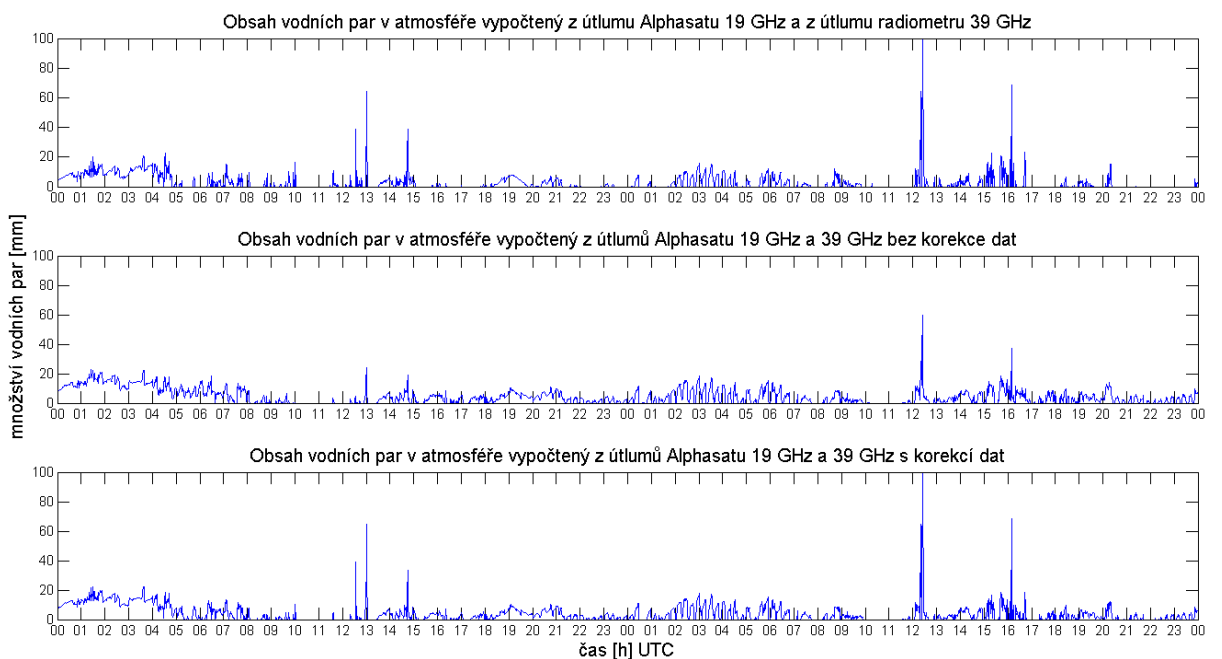


Obrázek 55: Porovnání útlumů využitých pro další výpočty

Ke stanovení obsahu kapalné vody a vodních par v atmosféře bylo využito tří zdrojů útlumu. Tyto útlumy jsou zobrazeny na obrázku č. 55. Dále bylo pro přepočty útlumů využito dříve zmíněných rovnic č. 8.4 a č. 8.7.



