

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Automatické testování rádiové stanice pro satelitní
komunikaci**

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o problematice satelitní komunikace a návrhu jednoduchého hardwaru pro testování pozemní stanice. Práce je rozdělena do dvou částí. V první části práce je popsána problematika satelitní komunikace, jako jsou orbitální dráhy, frekvenční spektrum a ztráty. Vysvětlena je i teoretická analýza rádiového spoje, technické požadavky na pozemní stanici a důležité parametry pro testování rádiové stanice pomocí navrhovaného hardwaru. V druhé části práce je rozebrána samotná realizace a testování navrhovaného hardwaru. Zde jsou popsány možnosti jeho zapojení a díky němu uskutečněné experimenty.

Klíčová slova

satelitní technika, rádiový přijímač, pozemní stanice, testovací zařízení

Abstract

This bachelor thesis is occupied with the issue of satellite communication and with a simple hardware design for testing a ground station. The thesis is divided into two parts. The satellite communication issues are described in the first part of the thesis such as orbital track, frequency spectrum and losses. A theoretical analysis of the radio contact, technical requirements on the ground station and important parameters for testing the radio communication using the designed hardware are explained in this part. In the second part of the thesis, the implementation and testing of the designed hardware are analysed. Here are described options of its connecting and executed experiments thanks to it.

Key words

satellite engineering, radio receiver, ground station, testing equipment

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Vladimír Chuman

Obsah

1	ÚVOD	9
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
2	SATELITNÍ KOMUNIKACE ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA	12
2.1	PŘEDSTAVA SATELITNÍHO SPOJENÍ	12
2.2	ORBITÁLNÍ DRÁHY	13
2.2.1	<i>Nízká oběžná dráha (LEO - Low Earth Orbit).....</i>	<i>14</i>
2.2.2	<i>Střední oběžná dráha (MEO - Medium Earth Orbit).....</i>	<i>14</i>
2.2.3	<i>Geostacionární dráha (GEO - Geostationary Orbit).....</i>	<i>15</i>
2.2.4	<i>Vysoká oběžná dráha (HEO - High Earth Orbit).....</i>	<i>15</i>
2.3	POUŽÍVANÉ FREKVENCE	15
2.3.1	<i>Elektromagnetická vlna</i>	<i>16</i>
2.3.1.1	<i>Propustnost atmosféry.....</i>	<i>17</i>
2.3.1.2	<i>Pásma satelitní komunikace</i>	<i>18</i>
2.4	ENERGETICKÝ ROZPOČET RÁDIOVÉHO SPOJENÍ	20
2.5	ZTRÁTY	26
2.5.1	<i>Atmosférické ztráty</i>	<i>26</i>
2.5.2	<i>Ztráty v ionosféře.....</i>	<i>27</i>
2.5.3	<i>Útlum volného prostoru.....</i>	<i>28</i>
2.6	TECHNICKÉ POŽADAVKY NA POZEMNÍ STANICI	29
2.7	PARAMETRY PŘENOSU	34
3	TESTOVACÍ HARDWARE PRO PŘÍJEM /VYSÍLÁNÍ.....	36
3.1	BLOKOVÉ SCHÉMA TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	36
3.1.1	<i>Funkce slabého vysílače</i>	<i>37</i>
3.1.2	<i>Ověření funkčnosti antény YAGI 436CP30</i>	<i>37</i>
3.1.3	<i>Funkce přijímače</i>	<i>38</i>
3.1.4	<i>Odporový dělič (Splitter).....</i>	<i>39</i>
3.1.5	<i>Aditivní směšovač</i>	<i>41</i>
4	ZÁVĚR.....	44
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	45

SEZNAM TABULEK	46
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	47
PŘÍLOHY	48

1 Úvod

Předkládaná bakalářská práce řeší problematiku automatického testování kvality příjmu satelitní komunikace na pozemní stanici pro amatérské služby. Jako příklad těchto služeb jsou satelity typu CubeSat obíhající na LEO drahách. Ty se ve většině případů využívají v univerzitním prostředí pro jednoduché vědecké experimenty nebo pro demonstraci nově vzniklých technologií. Cílem práce je navrhnout a následně zrealizovat jednoduché testovací zařízení, které by dokázalo fungovat ve dvou režimech. Měla by být zajištěna funkce slabého vysílače pro komunikaci s obsluhou a funkce přijímače, který dokáže ze signálu vyhodnotit stav pozemní stanice pro satelitní komunikaci. Na základě takto zjištěného stavu by dokázal v případě chyby na pozemní stanici upozornit technickou podporu, která již s kvalitním vybavením dohledá přesný zdroj problému. Zařízení by mělo být konstruováno s ohledem na co největší technickou jednoduchost. Dále by mělo odebírat co nejmenší příkon. Tím by se zajistila možnost napájení pomocí akumulátoru a tím by se zajistila přenositelnost zařízení, což by umožnilo instalaci kdekoliv, kde by bylo potřeba.

Seznam symbolů a zkratek

C	Kapacita [F]
dB	Decibel, měřítko podílu dvou hodnot
F	Frekvence [Hz]
Hz	Hertz, jednotka frekvence
L	Indukčnost [H]
RMS	Root Mean Square, efektivní hodnota
LNA	Nízko šumový zesilovač
LEO	Nízká oběžná dráha
MEO	Střední oběžná dráha
GEO	Geostacionární oběžná dráha
HEO	Vysoce eliptická dráha
TLE	Dvouřádkové elementy dráhy
GPS	Americký navigační systém
ČTU	Český telekomunikační úřad
h	výška satelitu nad zemí měřená od středu Země
re	poloměr Země
ψ	úhel svírající výška satelitu h a poloměr Země
Θ	úhel natočení proti pozemní stanici v místě kde se nachází
rs	vzdálenost mezi vysílači resp. přijímači
P_{TX}	výkon na vstupu vysílače
L_{TX}	výkon na vstupu vysílače vztažený k referenční hodnotě
P_{REF}	referenční hodnota výkonu
B_{FL}	útlum volného prostotu
G_{TX}	zisk vysílací antény
B_A	atmosférické ztráty
G_{RX}	zisk přijímací antény
G_{LNA}	zisk nízkofrekvenčního zesilovače
B_{CRX}	útlum svodu přijímače
B_M	výkonová rezerva
T_{P-ANT}	šumová teplota antény
T_{P-C}	šumová teplota kabelu
G_C	útlum kabelu
T_{P-LNA}	šumová teplota LNA
F_{LNA}	šumové číslo LNA zesilovače
T_{REF}	referenční teplota
G_{CRX}	útlum vodiče od LNA do přijímače

G_{LNA}	zisk LNA zesilovače
T_C	referenční hodnota teploty (pokojová teplota $T = 290\text{ K}$)
F_{RX}	šumové číslo přijímače
G_{LNA}	zisk LNA zesilovače
G_{CRX}	útlum spojovacího vodiče
T_{REF}	referenční teplota
k	Boltzmannova konstanta
B_N	šumová šířka pásma přijímače
SNR	odstup signál šum
NORAD	Severoamerické velitelství protivzdušné obrany
PLL	fázový závěs
A/D	analogově digitální převodník
SDR	softwarově definované rádio
SSB	modulace s jedním postranním pásmem
FM	frekvenční modulace
VCO	napětím řízený oscilátor
R	elektrický odpor [Ω]
Z	impedance [Ω]
D	dioda

2 Satelitní komunikace základní problematika

2.1 Představa satelitního spojení

Výhodou těchto systémů je jejich flexibilita, ta spočívá ve schopnostech satelitů dosáhnout na kterékoliv místo na zeměkouli a komunikovat různými způsoby, jako například osobní komunikace, kde nejsou třeba pozemní stanice. Při komunikaci mezi vzdálenými místy nahrazují drahou pozemní infrastrukturu, která by se ani ekonomicky nevyplatila.

Nevýhodou těchto technologií je zejména cena, kde prvotní náklady na vývoj a dopravu na oběžnou dráhu jsou velmi vysoké. Zpoždění signálu je v některých případech podle druhu aplikace a orbitální dráhy významný problém. To se nejvíce projevuje u satelitů na GEO drahách, kde nabývá až o několik desetin sekundy. Pokud se ale zaměříme na problematiku piko a mikro satelitů, staví se před nás další problémy a nevýhody. Zásadním problémem těchto objektů, které obíhají kolem planety Země na LEO dráze, jsou jejich omezené rozměry a hmotnost. To znamená, že zařízení by mělo být technicky co nejjednodušší s ohledem na omezené množství energie. Důraz na spolehlivost těchto systémů v dlouhodobém měřítku je omezena kosmickým zářením, které nelze efektivně stínit vzhledem k nedostatku prostoru. Tyto účinky je možno snižovat vhodně zvolenými součástkami, které lépe odolávají kosmickým vlivům. Nevýhodou je však vysoká cena, špatná dostupnost a vyšší spotřeba energie. Další problém představuje omezené množství energie. Tu získává ze solárních článků, kterou pak využívá k napájení systémů satelitu. Při přebytku energie se ukládá do akumulátoru nebo superkapacitorů. Ty jsou využívány pro napájení při letu satelitu ve stínu Země. Jmenované nevýhody se mohou promítat při komunikaci s pozemní stanicí. Pro maximální využití zisku antén musí být zajištěné zaměření vysílací resp. přijímací antény vůči protější straně tak, aby osy antén směřovaly proti sobě. Řešením by mohly být stabilizační systémy, ty jsou však nespolehlivé, provoz je složitý a těžko ověřitelný ze Země. Zároveň zabírá prostorovou hmotnost a energii, tudíž se s ním u těchto satelitů moc nesetkáme. Následkem toho pak satelit může při přeletu nad

obzorem rotovat kolem svých os, čímž dochází k úniku a výkon přijímaného signálu pak může kolísat k hodnotám, při kterých nelze realizovat přenos. Problém by se dal vyřešit vybavením satelitu všesměrovou anténou blízcí se izotropnímu zářiči, pod čímž si lze představit anténu vyzařující do všech směrů stejnou intenzitu signálu. V praxi je to však obtížně realizovatelné s určitou tolerancí zisku v řádu jednotek dB. Určení doby pro nejvhodnější příjem lze na základě TLE dat a simulačního softwaru, který pracuje s přesným časem vypočítat aktuální polohu. Zároveň software počítá i Dopplerův posun signálu. Zmíněné TLE (Two Line Elements) data, což je dvou řádkový kód čísel, kterým je popsán pohyb družic kolem Země, jsou denně aktualizována střediskem NORAD. Pomocí nich pak nastavujeme směr natočení antény u pozemní stanice.