Obrázek 56: Porovnání množství kapalné vody ve dnech 11.7.-12.7.2017



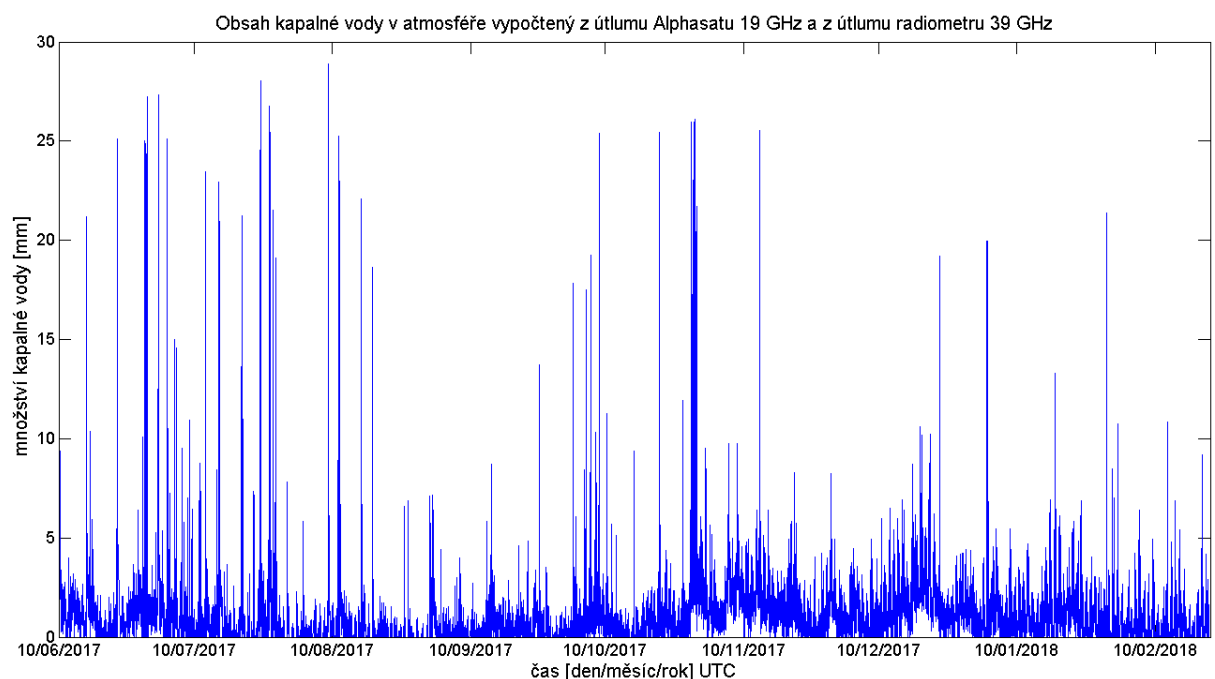
Obrázek 57: Porovnání množství vodních par ve dnech 11.7.-12.7.2017

Obrázky č. 56 a č. 57 zobrazují množství kapalné vody a vodních par v atmosféře pro tři možné kombinace zdrojů útlumu. Jiné možné kombinace by nebyly funkční. Použití kombinace útlumu z radiometru 39 GHz a útlumu z Alphasatu 39 GHz není možné vzhledem ke konstrukci rovnic pro výpočet množství kapalné vody a množství vodních par. Nastala by situace dělení

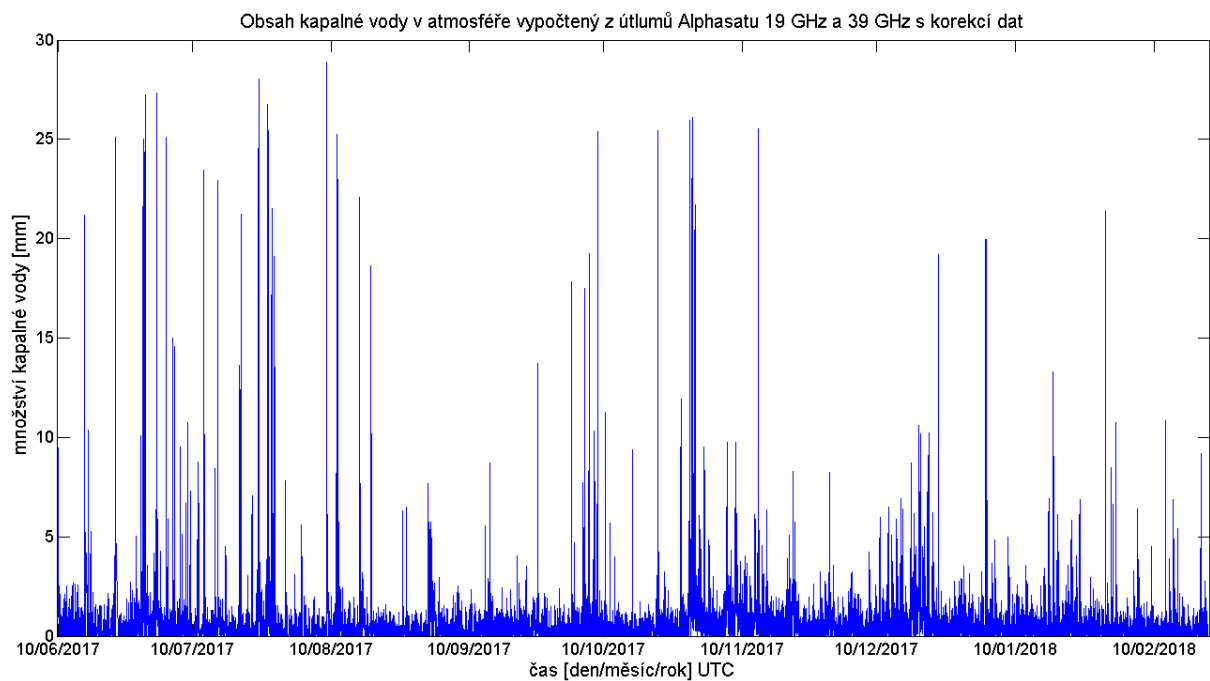
nulou ve zlomku. Data z radiometru 11 GHz by bylo možné použít jen za předpokladu opětovné kalibrace, ale pouze za podmínky, že by byla kalibrace provedena v době, kdy nedochází ke kupám, špičkám ani skokům. Získali bychom tak malou část dat ze dne, pro kterou by bylo možné stanovit ILWC a IWVC.

Vzhledem k nefunkčnosti dat z radiometru 11 GHz nemáme k dispozici prostředek pro korekci dat útlumu z Alphasatu 19 GHz. Je tak zcela pravděpodobné, že data ILWC a IWVC jsou zkresleny chybami obsaženými v útlumu z Alphasatu 19 GHz.

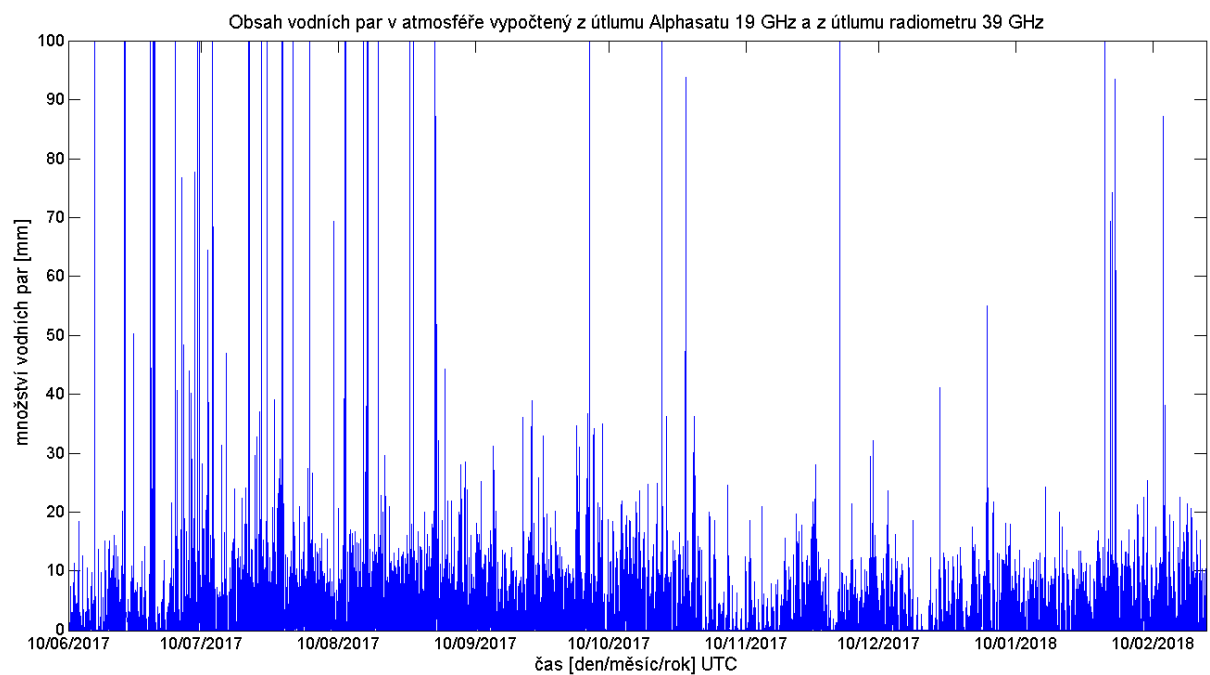
Z těchto tří kombinací je nejméně vhodné využít kombinaci druhou v pořadí. Jedná se o výpočet z útlumů Alphasat 19 GHz a 39 GHz bez jakékoliv korekce dat.