2.2 Orbitální dráhy

Dráhy, po kterých se mohou satelity pohybovat, existuje hned několik. Satelitní orbity rozdělujeme do čtyř kategorií: nízká oběžná dráha (LEO), střední oběžná dráha (MEO), geostacionární dráha (GEO) a vysoká oběžná dráha Země (HEO).

Odpovídající orbitální výšky (nad zemským povrchem) jsou:

- LEO, 160-2 000 km
- MEO, 5 000-35 000 km
- GEO, 36 000 km
- HEO, 50 000 km

Výběr jedné z oběžných drah závisí na specifickém použití satelitu, oblasti, kde má sloužit apod. Pro televizní vysílání používáme například geostacionární dráhu, zároveň i některé z komunikačních družic rovněž používají geostacionární oběžnou dráhu. Další z družicových systémů, jako například satelitní telefony, mohou používat nízkou oběžnou dráhu. Obdobně jsou na tom systémy používané pro navigaci jako NAVSTAR nebo systémy GPS, ty také sdílejí orbity na nízké oběžné dráze Země. Existuje mnoho dalších typů satelitů, jako například meteorologické družice, výzkumné satelity a mnoho dalších. Každý bude mít svůj vlastní typ oběžné dráhy v závislosti na jeho použití.

2.2.1 Nízká oběžná dráha (LEO - Low Earth Orbit)

Tato dráha, jak již název napovídá, je nejnižší položená dráha vzhledem k vzdálenosti od zemského povrchu. Ta se řádově pohybuje od 160 km až po 2000 km od povrchu Země. Vzhledem k její malé vzdálenosti se satelity obíhající po této dráze setkávají se zbytky atmosféry, které satelit brzdí, což ovlivňuje jeho trajektorii letu. Velkou měrou zde působí stále gravitace Země, která je vzhledem k relativně malé vzdálenosti LEO drah významná. Pro stabilní let objektu na nízké oběžné dráze je zapotřebí průměrná rychlost alespoň 7,8 km/s, ta se s rostoucí vzdáleností snižuje na hodnoty okolo 6,9 km/s. Z toho vyplývá, že objekty vyskytující se na LEO drahách je třeba korigovat. Tohle si však mohou dovolit jen některé satelity. Většina z nich se vzhledem ke své velikosti, jak rozměrové, tak i ekonomické, musí obejít bez těchto systémů. V našem případě, kdy se snažíme o navázání spojení s piko-satelitem na LEO dráze, musíme brát v potaz krátkou dobu, po kterou je satelit na horizontu dostupný rádiovému spojení nad naší pozemskou stanicí. Posledním důležitým aspektem je Dopplerův posun frekvence a vlnové délky přijímaného signálu způsobený nenulovou rychlostí vůči přijímací stanici. To způsobuje kolísání frekvence. Pokud se satelit přibližuje směrem k pozemní stanici, má tzv. kladnou rychlost a kmitočet se posouvá po frekvenční ose doprava. Ve chvíli, kdy se bude satelit vzdalovat, má tzv. zápornou rychlost a frekvence se posouvá po ose doleva. Posun se dá vypočítat pomocí predikčního softwaru, který dokáže v reálném čase přepočítat posun na frekvenční ose a úměrně s tím kontinuálně nastavovat frekvenci vysílače a přijímače v průběhu spojení.

2.2.2 Střední oběžná dráha (MEO - Medium Earth Orbit)

Objekty na střední oběžné dráze se vyskytují ve vzdálenostech od 5000 do 35000 metrů nad zemským povrchem. Vzhledem k relativně velkému rozpětí hranic MEO se ale nejčastěji setkáme se satelity ve výškách okolo 20000 m. V těchto vzdálenostech se například používají navigační systémy jako GPS Glonass či Galileo. Rychlost takto vzdálených satelitů se pohybuje v okolí 3 861 m/s. To v praxi znamená, že tyto satelity se objeví nad stejným místem povrchu Země dvakrát za den. MEO dráhy jsou relativně konzistentní a dají se snadno předvídat. Díky větším vzdálenostem pokryjí satelity na MEO drahách větší plochu povrchu Země

než satelity na LEO drahách. S tím je ale spjata vzrůstající latence spojení, která roste se vzdáleností a je potřeba brát v úvahu. Někdy se také setkáme s využitím satelitů z MEO drah jako mezistupněm k drahám GEO, které jsou ještě více vzdálené vůči Zemi.[1]

2.2.3 Geostacionární dráha (GEO - Geostationary Orbit)

Geostacionární dráha ve výšce zhruba 36000 km nad zemským povrchem je zvláštní v tom, že rychlost objektů letících na této dráze odpovídá rychlosti otáčení Země. To znamená, že satelit se vůči zemskému pozorovateli jeví jako nehybný a setrvává na stejném místě. Pokud má dráha vzhledem k rovníku Země úhel natočení nula, pak tuto dráhu nazýváme geosynchronní. Velký význam má pro předpovědi počasí, kdy satelit může sledovat nepřetržitě jeho pohyb. Také se využívají u šíření televizního či rádiového signálu. Výhodou synchronní rychlosti objektů na GEO vůči Zemi je malý dopad Dopplerova jevu. Na druhou stranu je zde největší latence signálu řádově stovky milisekund a oproti předchozím drahám se zde nejvíc uplatní útlum volného prostoru, který se ale liší podle času, kdy satelit obíhá kolem Země.

2.2.4 Vysoká oběžná dráha (HEO - High Earth Orbit)

Tato dráha se nachází až za dráhou GEO. Rychlost oběhu objektů na této dráze je menší než rychlost otáčení Země. To znamená, že doba oběhu objektů je větší než 24 hodin. Využití této dráhy je malé. Většinou se jedná o experimentální družice, nebo jako vrakoviště vysloužilých družic z GEO dráhy. [7]

2.3 Používané frekvence

Pro komunikaci satelitů se zemí se používají elektromagnetické vlny, ale jen část z jejich spektra je v hodná pro průchod atmosférou. To nás limituje na relativně úzký obor frekvencí. Rozsah používaných frekvencí pro satelitní komunikaci se řádově pohybuje od desítek MHz až po desítky GHz. Použití vyšších frekvencí umožňuje využívat větší šířku pásma. Díky tomu může přenést větší objem dat. Komunikační frekvenci zpravidla určují dvě hodnoty. Up-link, neboli frekvence použitá ke

komunikaci směrem Země - satelit, a down-link pro směr satelit - Země. Nižší frekvence z používaného pásma vykazují lepší odolnost vůči atmosférickým vlivům, lépe pronikají zelení a do budov. Vyšší frekvence zas dovolují větší zisk antény pro daný rozměr. To je třeba zohlednit při volbě pracovní frekvence pro různé užití satelitu.

2.3.1 Elektromagnetická vlna

Elektromagnetická vlna je tvořena dvěma vektory. Vektorem E intenzity elektrického pole a vektorem B intenzity magnetického pole. Vektory intenzit jsou na sebe kolmé a navíc jsou kolmé i ke směru šíření.

Rychlost šíření vln je shodná s rychlostí světla, tj. $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Vlny mohou být rozděleny podle vlnových délek λ , což je parametr charakterizující prostorovou periodicitu.

Pokud známe parametr λ , pak lze snadno ze vztahu (1)

$$f = \frac{\lambda}{c} [Hz] \quad (1)$$

Kde:

c rychlost šíření světla

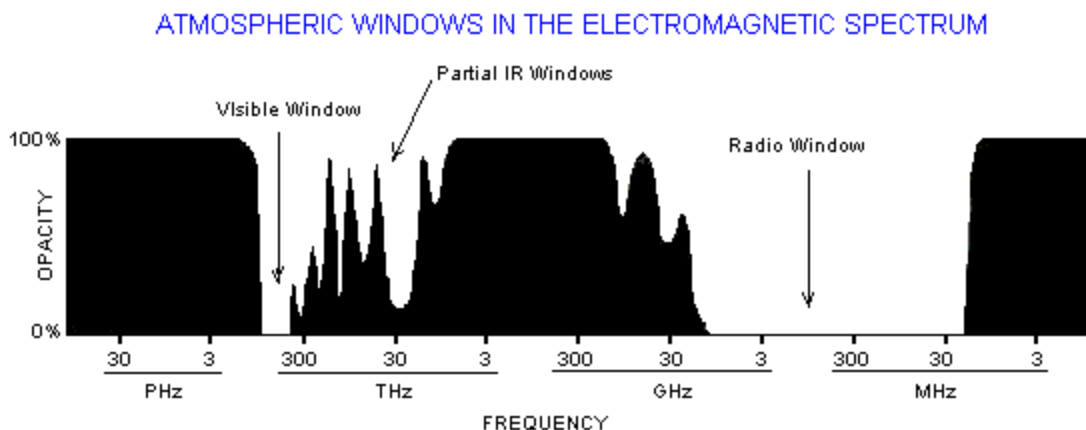
dopočítat frekvenci elektromagnetických vln. Pro představu v Tab.1 je rozdělení rádiového spektra, ve kterém se pohybujeme.

Frekvence f	1 Hz		30 kHz		3 MHz		300 MHz		30 GHz	
pásmo	ULF	ELF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
Vlnová délka λ	300 Mm		10 km		100 m		1 m		1 cm	
	100 km		1 km		10 m		10 cm		1 mm	
F ... frekvence	Hz ... hertz		m ... metr							
L ... nízká	k ... kilo		cm ... centimetr							
M ... střední	M ... mega		mm ... milimetr							
H ... vysoká	G ... giga									
V ... velmi	T ... tera									
U ... ultra										
S ... super										
E ... extrémně										

Tab. 1 Přehled rozdělení frekvencí rádiového pásma

2.3.1.1 Propustnost atmosféry

Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly, ne všechny frekvence z elektromagnetického spektra se hodí pro komunikaci procházející atmosférou a ionosférou. Reálně existují pouze dvě oblasti ve spektru, které jsou vhodné. První oblast je všem velmi dobře známá, je to viditelná část elektromagnetického spektra, a druhá je rádiová oblast od 30 MHz až po několik desítek GHz. Nicméně i v této oblasti nejsou absolutně všechny frekvence použitelné. Spodní část rádiového spektra, řádově kolem 30 MHz, je ve výškách kolem 200 až 500 km nad zemí a absorbuje či se odráží od ionosféry. Pokud budeme naopak mluvit o horní části spektra, kolem 30 GHz, tak se na těchto kmítočtech budeme setkávat v nižších vrstvách atmosféry s útlumem od molekul kyslíku, vodních par a těsně nad povrchem to bude pak zeleň a zástavba.



Obr. 1 Propustnost atmosféry v závislosti na frekvenci [4]

2.3.1.2 Pásma satelitní komunikace

Vzhledem k tomu, že rádiové spektrum není nekonečné a satelitních služeb stále přibývá, je stále větším problémem vzájemné nerušení signálů mezi sebou. V České republice má zodpovědnost za rádiové frekvenční pásmo Český telekomunikační úřad, zkráceně ČTU. Ten přiděluje licence soukromým subjektům na komerční využití. Existují také pásma, která jsou nelicencovaná, jejich povolený způsob použití v ČR se dá nalézt na ČTÚ v dokumentech Veřejného oprávnění. Pro satelitní komunikaci jsou zde ale příliš nízké výkony. Proto většina univerzitních a malých experimentálních družic, jako PilsenCUBE, využívá licencované radioamatérské pásmo, které je sice licencované, ale získání licence je relativně snadné. Výkonové limity jsou zde mnohonásobně vyšší, je ale nutné splňovat všechny podmínky radioamatérské komunikace (definované modulace, volací značky, definovaný protokol spojení,...). Dále je pro představu rozdělení používaných kmitočtových pásem používána při satelitní komunikaci. [2]

- Pásmo VHF (136 až 270 MHz)

Toto pásmo bylo využíváno hojně v minulosti různými typy družic. V současnosti zde operují převážně meteorologické družice a služby s malým datovým tokem. Nachází se zde i pásmo 145 -146 MHz využívané pro amatérskou satelitní službu. VHF využívá armáda různých zemí pro své účely. Ještě před nástupem moderních

navigačních systémů, jako například GPS, zde operovaly ruské a americké satelity pro určování polohy zejména lodí

- Pásmo UHF (400 až 470 MHz)

Kmitočty UHF využívají meteorologické satelity, ale pro nás je nejdůležitější část UHF, která je přidělena amatérské satelitní službě v rozmezí 432 - 438 MHz. Tyto frekvence používáme i při řešení problematiky spjaté s touto bakalářskou prací. Vysílací kmitočet je 435 MHz.

- Pásmo L (1 až 2 GHz)

Toto pásmo je dominantou služeb GNSS. Pod tím si můžeme představit družicové polohové systémy, jako jsou GPS (USA), Glonass (Ruská federace), Galileo (EU) nebo Beidou (Čínská lidová republika). Také se zde realizuje služba Sarsat/Copsat, což je detekce a vyhledávání nouzových signálů. Tato služba se realizuje za pomoci ruských a amerických meteorologických družic.

- Pásmo S (2 až 3 GHz)

Využití některými meteorologickými družicemi plus některými komunikačními družicemi. Hojně toto pásmo využívá americká NASA například pro komunikaci s ISS.

- Pásmo C (3.4 až 6.4 GHz)

Zde primární využití najdeme u FSS, což je fixní satelitní služba. Ta zajišťuje distribuci televizního nebo rozhlasového signálu a to i v reálném čase.

- Pásmo X (8 až 9 GHz)

To se využívá zejména pro kosmický výzkum, výzkum hlubokého vesmíru, ale velkou část zde zabírají armádní aplikace pro řízení obrany a podobně. Pásmo X se užívá i pro řízení, jak na moři, tak ve vzduchu. [8]

2.4 Energetický rozpočet rádiového spojení

Při návrhu rádiového spoje je jednou ze základních bodů postupu sestavení radiokomunikační rovnice, pomocí níž se dozvíme, jestli je na daných parametrech spojení realizovatelné. Jednak zahrnuje souvislosti mezi vyzařovaným výkonem vysílače a výkonem přijatým na přijímací straně. Dále zahrnuje také další podstatné faktory, které ovlivňují spojení, ať už to jsou faktory vznikající v obvodech přijímače či vysílače, nebo faktory působící na spojení přímo v přenosové cestě. Velmi dobře se dá aplikovat na kosmické rádiové spojení na rozdíl od pozemního spojení, jelikož se kosmické spojení podobá idealizovanému přenosovému prostředí, kde je signál pouze tlumen a ovlivňován Gaussovským šumem.

- Výkon užitečného signálu

V první řadě musíme určit výkonovou úroveň signálu na výstupu koncového zesilovače vysílače. Zde hraje roli P_{TX} , což je výkon odevzdaný na vstupu vysílací antény, který je vztažený k referenční hodnotě. Výslednou úroveň dostaneme dosazením do (2).

$$L_{TX} = 10 \log \left(\frac{P_{TX}}{P_{REF}} \right) [dB] \quad (2)$$

Kde:

$$P_{REF} = 1 [mW]$$

- Útlum volného prostoru

Dalším důležitým faktorem je útlum volného prostoru, který dostaneme dosazením do (3).

$$B_{FL} = 20 \log \left(\frac{4\pi f D}{c} \right) \text{ [dB]} \quad (3)$$

Kde:

f frekvence [Hz]

D .. vzdálenost [m]

c konstanta rychlosti světla [m/s]

Výslednou výkonovou hodnotu signálu před demodulátorem získáme součtem resp. rozdílem všech zisků a útlumů přenosové trasy .

- G_{TX} zisk vysílací antény

Udává, kolikrát větší bude intenzita pole vysílací antény oproti měrné anténě udávané v jednotkách dB.

- B_A atmosférické ztráty

Projevují se zejména ve spodních vrstvách atmosféry (déšť, mlha, smog), tyto ztráty se mohou pohybovat v řádu jednotek až desítek decibel, záleží i na zvolených kmitočtech, na kterých se mohou ztráty projevovat v menší či větší míře. V našem případě bude na používaných kmitočtových pásmech útlum (cca. 1dB). Samozřejmě pokud se budeme bavit o spojení satelitním, pak musíme řešit ještě další problém, a to je průchod signálů dvěma vrstvami, a to ionosférou a troposférou. Ty samozřejmě interagují se signálem a zhoršují podmínky pro přenos.

- G_{RX} zisk přijímací antény

Stejný problém, jako u zisku vysílací antény, jen uvažujeme obrácený směr.

- G_{LNA} zisk nízkošumového zesilovače (v našem provedení 15dB)
- B_{CRX} útlum svodu kabelu mezi LNA a přijímačem
- B_M výkonová rezerva (cca. 10 dB)

Nakonec výsledný užitečný výkon spočteme dosazením parametrů do rovnice (4).

$$L_{RX} = L_{TX} + G_{TX} - B_{FS} - B_A + G_{RX} + G_{LNA} - B_{CRX} - B_M \text{ [dB]} \quad (4)$$

- Šumová teplota systému

Šumová teplota systému zahrnuje ekvivalent šumového výkonu vznikajícího v jednotlivých obvodech bloků systému. Tepelný šum vzniká vlivem pohybu elektronů v obvodech, to znamená, že pokud bychom chladili obvody na teplotu 0 K, tzn. absolutní nula, tak lze eliminovat šum, jelikož při této teplotě se zastaví pohyb elektronů. Projevuje se jako náhodný signál, který negativně ovlivňuje užitečný signál, zejména limituje slabé signály, které jsme na přijímací straně schopni přijmout. Značení teploty v Kelvinech se používá kvůli absolutnosti stupnice. Výslednou hodnotu dostaneme obdobně jako u užitečného signálu v předchozím bodě podle rovnice (5)

$$T_{SYS} = T_{P-ANT} + T_{P-C} + T_{P-LNA} + T_{P-CRX} + P_{P-RX} \text{ [K]} \quad (5)$$

kde jednotlivé šumové teploty znamenají:

- T_{P-ANT}

Tento parametr zde reprezentuje šumovou teplotu antény T_{ANT} . Ta je dána závislostí vyzařovacích charakteristik antény na jasové teplotě okolního prostoru. Roste i s různým elevačním úhlem. Tuto hodnotu musíme ještě vynásobit bezrozměrným ziskem, respektive útlumem G_C , který reprezentuje krátký kabel mezi anténou a LNA zesilovačem. Tím dostaneme výkon šumu v bodě za LNA. Do tohoto bodu se přepočítávají všechny příspěvky (6).

$$T_{P-ANT} = T_{ANT} * G_C [K] \quad (6)$$

- T_{P-C}

Již zmiňovaný kabel spojující anténu s LNA zesilovačem, se kterým musíme počítat jako se zdrojem šumu, kde vzhledem k úrovni užitečného signálu je jeho význam nezanedbatelný. Předpokládáme i možnost vystavení vodiče vyšší teplotě T_C . Jelikož je vztah přepočítáván na začátek vodiče, musíme proto celý vztah vynásobit ziskem, resp. útlumem G_C (7).

$$T_{P-C} = \left(\frac{1}{G_C} - 1 \right) * T_C * G_C [K] \quad (7)$$

- T_{P-LNA}

Je to další šumový příspěvek v systému, způsobuje LNA zesilovač (8).

$$T_{P-LNA} = (F_{LNA} - 1) * T_{REF} [K] \quad (8)$$

Kde :

F_{LNA} šumové číslo LNA zesilovače

T_{REF} referenční teplota

- T_{P-CRX}

Tento šumový příspěvek je od kabelu, který je mezi LNA zesilovačem a přijímačem. Jelikož má LNA určitý zisk, v nadcházejících blocích se díky tomu šum projeví o to méně (9).

$$T_{P-CRX} = \left(\frac{1}{G_{CRX}} - 1 \right) * \frac{T_C}{G_{LNA}} [K] \quad (9)$$

Kde :

G_{CRX} útlum kabelu od LNA do přijímače

G_{LNA} zisk LNA zesilovače

T_C referenční hodnota teploty (pokojová teplota $T = 290 \text{ K}$)

- T_{P-RX}

Poslední šumový příspěvek je od přijímače, který ovlivňuje jeho šumové číslo F_{RX} . Hodnoty opět vylepšuje zesilovač LNA, ale tentokrát nesmíme zapomenout součin této hodnoty s hodnotou od vodiče z LNA do přijímače, což působí proti účinkům zesilovače (10).

$$T_{P-RX} = (F_{RX} - 1) * \frac{T_{REF}}{G_{LNA} * G_{CRX}} [K] \quad (10)$$

Kde:

F_{RX} šumové číslo přijímače

G_{LNA} zisk LNA zesilovače

G_{CRX} útlum spojovacího kabelu

T_{REF} referenční teplota

Dosažením do rovnice šumové teploty systému (5) dostaneme hodnotu, která je vztahena ke vstupu LNA zesilovače, vyjádřenou v Kelvinech.