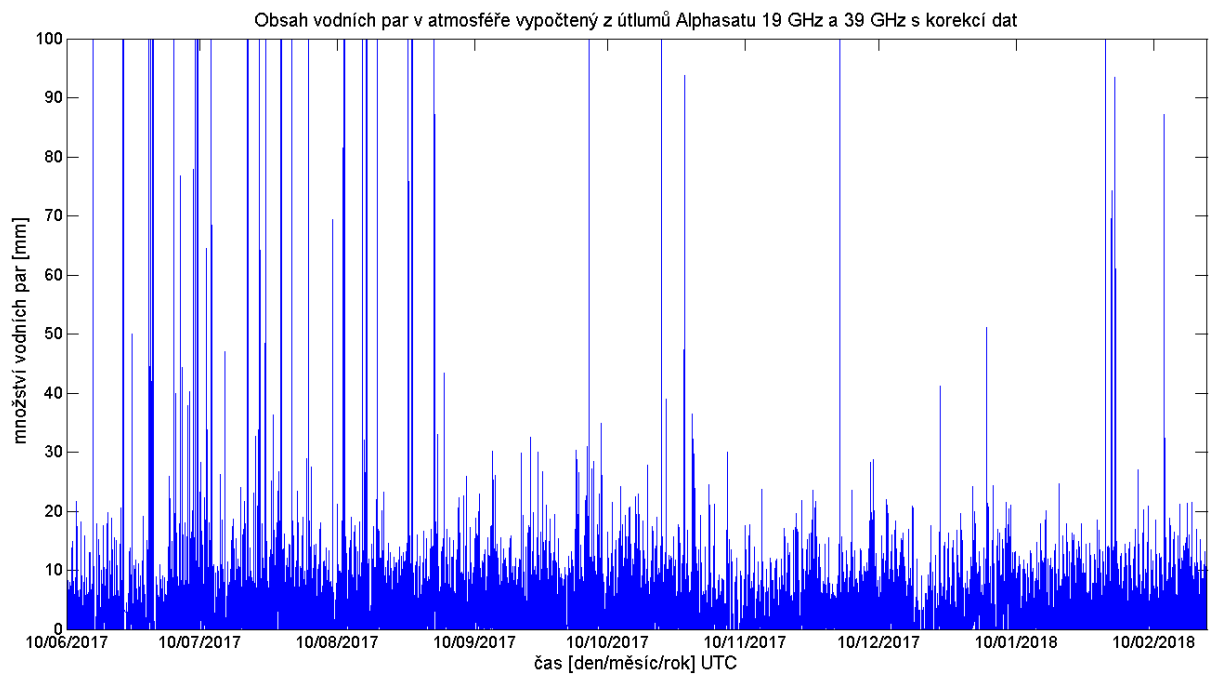
Obrázek 58: ILWC pro kombinaci útlumů z Alphasatu 19 GHz a z radiometru 39 GHz



Obrázek 59: ILWC pro kombinaci útlumů z Alphasatu 19 GHz a 39 GHz s korekcí dat



Obrázek 60: IWVC pro kombinaci útlumů z Alphasatu 19 GHz a z radiometru 39 GHz



Obrázek 61: IWVC pro kombinaci útlumů z Alphasatu 19 GHz a 39 GHz s korekcí dat

ZÁVĚR

Základem diplomové práce bylo vytvoření měřicí soustavy pro účely sledování atmosféry. Ze tří radiometrů, které byly k dispozici jsme radiometr 18 GHz shledali nepoužitelným pro tyto účely. Zbylé dva radiometry (radiometr 11 GHz a radiometr 39 GHz) byly podrobeny prvotnímu testování, které ukázalo jejich vlastnosti a nedostatky. Po prvotním testování bylo nalezeno optimální umístění zejména pro radiometr 11 GHz. Radiometr 39 GHz byl konstruován přímo pro montáž do zařízení přijímače Alphasatu 39 GHz. Následovalo dlouhodobé testování a kalibrace radiometrů. Převod dat nám velmi komplikovaly dvě skutečnosti. Data z radiometru 11 GHz obsahovala chybová data a napěťové skoky. Data z radiometru 39 GHz nebyly v jednotkách šumové teploty ale v jednotkách šumového výkonu. Nejprve tedy bylo nutné tyto dvě skutečnosti vyřešit.