- Výkon šumu

K tomu, abychom dostali šumový výkon vztažený k vstupu přijímače, musíme převést šumovou teplotu na výkon signálu vztažený k šumové šířce pásma přijímače (11).

$$P_{N-LNA} = k * T_{SYS} * B_N [W] \quad (11)$$

Kde:

k Boltzmannova konstanta

B_N šumová šířka pásma přijímače

Nyní nezbyvá než přepočítat hodnotu na vstupu přijímače do jednotek dB.

To provedeme následovně (12).

$$L_{N-RX} = 10 \log \left(\frac{P_{N-LNA}}{P_{REF}} \right) [dBm] \quad (12)$$

Kde:

$P_{REF} = 1[mW]$ referenční hodnota, ke které je výsledek vztažený

- Odstup signál šum S/N

Výsledný odstup signálu od šumového pozadí pak získáme jednoduchým odečtením užitečného výkonu L_{RX} a výkonu šumu přepočítaného na decibelovou míru (13).

$$SNR = L_{RX} - L_{N-RX} [dB] \quad (13)$$

Výsledek nesmí vyjít záporné hodnotě. V tom případě nám užitečný signál poklesne pod úroveň šumu. Pro bezchybný příjem (dle použité modulace) je nutné

mít dostatečně velkou rezervu signálu nad úrovní šumu. Jako spodní hranici pro ještě teoreticky realizovatelný přenos, která ovšem závisí na druhu použité modulace, jsme brali 3dB.

2.5 Ztráty

Vznikají vlivem průchodu signálu prostředím. U satelitní komunikace řešíme zejména útlum volného prostoru z anglického názvu „free-space path loss FSPL“, který má vlivem rozptylu vlny při cestě na velkou vzdálenost obrovský význam. Útlum vlivem průchodu signálu atmosférou je zanedbatelný.

2.5.1 Atmosférické ztráty

Atmosféru, aneb plynný obal Země, lze rozdělit na několik oblastí, přičemž pro problematiku satelitní komunikace jsou významné jen dvě. První je známá pod názvem troposféra, druhá důležitá část se nazývá ionosféra.

- Ztráty v troposféře

Je to oblast, která má rozsah od zemského povrchu a dosahuje výšek v závislosti na vzdalování od rovníku směrem k pólům od 18 až k 9 km. Dolní údaj platí pro polární oblasti. Ztráty v troposféře vznikají z důvodu absorpce či rozptylu signálu vlivem molekul plynu resp. kyslíku, vodními parami, tzn. mraky, a i vlivem dešťových kapek.

- Absorpce plyny

Plyny, respektive vodní páry a kyslík, způsobují největší útlum při různých frekvencích. Vodní páry ovlivňují nejvíce kmitočty okolo 22 GHz, kyslík má vrcholný útlum v rozmezí 53 až 66 GHz a také kolem kmitočtu 120 GHz. Samozřejmě velikost útlumu závisí na množství molekul, které může být v různých výškách rozdílné.

- Absorpce deštěm

Útlum vlivem dešťových kapek je ve většině případů mnohem větší než absorpce plyny. Vodní kapky rozptylují rádiové vlny do všech směrů neohledně na velikost kapek, které mohou být srovnatelné nebo menší než vlnová délka signálu. Nejvýraznější útlum vykazují vlnové délky v řádu milimetrů, tzn. GHz, délky v řádech centimetrů, tzn. MHz, tímto útlumem tolik postižené nejsou.

- Absorpce mraky

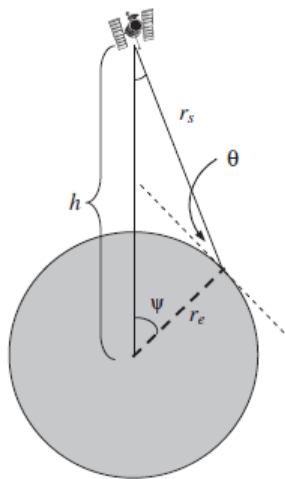
Mraky, respektive miniaturní kapky vody, ať už v kapalném či pevném skupenství, si lze představit velikostně s poloměry od 100 mikronů do setin centimetru. Podstatou těchto ztrát je procentuální množství vody v mracích. Útlum roste se zvyšující se frekvencí od 10 do 30 GHz. Bezpečně ho lze zanedbat při kmitočtech 6 GHz a méně.

2.5.2 Ztráty v ionosféře

Ionosféra je část atmosféry tvořená neutrálním plynem, která se vyskytuje ve výšce 50 km a sahá až do vzdálenosti 400 km nad povrchem Země. Za těmito výškami obsahuje sluneční záření nebezpečné UV spektrum světla, které při dopadu ionizuje molekuly plynu. Produktem jsou pak kladně nabitě ionty a záporné elektrony. Tím se ionosféra chová pro určité rádiové spektrum jako vodivá vrstva a odráží je zpět. Ovšem i spektrum, které projde ionosférou, je také ovlivněné. Efekt, který působí na tyto kmitočty, se nazývá scintilace částic. Ta se projevuje jako změny amplitud a fáze signálu. V některých případech ovlivňují i polarizaci rádiové vlny. Příčinou je rozdílná hustota elektronů. Velikost scintilací závisí i na umístění pozemní stanice na zemském povrchu, cyklu slunečních skvrn, úrovni geomagnetické aktivity a v neposlední řadě i na denním čase (den/noc). Účinky se s rostoucí frekvencí snižují a nad frekvence o 2 GHz se takřka neprojevují. [9]

2.5.3 Útlum volného prostoru

Ztráty, které byly představeny v předchozím textu a které se uplatňují při frekvencích pohybujících se v oblastech desítek GHz, jsou pro nás zanedbatelné. Jelikož realizujeme přenos na kmitočtu 430 MHz, tak pro nás největší útlum bude představovat útlum volného prostoru, výše zmíněné lze zanedbat. Útlum volného prostoru závisí na vzdálenosti mezi pozemní stanicí a satelitem umístěným na jedné ze tří orbitálních drah a na frekvenci, respektive vlnové délce. Vzdálenost satelitu je dána jako funkce výšky nad povrchem Země a úhlu natočení osy antény vůči ose antény pozemní stanice.[1]



Obr. 2 Znárodnění geometrie vzdálenosti satelitu [5]

Rovnice (14) pro výpočet vzdálenost mezi vysílači:

$$r_s = \frac{h \sin(\psi)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)} \quad [m] \quad (14)$$

Kde:

hvýška satelitu nad zemí měřená od středu Země

r_e poloměr Země

ψ úhel, který svírá výška satelitu h a poloměr Země r_e

Θ úhel natočení proti pozemní stanici v místě, kde se nachází

r_s vzdálenost mezi vysílači, resp. přijímači

Ztráty se projevují jako útlum energie elektromagnetické vlny vlivem průchodu prostředím.

2.6 Technické požadavky na pozemní stanici

Pozemní stanice má několik nejdůležitějších částí. Konec, respektive začátek, přijímacího/vysílacího řetězce je tvořen anténou pro vyzařování a příjem elektromagnetické vlny, která je opatřena dvouosým pohonem, který je řízen polohovým kontrolérem, který přijímá povely z řídicího počítače. Hned za anténou je umístěn LNA, což je nízkošumový zesilovač, z něhož vede signál do radia, které zpracovává (demoduluje) přijatý signál. To lze nastavovat buď ručně, nebo přes sériový port z řídicího počítače. Tyto části řetězce jsou propojeny koaxiálním kabelem s konektory. Signál z radia je dál zpracováván v jednotce SDR. Ta slouží pro zpracování dat s vysokou kapacitou přijímaných v pásmech satelitní techniky a propojených s řídicím počítačem přes sériový port, který pak dále pracuje s přijatými daty.

- Anténa

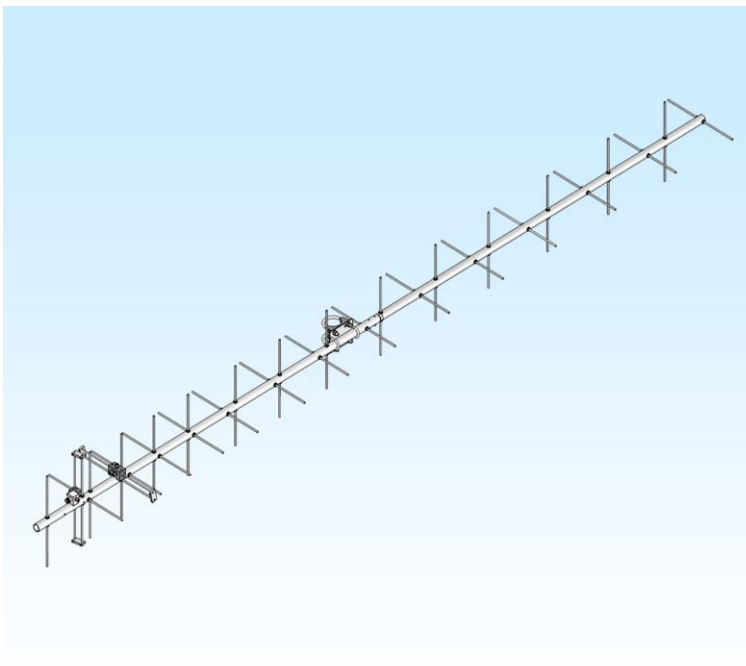
Elektrické zařízení sloužící pro přeměnu elektrické energie na rádiové vlny a naopak. Existuje mnoho typů antén. Některé typy antén jsou vyrobeny tak, aby byly schopny přijímat široké frekvenční spektrum, těm se říká širokopásmové. Pro potřeby satelitní techniky se ale hodí antény pracující jen v úzkém pásmu. Tyto typy antén, jež jsou vhodné pro stacionární montáž, mají vysoký zisk v určitém směru a jsou opatřeny polohovacím zařízením. To umožňuje využít zisk pohyblivých protistanic s omezenými vysílacími výkony.