Prvotní analýzy dat z radiometrů jsme prováděli pouze na jednodenním záznamu (24 h). Pokus o vyřešení úpravy dat z radiometru spočíval ve vytvoření algoritmu, který detekuje špičky v datech a provede jejich odstranění. Po odstranění špiček se zdála být data v pořádku, pouze s úrovněmi skoky v napětí. Provedli jsme tedy jakési narovnání dat srovnáním úrovněných skoků na stejnou hladinu. Pro jednodenní záznam se tento zásah jevil naprosto v pořádku. Po analýze dlouhodobějšího záznamu bylo zjištěno, že data vykazují postupný rostoucí trend. V našich úpravách jsme počítali s tím, že dojde k jisté vzájemné kompenzaci přírůstku a úbytku v úrovni měřeného signálu v místech odstraněných špiček. Změny úrovně v datech v těchto místech byly skryty špičkami (směrováním antén přijímače Alphasatu). Takové změny tedy nemůžeme ani odhadnout tak, aby bylo možné provést rovnání správně. Měřená data radiometrem 11 GHz jsou tedy nepoužitelná pro další zpracování z hlediska dlouhodobé analýzy stavu atmosféry. Lze však odstranit všechny části měřených dat kde docházelo k tomuto chybnému chování. Zbylou necelou jednu třetinu z denních dat lze využít pro analýzu atmosféry, pokud by nám postačovala analýza v řádu hodin.

Data z radiometru 39 GHz takovéto chyby jako jsou na záznamu měření radiometrem 11 GHz vykazovala pouze v čase, kdy signál družice Alphasat 39 GHz nebyl odfiltrován pásmovou zádrží vloženou před radiometrem. Záznam dat, kdy pásmová zádrž fungovala správně, se tedy jevil jako ideální. Problém nastal ve chvíli, kdy jsme se pokoušeli vyřešit převod dat. Radiometr 39 GHz měří šumový výkon, který je nutné převést na šumovou teplotu. Pokoušeli jsme se odvodit rovnice pro převod, ale nakonec jsme tento problém vyřešili kalibrací za pomoci kalibračních těles. Z šumové teploty byl následně vypočítán útlum atmosféry. Bylo provedeno odvození rovnic pro výpočet obsahu kapalné vody a obsahu vodních par v atmosféře. Výpočet

obsahů kapalné vody a vodních par je možné realizovat pouze pokud máme k dispozici změřené útlumy na dvou rozdílných frekvencích. Jelikož máme jen jedno měření útlumu radiometrem, bylo druhé nahrazeno vypočteným útlumem z přijímače Alphasatu. Po výpočtu hodnot ILWC a IWVC můžeme říci, že všechny tyto veličiny vycházejí poměrně reálně s přihlédnutím k hodnotám, které jsou publikovány odborníky věnujícími se této problematice.

K možnosti využít radiometr jako korekční zařízení pro útlum počítaný z Alphasatu musíme předpokládat, že radiometr měří naprosto přesně. Pokud je radiometr umístěn v cestě komunikace s družicí, přesně jako tomu je u radiometru 39 GHz, máme ideální možnost měření pro korekci. Námi provedená korekce útlumu Alphasatu 39 GHz spočívala ve vytvoření korekční křivky z rozdílů útlumů a následné aplikování této křivky na útlum počítaný z Alphasatu 39 GHz. Korekční křivku z dat radiometru 39 GHz pro útlum počítaný z dat Alphasatu 19 GHz nelze hodnověrně vytvořit kvůli značnému rozdílu útlumů na takto vzdálených frekvencích. Útlum vypočtený z dat radiometru 39 GHz dále posloužil pro doplnění útlumu Alphasatu 39 GHz v místě chybějících dat. Chybějící data jsou způsobena tím, že Alphasat ztratí v průběhu silnějšího deště vazbu s družicí a směřováním odsměruje mimo její pozici (data jsou následovně vyřazena ze záznamu).

Výsledná měřicí soustava je sice funkční, ale využít lze pouze radiometr 39 GHz. Vzhledem k plánovanému využití této měřicí soustavy dvou radiometrů bude nutné zajistit správnou funkčnost radiometru 11 GHz v celém rozsahu. Data radiometru jsou ovlivněna s největší pravděpodobností družicí (jinou než družicí Alphasat). Pokud by se lokalizoval frekvenční rozsah vysílání této rušivé družice, bylo by možné toto rušení odfiltrovat za pomoci pásmové zádrže. Po takovémto zásahu by i data radiometru 11 GHz měla být bez rušení a jeho funkce by neměla být omezena. Pro účely této diplomové práce byl speciálně pořizován radiometr 39 GHz s úzkopásmovou zádrží (vyráběn na míru do zařízení přijímače Alphasatu) a pořizování druhého filtru by bylo nad rámec této práce a finanční možnosti UPCE a ÚFA.

V rámci diplomové práce byl vytvořen algoritmus a zdrojový program v Matlabu, který slouží pro zpracování dat z radiometru (jejich úpravu, převod a přepočet). Výstupem tohoto algoritmu je šumová teplota atmosféry, útlum atmosférou, ILWC a IWVC.

Využití radiometrů na ÚFA bude dále pokračovat za mé intenzivní spolupráce. Je plánováno doladění měřicí soustavy a opatření radiometru 11 GHz chybějícím filtrem. Radiometrické měření bude dále využíváno v ÚFA pro korekci útlumů z družice Alphasat.

Dále je také plánováno využití radiometrického měření v mé navazující disertační práci. V té bude plnit funkci jedné z možných součástí měřící soustavy pro sledování atmosféry.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Background Technology [online]*. 2012 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://propagation.ece.gatech.edu/ECE6390/project/Fall2012/Team02/6390%20Webpage%20Updated%202/6390%20Webpage/styled/index.html>
- [2] *Telemeter Electronic [online]*. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://telemeter.info/cz/>
- [3] *Passive Microwave Sensing [online]*. EE/Ae 157(Týden 6) [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: www.its.caltech.edu
- [4] JOSEPH, George. *Fundamentals of remote sensing [online]*. 2. ed. Hyderabad: Universities Press, 2005 [cit. 2018-04-07]. ISBN 81-737-1535-1. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=peUFLCy4zLYC&pg=PA224&lpg=PA224&dq=radiometr+Dicke&source=bl&ots=kR8ej09JZ2&sig=pMz8xCM8L1OW-jUPJSwvLyBQq2o&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiH-anA4frZAhUiLZoKHVccCgM4ChDoAQg3MAQ#v=onepage&q=radiometr%20Dicke&f=false>
- [5] HAYKIN, Simon S., Edvard o. LEWIS, R. Keith RANEY a James R. ROSSITER. *Remote sensing of sea ice and icebergs [online]*. New York: Wiley, 1994 [cit. 2018-04-07]. ISBN 04-715-5494-4. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=1L8p6chyaYYC&pg=PA193&dq=radiometr+Dicke&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjM6P3AsfvZAhVhCZoKHchbBasQ6AEIJzAA#v=onepage&q=radiometr%20Dicke&f=false>
- [6] PAMPALONI, P. *Microwave radiometry and remote sensing applications: proceedings of the specialist meeting held in Florence, Italy, 9-11 March, 1988 [online]*. Utrecht, the Netherlands: VSP, 1989 [cit. 2018-04-07]. ISBN 90-676-4108-1. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=wwYe-1UOHVsC&pg=PA107&dq=radiometr+Dicke&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjM6P3AsfvZAhVhCZoKHchbBasQ6AEIMjAC#v=onepage&q=radiometr%20Dicke&f=false>