Pro projekt pozemní stanice PilsenCUBE byla použita anténa typu YAGI 436CP30. Tento typ vhodný pro satelitní komunikaci je určený pro amatérská rádiová pásma, respektive 435 MHz, což odpovídá vlnovým délkám 70 cm. Anténa má křížovou konstrukci a to kvůli tomu, aby byla schopna přijímat jak vertikálně, tak i

horizontálně polarizované signály. Pro představu jsou v níže uvedené Tab. 1 parametry antény.

Typ	436CP30
Frekvenční rozsah	432 - 440 MHz
Zisk	14 dB
Úhel vyzařování	30°
Impedance	50 Ω

Tab. 2 Parametry antény



Obr. 3 Anténa YAGI463CP30 [6]

- Polohování antény

Vzhledem rychlému pohybu objektů (cca 10 až 20 min. doba letu od jeho východu do jeho západu) na LEO drahách a úzkému úhlu vyzařování, resp. příjmu, musíme směr osy antény neustále korigovat vůči pozici satelitu. Samotný pohyb zajišťuje dvouosý rotátor AlfaSpid Big-RAS. Polohování je programovatelné pracující jak v automatickém, tak v manuálním režimu. Pohyb je zajištěn pomocí dvou šnekových

převodů uzavřených v kovovém pouzdru. Napájení 12-24 V, kde při 12 V se dokáže otočit o 360° za 2 minuty. Přesnost zaměření je 1°. Celý pohon je řízen polohovým regulátorem MD-01, který zvyšuje rychlost a spolehlivost zaměření antény. Regulátor je propojen přes sériový port s řídicím počítačem. Ten posílá instrukce k nastavení polohy. Instrukce jsou generovány softwarem pro předpověď polohy satelitu na oběžné dráze.

- LNA

Zesilovač s nízkým šumem je typ zesilovače používaný v komunikačních technologiích pro zesilování velmi slabých signálů. Ve většině případů je umístěn hned za anténou. Použitím tohoto zesilovače zvýšíme úroveň šumu tzn. SNR, na výstupu LNA bude větší než na vstupu, ale v následujících stupních řetězce bude zajištěno, že další bloky nebudou SNR více zhoršovat. Tranzistory v zesilovači jsou provozovány v režimech vysokého proudu, což není energeticky moc účinné. Relativní množství šumu se tímto režimem bohužel opět zvýší. Zlepší se ale linearita zesilovače, což znamená, že klesne zkreslení, a tím se sníží intermodulační produkty v přijímaném signálu, což je kompromis nutný pro stanici ve městě.

- Propojení bloků systému

Anténa a rádio musejí být fyzicky propojeny. To je zajištěno pomocí koaxiálního kabelu. U pozemní stanice PilsenCUBE je použit koaxiální kabel RG 213 a to v délce 50 metrů. Při průchodu signálu kabelem vzniká útlum. Pro představu jsou hodnoty útlumu pro kabel RG 213 uvedeny v Tab. 2.

Útlum RG 213	
Frekvence	Útlum v dB/100m
100 MHz	6,9 dB
200 MHz	9,8 dB
435 MHz	15,8 dB
1000 MHz	25,7 dB
2000 MHz	41,6 dB
3000 MHz	58,5 dB

Tab. 3 Útlum kabelu RG 213

Kdybychom uvažovali systém bez LNA, odstup SNR na přijímači by se zhoršil o hodnotu stejnou, jako je útlum kabelu, čili skoro o 8 dB. Kabely jsou zakončeny konektory, kde každý konektor představuje útlum 1dB.

- Radiostanice

Radiostanice jsou známé spíše pod anglickým názvem „transceiver“ a je to zařízení pro vysílání a příjem signálu. Na pozemní stanici PilsenCUBE se používá ICOM IC-910H. Univerzální transceiver vhodný pro práci v pásmech VHF a UHF. Dokáže modulovat a demodulovat signál ve frekvenční oblasti, tj. FM, ale i v SSB (Single Side Band), což je modulace s jedním postranním pásmem. Na frekvencích okolo 435 MHz můžeme počítat s úrovní vysílaného signálu na hodnotách kolem 48 dBm. Nastavení lze provádět jednak ručně nebo po propojení s řídicím počítačem pomocí něho.

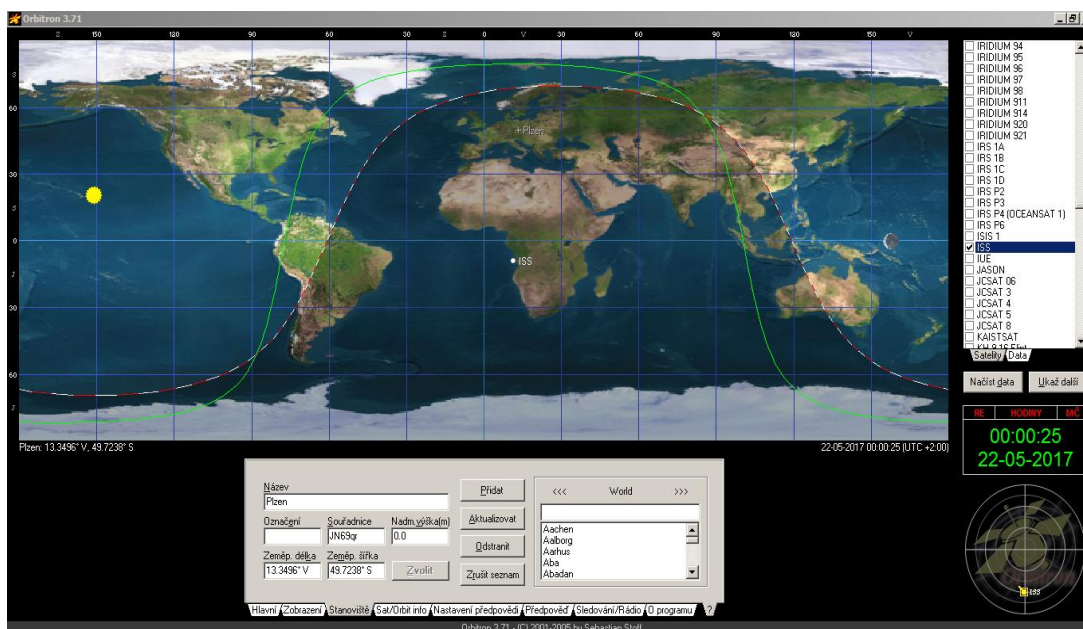
- SDR

SDR, neboli softvérově definované rádio, je zařízení, které vzniklo za účelem nahradit analogovou část přijímacího systému (modulátory, demodulátory, zesilovače, filtry, směšovače, detektory a další) digitálních technologií. Zařízení lze pak snadno přenastavovat pro různé kmitočty a technologie přenosu dle zvoleného softwaru. V dnešní době je ovšem SDR limitováno rychlostí A/D převodníků

signálu, které nestačí vysokým frekvencím. To se řeší připojením analogové části rádia, které provede konverzi frekvence do základního pásma. Signál zpracovaný tímto blokem pak putuje přes sériovou linku do řídicího počítače.

- Software pro určování polohy satelitů

Predikčních softwarů pro výpočet polohy satelitu existuje celá řada. Pro satelitní komunikaci v pásmech VHF nebo UHF zaměřenou na amatérskou komunikaci jsme použili volně šiřitelný program ORBITRON - software pro sledování satelitů využívaný nejen amatéry, ale i odborníky na počasí či jinými uživateli satelitní komunikace. Program dokáže v reálném čase (nebo i na několik dní dopředu) stanovit polohu družice nad obzorem. Výpočet těchto dat probíhá v sekundových intervalech. Přes softwarové a hardwarové rozhraní je nastavována frekvence vysílacího a přijímacího směru transceiveru. Zároveň jsou posílány data pro nastavení azimutu a elevace anténního systému. Software pracuje s SGP algoritmy.



Obr. 4 Prostředí softwaru Orbitron

2.7 Parametry přenosu

Pro vyhodnocování kvality přenosu nebo kvality přijímacího či vysílacího řetězce je třeba sledovat některé důležité parametry, které lze s navrhovaným zařízením měřit.

- **Zkreslení**

Ke zkreslení dochází, pokud se budou měnit přenosové vlastnosti přijímače s frekvencí nebo s okamžitou hodnotou amplitudy přenášeného signálu. Zkreslení lze rozdělit do několika podskupin.

Frekvenční zkreslení (lineární)

Chyba frekvence vzniká vlivem chyby kmitočtové reference transceiveru, případně vážnou poruchou v PLL.

Frekvenční offset

Chybu způsobenou frekvenčním offsetem lze zjistit porovnáním přijatého signálu s referenčním kmitočtem, z čehož lze vyhodnotit offset.

Útlumové zkreslení

Útlumové zkreslení je následkem toho, že útlum, respektive zesílení přijímače, není stejný při všech frekvencích.

Zkreslení signálu v přijímací nebo vysílací cestě

Amplitudové zkreslení

Amplitudové zkreslení si lze představit jako poměr efektivní hodnoty výstupního napětí přijímače k efektivní hodnotě napětí na vstupu, které se mění s amplitudou.

Harmonické zkreslení

Vzniká vlivem vyšších harmonických složek na výstupu přijímače při vstupním sinusovém signálu. Vyjadřuje se poměrem efektivní hodnoty sumy vyšších harmonických složek na výstupu ku celkové hodnotě efektivního napětí na výstupu.

- **Zisk antény**

Efektivní vyzářený výkon

Efektivní vyzářený výkon je vyzářený výkon za anténou, který lze změřit. Musíme však být na správném místě a v dostatečné vzdálenosti v prostoru bez překážek a ploch způsobujících odrazy. Pokles výkonu může být způsoben například špatnými konektory, defektem na anténě nebo dalšími částmi řetězce.