- [7] EMERY, William a Adriano CAMPS. *Introduction to satellite remote sensing [online]*. Washington, WA: Elsevier, 2017 [cit. 2018-04-07]. ISBN 978-0-12-809254-5. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=sZLUDQAAQBAJ&pg=PA234&dq=radiometr+Dicke&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjM6P3AsfvZAhVhCZoKHchbBasQ6AEIRzAG#v=onepage&q=radiometr%20Dicke&f=false>
- [8] *Radiometers: kurz astr534 [online]*. cv.nrao.edu [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://www.cv.nrao.edu/course/astr534/Radiometers.html>
- [9] Ing. Jiří Polívka, CSc., Milan Otisk. osobní komunikace, 2017.
- [10] Ing. Jiří Polívka, CSc..Radioteleskopy – co postavit a jak zlepšit.
- [11] OPEX. *Radiometry and Meteorological Measurements*. Second Workshop of the OLYMPUS Propagation Experimentes. ESA ESTEC, Noordwijk, The Netherlands: ESA Reproduction Service, 1994. ISSN 1022-6656.
- [12] *Radiometr pro pozorování nebe se srážkami*.
- [13] *Convention*. Darmstadt: OPEX 20, 1993.
- [14] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Handbook on radiometeorology*. Geneva: The Union, 1996. ISBN 92-610-6241-5.
- [15] MARTELLUCCI, Antonio, Marina BOUMIS, Ermanno FIONDA, Ondřej FIŠER, Frank S. MARZANO, Peter WATSON a Charles WRENCH. *Fixed Propagation Modelling: Propagation Effects due to Atmospheric Gases and Clouds [online]*. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.163.5081>
- [16] FIŠER, Ondřej. *Vliv hydrometeorů na útlum signálu družicového spoje*.
- [17] FIŠER, Ondřej. *Výzkum šíření elektromagnetických vln na drahách družicových spojů*. Telekomunikace. 2003.

- [18] KVIČERA, Václav, Martin GRÁBNER a Ondřej FIŠER. *Twelfth International Conference on Antennas & Propagation*. Conference publication 491: 31st March - 3rd April 2003, University of Exeter, UK. London: Institution of Electrical Engineers, 2003. ISBN 0852967527.
- [19] B PLUS TV a. s., *Radiometr MFRM 1-2 GHz: Uživatelská příručka*.
- [20] ELGERED, G., B. O. RONNANG a J. I. H. ASKNE. *Measurements of atmospheric water vapor with microwave radiometry*. Radio Science, Volume 17, Number 5. Onsala Space Observatory, Chalmers University of Technology, S-43900 Onsala, Sweden, 1982.
- [21] CLAFLIN, E. S., S. C. WU a G. M. RESCH. *Microwave Radiometer Measurement of Water Vapor Path Delay: Data Reduction Techniques*. DSN Progress Report 42-48. 1978.
- [22] HOGG, D.C., F. O. GUIRAUD, J. B. SNIDER, M. T. DECKER a E. R. WESTWATER. *A Steerable Dual-Channel Microwave Radiometer for Measurement of Water Vapor and liquid in the Troposphere [online]*. NOAA/ERL/Wave Propagation Laboratory, Boulder, CO 80303, 1983 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450%281983%29022<0789%3AASDCMR>2.0.CO%3B2>
- [23] POLÍVKA, J., P. FIALA a J. MACHAČ. *Microwave noise field behaves like white light*. Progress In Electromagnetic Research. 2011, Vol. 111, 311-330.
- [24] *Lineq s.r.o* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://lineq.cz>
- [25] XIE, Y., J. CHEN, D. LIU, C. LV, K. LIU a J. MIAO. *DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF A K-BAND GROUND-BASED HYPERSPECTRAL MICROWAVE RADIOMETER FOR WATER VAPOR MEASUREMENTS*. *Progress In Electromagnetics Research [online]*. 2013(PIER13050704), s. 415-438 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.2528. Dostupné z: <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=13050704>
- [26] POLÍVKA, Jiří. *Radiometr Dicke 10,7-11,7 GHz: Uživatelská příručka*.