Chyba zaměření

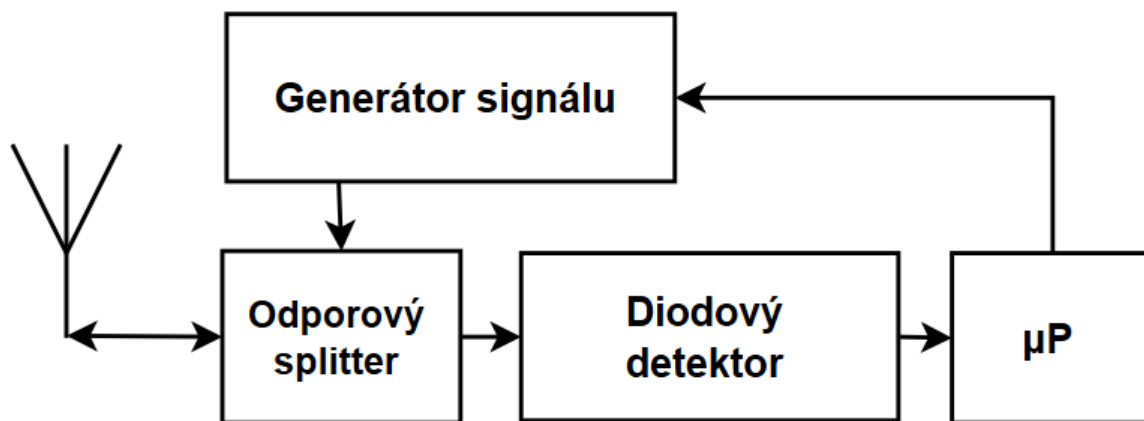
Vzhledem k použití úzce směrových antén, které vysílají v úzkém svazku (30°) a přijímají v malém rozpětí, je možné dopustit se chyby zaměření. To se projeví na poklesu výkonové úrovně signálu. Způsobeno to může být například vlivem offsetu pohonu nebo pootočením závěsu antény. Obojí lze snadno zjistit měřením zisku antény při jejím pootáčení. V naměřených hodnotách se pak najde maximum ve změněném úhlu, přičemž klesá citlivost v přijímacím směru.

3 Testovací hardware pro příjem/vysílání

Při navrhování jednoduchého zařízení pro testování pozemní satelitní stanice určené pro radioamatérskou činnost se především bralo v potaz pár hlavních faktorů. A to, aby zařízení bylo co nejjednodušší, sestavené z co nejmenšího množství součástek za co nejmenší možnou cenu. To proto, aby si kdokoliv a kdekoliv mohl zařízení vyrobit. Zároveň by zařízení mělo odebírat co nejmenší příkon, aby bylo možné provozovat zařízení na baterii. Díky tomu by se dalo umístit na vzdálené místo, kde by fungovalo bez ohledu na vnější vlivy. Mělo by umožňovat funkci jednoduchého vysílače a při co nejmenší změně konfigurace i zvládnout roli přijímače resp. detektoru signálu. V této konfiguraci by mělo zařízení dokázat požadovanou frekvenci demodulovat z nosné a poskytnout takto zpracovaný signál na výstupu. Ten by mohl být podroben analýze, ze které by se dal odvodit stav přijímacího řetězce. Na základě těchto dat by se dala odhadnout potřeba technického zásahu na zařízení. Detaily závady se poté upřesní pomocí sofistikovanějšího postupu nebo techniky.

3.1 Blokové schéma testovacího zařízení

Blokové schéma zařízení pro příjem a vysílání. Ve funkci slabého vysílače lze pomocí mikropočítače řídit generátor signálu. Ten uvnitř obsahuje obvody PLL, VCO, referenčního kmitočtu a digitální modulátor (ADF7012). Modulovaný signál pomocí odporového splitteru (viz podkapitola 3.1.4 Odporový dělič (Splitter)) posíláme na anténu. Ve funkci přijímače přivádíme na vstup odporového splitteru signál z přijímací antény a z VCO, kde se smísí a dál následuje nelineární prvek diodový detektor, který spolu se spilitterem tvoří druh aditivního směšovače. Na jeho výstupu pak můžeme užitečný signál analyzovat pomocí mikropočítače.



Obr. 5 Blokové schéma testovacího zařízení

3.1.1 Funkce slabého vysílače

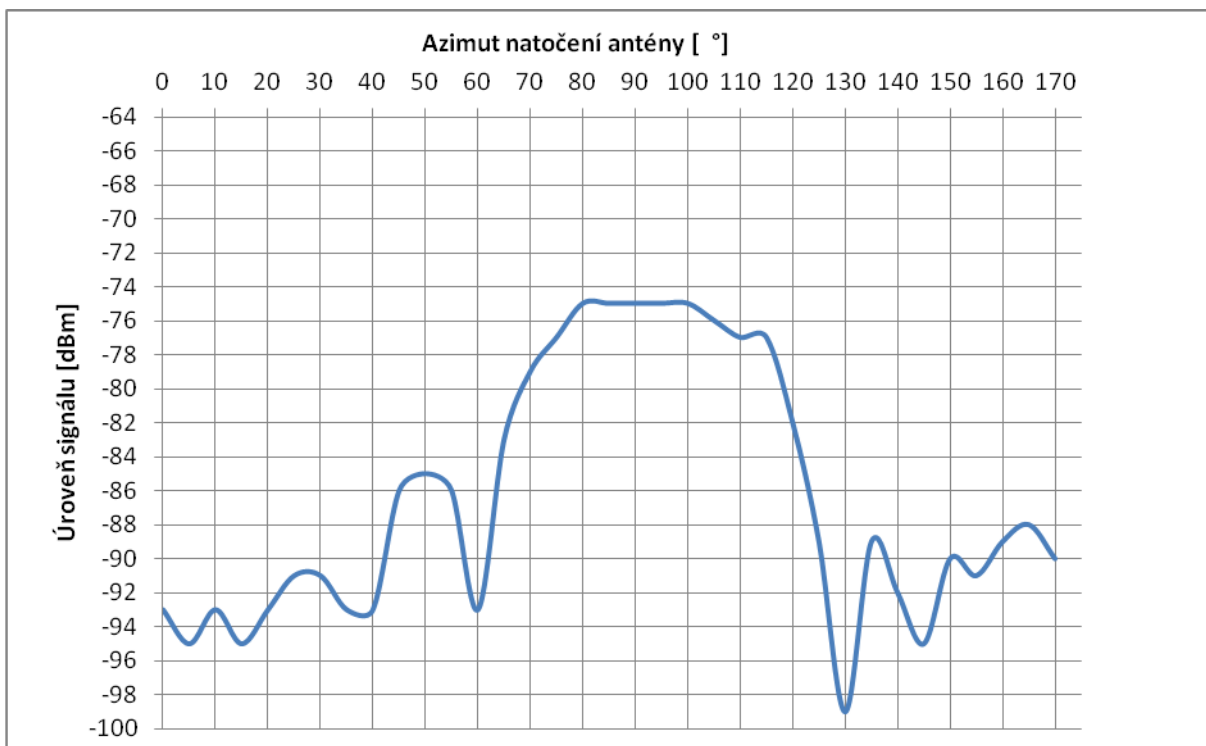
Při testování funkce slabého vysílače jsme v městské zástavbě pomocí zařízení vysílali harmonický signál o frekvenci 1 kHz, který byl namodulován na nosnou vlnu 435 MHz. V první řadě byl dle podkapitoly 2.4 vypočítán energetický rozpočet rádiového spoje. Tím byla teoreticky ověřena realizovatelnost spoje. Problém představoval omezený vysílací výkon vysílače. Ten byl v našem provedení 10 mW. Na přijímací straně byl vysílaný signál analyzován pomocí spektrálního analyzátoru. Z něj byly odečítány výkonové úrovně jednotlivých složek signálu. Byly zahrnuty i parazitní složky. Tím byla ověřena jak teoreticky, tak i prakticky funkčnost vysílače s velmi dobrým odstupem signál - šum SNR.

Toto měření jsme využili i pro testování schopnosti antény pozemní stanice přijímat signály v požadovaném směru. Čili otestovali jsme vlastnosti rozebrané v předchozí kapitole, jako byly chyba zaměření, efektivní vyzářený výkon.

3.1.2 Ověření funkčnosti antény YAGI 436CP30

Testování funkčnosti antény spočívalo v tom, že jsme vyhodnocovali na spektrálním analyzátoru výkonovou úroveň harmonického signálu v závislosti na úhlu natočení antény od přímého směru vysílání. Signál měl vlivem parazitní modulace několik složek. Měřili jsme buďto úroveň signálu jako celek, nebo jsme

sčítali výkony složek. Pozorovali jsme, při jakém azimutu natočení bude signál ještě dostatečně daleko od šumového pozadí pro příjem. Hodnoty úrovně signálu jsme měřili vždy s vychýlením 90° do pravého i do levého směru od osy přímého zaměření.



Graf č. 1 Závislost výkonové úrovně signálu na úhlu natočení antény

Graf č. 1 zobrazuje azimut natočení antény v závislosti na výkonové úrovni přijatého signálu. Vysílací anténa byla orientována z pohledu přijímače na východ, čemuž odpovídalo natočení 85° na grafu. Při 0° natočení směřovala anténa na sever. Postupným nastavováním azimutu jsme otestovali anténu. Z grafu je zřejmý hlavní lalok 80° až 110° pro příjem, kde má anténa největší zisk. To i odpovídá technickým parametrům antény, kde výrobce uvádí vyzářovací úhel o velikosti 30° .

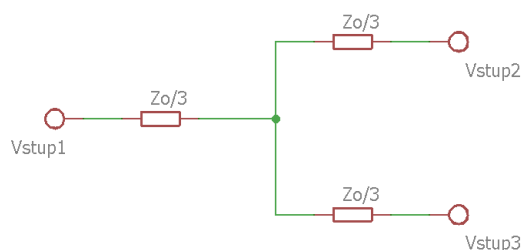
3.1.3 Funkce přijímače

Zařízení pro příjem signálu, respektive pro jeho detekci, byl vytvořen z odporového splitteru a diodového demodulátoru. Funkčnost takto zapojeného zařízení jsme opět

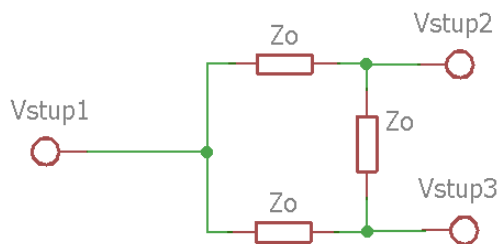
testovali jako v případě slabého vysílače, kde jsme nejprve provedli energetický rozpočet spoje. Brali jsme v potaz jednoduchost přijímacího zařízení. Anténu s nulovým ziskem nevybavenou LNA. I přesto jsme došli k velké hodnotě odstupe signálu od šumu S/N , a to díky vysokému vysílacímu výkonu, který činil 50 W. V případě menších vysílacích výkonů z podstatně větších vzdáleností, jako je vesmír, by S/N hrál velký problém. Například v případě, že by se v okolí objevil nějaký zdroj rušení. To by se projevilo tím, že by vzrostl šum při stejné úrovni signálu. To by mohlo mít za následek až nerealizovatelné spojení.

3.1.4 Odporový dělič (Splitter)

Odporové děliče výkonu v našem případě signálu jsou velmi snadno realizovatelné vzhledem k jejich konstrukční jednoduchosti. Samotný dělič má velmi malé rozměry a tím, že je tvořen jen rezistory, je velmi spolehlivý. Pracovní rozsah ve kmitočtovém spektru je obrovský, kmitočet, při kterém se parametry zhoršují, je cca 3 GHz. Dělič pracuje již od nulových frekvencí (DC). Nevýhoda těchto dvoucestných pasivních děličů signálu je reálná ztráta výkonu na každé cestě o velikosti 3 dB. To znamená, že skutečná ztráta celého děliče je 6 dB kvůli dělení signálu do dvou cest, a to platí ve všech směrech třívstupního děliče. Často se díky tomu můžeme setkat s názvem 6 dB děliče. Základ děliče tvoří tři pasivní odporové prvky zapojené buď do hvězdy nebo do trojúhelníku. Schémata jejich zapojení jsou zobrazené na obrázcích pod textem. Na obr. 7 je dělič zapojený do hvězdy, obr. 8 ukazuje zapojení do trojúhelníku.



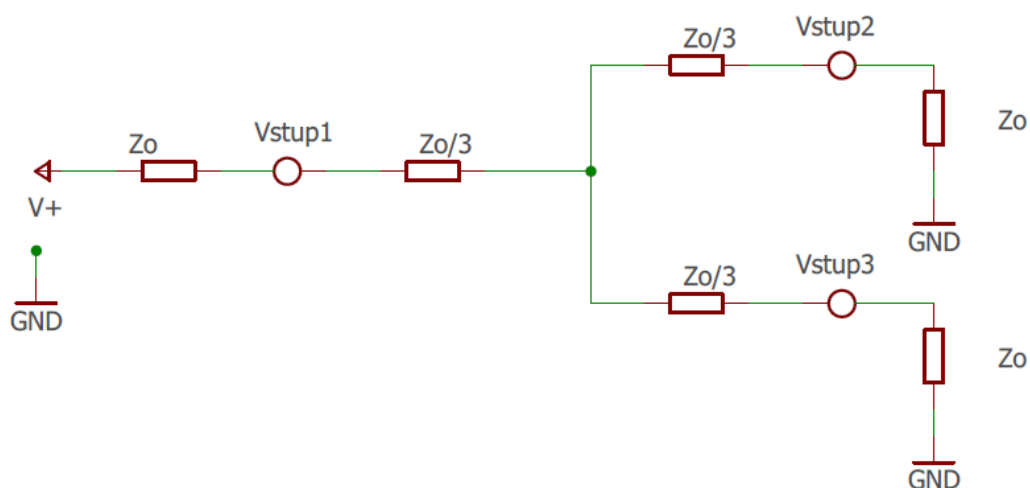
Obr. 6 Zapojení hvězda



Obr. 7 Zapojení trojúhelník

Vhodně zvolenými hodnotami rezistorů zajistíme, že každý vstup bude přizpůsoben na vlnovou impedanci Z_0 , což je nutné pro zamezení odrazů signálu.

Pro analýzu děliče a vypočtení jeho Z_0 zapojeného podle obr. 8, tzn. hvězda lze všechny rezistory pojmenovat stejně R_1 . K tomu, aby všechny tři vstupy byly odporově přizpůsobené, se musí jejich hodnota rovnat.

Obr. 8 Schéma obvodu pro výpočet Z_0

Musíme přizpůsobit impedanci každého ze vstupů děliče na hodnotu Z_0 . Při analýze vlnové impedance od vstupu 1 se musí rovnat impedance $Z_{IN} = Z_0$, rovnice pro celý výpočet má pak tvar (15). [3]

$$Z_{IN} = Z_0 = \frac{R_1 + (R_1 + Z_0)^2}{(2 * R_1 + 2 * Z_0)} \Rightarrow R_1 = \frac{Z_0}{3} \quad (15)$$

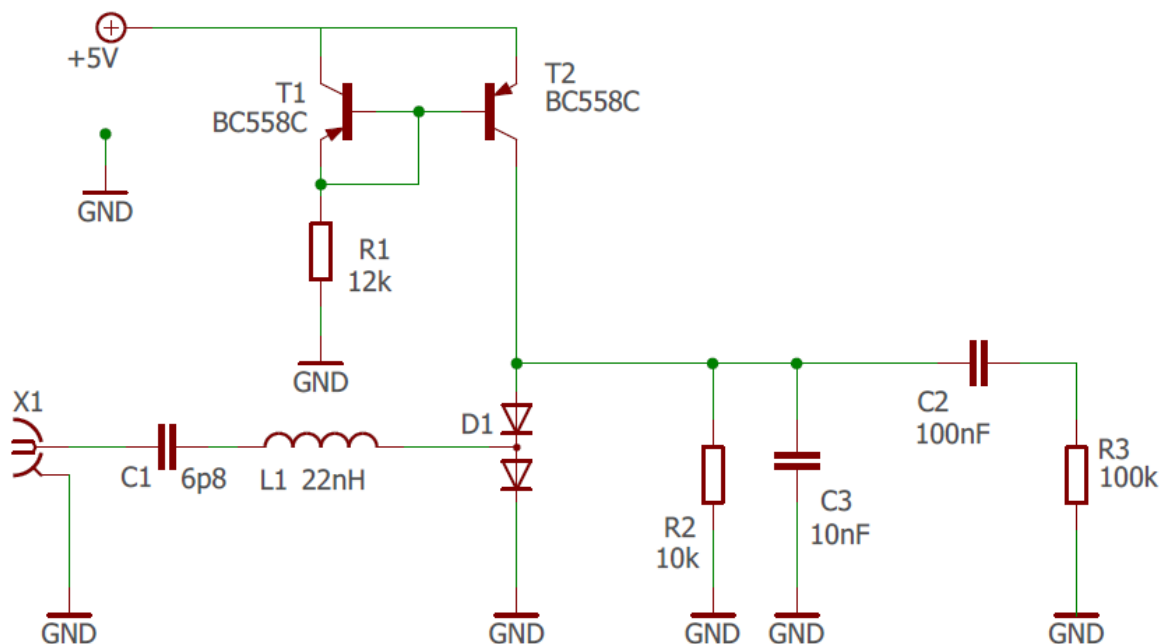
3.1.5 Aditivní směšovač

Samotné jednoduché zařízení tvoří odporový splitter a diodový detektor. Součet signálu ze splitteru se vlivem nelinearity diod mění na součtové a rozdílové frekvenční složky (směšovací produkt), vstupních signálů. Část schématu zapojení je vidět na obr. 10.

Hned za vstupem koaxiálního kabelu je umístěn LC filtr. Ten je vyladěn na frekvenci f_0 a hodnoty jsou zvoleny s ohledem na impedanční přizpůsobení vstupu na pracovním kmitočtu. Následuje diodový usměrňovač. Ten je napájen proudovým zrcadlem vytvářeným předpětím. Se zavedeným předpětím vzniká na diodách dobře měřitelná rozdílová složka v potřebném rozsahu úrovní (obojí je známo - jak vstupní úroveň, tak výstupní napětí).

Samotné proudové zrcadlo je tvořeno dvěma PNP tranzistory BC 558 v jednoduchém Widlarovo zapojení. Jeho napájení zajišťuje 5 V zdroj. Pomocí odporu R1 pak korigujeme hodnotu výstupního proudu. Vzhledem k malé zátěži zrcadla, kdy je teplota tranzistorů dána prakticky výhradně teplotou okolí, stačí diskrétní realizace z tranzistorů.