- [27] LI, J., L.-X. GUO, L.-K. LIN, Y. ZHAO, T. SHU a H. HAN. *A DUAL-FREQUENCY METHOD OF ELIMINATING LIQUID WATER RADIATION TO REMOTELY SENSE CLOUDY ATMOSPHERE BY GROUND-BASED MICROWAVE RADIOMETER*. *Progress In Electromagnetics Research [online]*. 2013(PIER13010201), s. 629-645 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.2528. Dostupné z: <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=13010201>
- [28] CANAVERO, M. a A. MURK. *RADIOMETRIC METHOD FOR EMISSIVITY RETRIEVAL IN HIGH REFLECTIVE MATERIALS*. *Progress In Electromagnetics Research [online]*. 2013(PIER13080505), s. 187-206 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.2528. Dostupné z: <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=13080505>
- [29] WANG, J. R. *Profiling Atmospheric Water by Microwave Radiometry [online]*. American Meteorological Society, 1983 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450%281983%29022<0779%3APAWVBM>2.0.CO%3B2>
- [30] PEK, Viktor. *Výzkum šíření satelitního signálu v pásmu Ka a Q v rámci experimentu Aldo Paraboni Alphasat*. Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2015. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [31] V. Pek, V. Brazda and O. Fiser, *First Ka and Q band results of atmospheric attenuation measurements using Alphasat receiver in Czech Republic*, 2016 26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Kosice, 2016, pp. 470-474. doi: 10.1109/RADIOELEK.2016.7477398.
- [32] S. Ventouras, R. Reeves, E. Rumi; F.P. Fernando, F. Machado, V. Pastoriza; A. Rocha, S. Mota, F. Jorge; A. D. Panagopoulos, A. Z. Papafragkakis, C. I. Kourogiorgas; O. Fiser, V. Pek, P. Pesice, M. Grabner; A. Vilhar, A. Kelmendi, A. Hrovat, D. D. Vanhoenacker, A. Graziani, L. Quibus; G. Goussetis, A. Martellucci, *Large Scale Assessment of Ka/Q Band Atmospheric Channel Across Europe with ALPHASAT TDP5: The Augmented Network*, EuCAP 2017.
- [33] DICKE, R. H. *A Radiometer for measuring thermal radiation at microwave frequencies*, *Physical Review*, 1946, vol. 69, p. 694 to 694.

- [34] ULABY, F. T., et al. *Microwave remote sensing: active and passive*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., Advanced Book Program/World Science Division, 1981.
- [35] EWANS, G., MCLEISH C. W., *RF Radiometer Handbook*. Dedham: Artech House Inc., 1976.
- [36] BRUSSAARD, G. *Radiometry, A Useful Prediction Tool*. Noordwijk: ESA Scientific and Technical Publ. Branch, ESTEC, NL, 1985.
- [37] MARZANO, F. S., CIMINI, D., CIOTTI, P., WARE, R. *Modeling and measurement of rainfall by ground-based multispectral microwave radiometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, vol. 43, no. 5, p. 1000-1011.
- [38] MARZANO, F. S., et al. *Bayesian estimation of precipitating cloud parameters from combined measurements of spaceborne microwave radiometer and radar*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Jan 1999, vol. 37, p. 596-613.
- [39] Randeu, W.: *The INW 11.4 GHz Radiometer Diversity Experiment*, Volume 2: Results covering the period July 1976 to June 1977. INW/TU Graz, Band 7708. 1977.
- [40] Randeu, W.: *Über Messungen der atmosphärischen Rauschtemperatur bei 11,4 GHz im Grazer Becken und die Bestimmung von Ausbreitungsparametern auf Satellitenfunkstrecken im Einzelstations-und Diversitybetrieb*. Dissertation [online]. INW/TU Graz, November 1983. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03157664>
- [41] Randeu, W., Riedler, W., Witternigg, N.: *Quadruple-site radiometric diversity measurements at 12 GHz*. Pres. Int. Symp. on Satellite Transmissions, Graz, Austria, 25-27 Sept. 1985, ESA SP-245 (Nov. 1985), S. 141–147.
- [42] Kubista, E., Randeu, W., Riedler, W., Witternigg, N.: *Radiometer diversity results (1. 2. 1983–1. 3. 1986)*. ESA/ESTEC Contract No. 5357/83/NL/GM(PB); IAS/Joanneum Research, August 1988.
- [43] Lang, R.: *Description of the envisaged propagation measurement equipment for OTS at Lustbühel/Graz/Austria*. INW/TU Graz, Band 7604. 1976.

- [44] DVORAK, P., M. MAZANEK a S. ZVANOVEC. *Short-term Prediction and Detection of Dynamic Atmospheric Effects by Microwave Radiometer. Radioengineering [online]. Společnost pro radioelektronické inženýrství, 2012, 21(4), 1060-1066 [cit. 2018-04-19]. ISSN 1210-2512. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/37212>*