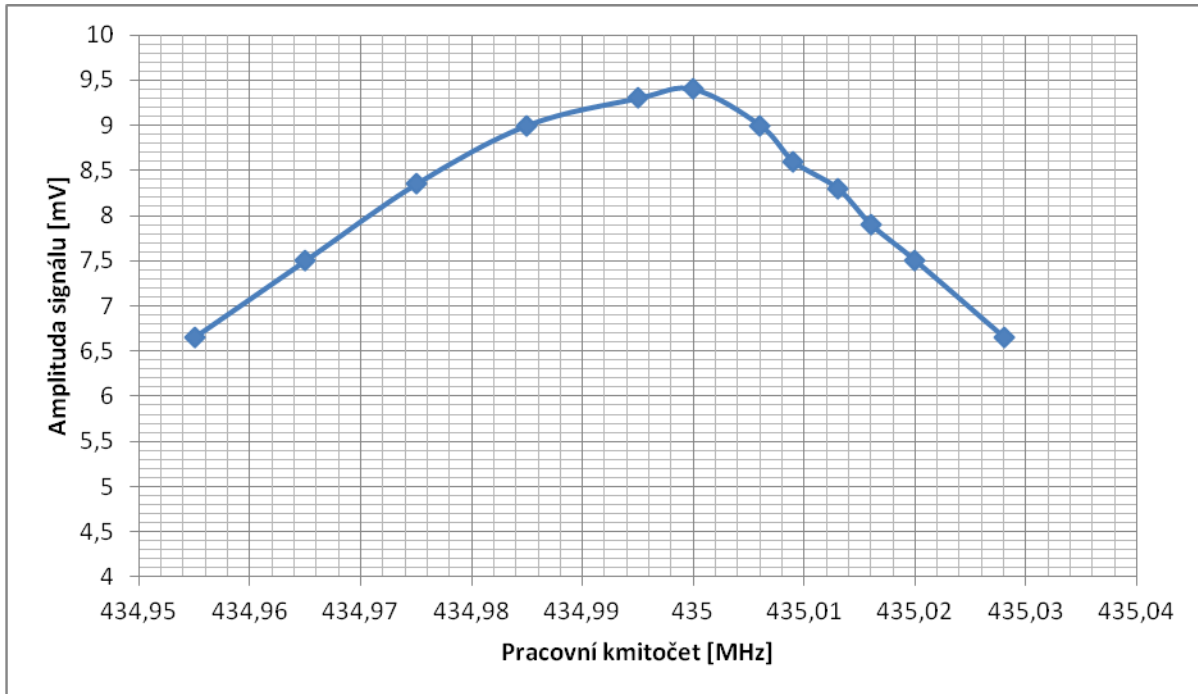
Směrem k výstupu je umístěn RC filtr typu dolní propust pro omezení zejména součtových složek frekvence. Odpor R2 slouží navíc i jako zatížení diod. Dále už je jen vazební kondenzátor. Kde kapacitní vazba zamezuje stejnosměrné složce dostat se na výstup. Nevýhodou je však, že může způsobit zkreslení malých signálů a působí jako svod. Na zátěži R3 pak můžeme snímat rozdílovou složku výstupního napětí.



Obr. 9 Schéma části aditivního směřovače

Při testování funkčnosti aditivního směšovače je na vstup X1 připojen odporový splitter. Konstrukčně byl v zapojení do hvězdy podle obrázku 7. Na jeho dva zbylé vstupy byl přiveden signál. Z místního oscilátoru o frekvenci 435 MHz a do druhého vstupu signál z přijímací antény o frekvenci 435,001 MHz. Průchodem přes splitter byly sloučeny signály ovšem na úkor ztráty výkonu o velikosti 6 dBm. Na selektivním filtru pak omezíme frekvence jen na určité pásmo. Proud generovaný proudovým zrcadlem se lehce lišil od vypočítané hodnoty. To bylo způsobené tím, že zapojení bylo realizováno pomocí diskretních součástek a ne v integrované podobě, aby zrcadlení proudu bylo co nejefektivnější. Pro funkci to bylo nepodstatné vzhledem k malé citlivosti zapojení na hodnotu proudu v tomto rozsahu. Za pomoci diod pak usměrníme signál. Průchodem přes filtr dolní propust vzniká vyhlazený signál o frekvenci 1 kHz. Ten je pak poskytnut na výstupu, který byl za pomoci osciloskopu analyzován. Pomocí něho jsme pak měřili přes funkce RMS efektivní hodnotu napětí. Očekávaná hodnota 10 mV byla i změřena. Ovšem tato hodnota byla změřena chybně a to právě kvůli funkci RMS, která započítala do výsledné hodnoty i vyšší harmonické složky. Pomocí kurzorů na osciloskopu, takzvané špičky, byla naměřena hodnota napětí 8 mV.

Při tomto měření jsme ještě zjišťovali selektivitu demodulátoru při přeladování referenčního kmitočtu VCO.



Graf č. 2 Pokles amplitudy signálu v závislosti na změně kmitočtu VCO

Z grafu č. 2 je patrné, jak klesá amplituda demodulovaného signálu a při změně frekvence VCO. Hodnoty byly měřeny do chvíle, kdy pokles amplitudy oproti maximální velikosti činil 3dB.

4 Závěr

V první části textu byla vysvětlena základní problematika satelitní komunikace zaměřená na amatérské užití při komunikaci se satelity typu CubeSat obíhajícími po LEO drahách. Dále jsou popsány používaná frekvenční pásma a problematika průchodu signálu atmosférou. Naznačen byl i postup pro výpočet energetické bilance rádiového spoje. Byly také popsány technické požadavky na pozemní stanici. V závěru první části práce byly vyjmenovány důležité parametry, které je možné s navrhovaným hardwarem testovat.

V druhé části textu je popsán samotný hardware pro testování pozemní stanice a experimenty, které pomocí zařízení byly provedeny. Hardware dokáže pracovat v režimech slabého vysílače i přijímače signálu. To bylo ověřeno při experimentech. Test slabého vysílače byl proveden v městské zástavbě, při němž byl pomocí pozemní stanice přijímán signál generovaný navrženým hardwarem. Byla ověřena jak teoretická analýza, tak praktickým měřením realizovatelnost spoje. Navíc byla při tomto měření otestována funkčnost antény pozemní stanice typu YAGI, zda dokáže přijímat signály v požadovaném směru. Dále byla ověřena funkce přijímače. Hardware pro příjem tvořil druh aditivního směšovače, který dokázal poskytnout na výstupu signál přenosu pro analýzu. Byla testována i schopnost zařízení poskytovat signál v závislosti na změně frekvence VCO. Tím byla ověřena funkčnost navrženého hardwaru. Ten byl realizován s co nejmenší možnou technickou jednoduchostí, největší spolehlivostí a malým příkonem. To by umožňovalo snadnou manipulaci a snadné umístění kdekoliv, kde je potřeba. V budoucnu by pak měla koncepce doplnit pozemní stanice, kde by analyzovala nepřetržitě přijímaný signál. V případě výskytu chyby by zařízení dokázalo upozornit technickou podporu. Ta by pak se sofistikovanější měřicí technikou určila přesný zdroj problému. Díky malému příkonu by hardware mohl fungovat na akumulátoru a jeho činnost by tím byla více autonomní.

Seznam obrázků

Obr. 1 Propustnost atmosféry v závislosti na frekvenci [4]

Obr. 2 Znárodnění geometrie vzdálenosti satelitu [5]

Obr. 3 Anténa YAGI463CP30 [6]

Obr. 4 Prostředí softwaru Orbitron

Obr. 5 Blokové schéma testovacího zařízení

Obr. 6 Zapojení hvězda

Obr. 7 Zapojení trojúhelník

Obr. 8 Schéma obvodu pro výpočet Z_0

Obr. 9 Schéma části aditivního směšovače

Seznam tabulek

Tab. 1 Přehled rozdělení frekvencí rádiového pásma

Tab. 2 Parametry antény

Tab. 3 Útlum kabelu RG 213

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SEYBOLD, J. S. INTRODUCTION TO RF PROPAGATION. HOBOKEN, NJ: WILEY-INTERSCIENCE, 2005. WEB.
- [2] ŽALUD, VÁCLAV. MODERNÍ RADIOELEKTRONIKA. PRAHA: BEN - TECHNICKÁ LITERATURA, 2000. ISBN 80-86056-47-3.
- [3] MICROWAVES101 | RESISTIVE POWER SPLITTERS. *MICROWAVE AND RF INFORMATION FOR ENGINEERS / MICROWAVE CALCULATORS, ENCYCLOPEDIA, DISCUSSION FORUM* [ONLINE]. COPYRIGHT © [CIT.05.06.2017]. D: [HTTPS://WWW.MICROWAVES101.COM/ENCYCLOPEDIAS/RESISTIVE-POWER-SPLITTERS](https://www.microwaves101.com/encyclopedias/resistive-power-splitters)
- [4] (Online převzatý obrázek)
<http://www.spaceacademy.net.au/spacelink/atwin.gif>
- [5] (Převzatý obrázek)
SEYBOLD, J. S. INTRODUCTION TO RF PROPAGATION. HOBOKEN, NJ: WILEY-INTERSCIENCE, 2005. WEB.
- [6] (Online převzatý obrázek)
http://cdn2.bigcommerce.com/n-ou1isn/f95xaqb/products/170/images/374/WS_436CP30_IMAGE__97915.1424737603.1280.1280.png?c=2
- [7] Catalog of Earth Satellite Orbits : Feature Articles. NASA Earth Observatory : Home [online]. Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/>
- [8] Satellite frequency bands/Telecommunications&IntegratedApplications/Our Activities/ESA.[online].Dostupné z : http://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands
- [9] Satellite Signal Propagation :: Radio-Electronics.Com. Radio-Electronics.com: resources, analysis & news for electronics engineers [online]. Copyright © Adrio Communications Ltd and may not be copied except for individual personal use. This includes copying material in whatever form into website pages. While every effort is made to ensure the accuracy of the information on Radio [cit. 05.06.2017]. Dostupné z: http://www.radioelectronics.com/info/satellite/satellite_sig_prop/satellite_signal_propagation.php

Přílohy

Příloha A - Hodnoty z testu slabého vysílače při výpočtu rozpočtu spoje

Energetický rozpočet rádiového spojení			
výkonová úroveň na OUT koncového zesilovače	L_{TX}	10,00	dB
útlum volného prostoru	B_{FS}	91,23	dB
výsledná úroveň signálu před demodulátorem	L_{RX}	-60,23	dB
	Šumová teplota systému		
šumová teplota antény	T_{P-ANT}	187,11	K
	T_{P-C}	32,70	K
šum LNA zesilovače	T_{P-LNA}	92,22	K
Vliv kabelu od LNA k přijímači	T_{P-CRX}	4,39	K
Šum přijímače	T_{P-RX}	15,75	K
šumová teplota systému	T_{SYS}	332,17	K
	Výkon šumu		
výkonu šumu na IN přijímače	P_{N-LNA}	1,15E-18	W
Přepočet na IN přijímače	L_{N-RX}	- 133,4	dBm
	Odstup signál-šum		
	SNR	73,18	dB

Příloha B - Vstupní hodnoty z testu slabého vysílače při výpočtu rozpočtu spoje

rychlost světla	c	300 000 000,00	m/s
frekvence	f	435000000	MHz
komunikační vzdálenost	D	2000	m
referenční výkon	P_{ref}	0,001	W
vysílací výkon	P_{TX}	0,01	W
zisk vysílací antény	G_{TX}	0	dB
atmosférické ztráty	B_A	0	dB
zisk antény přijímací stanice	G_{RX}	15	dB
šumová teplota pozemní stanice	T_{ANT}	210	K
zisk LNA	G_{LNA}	20	dB
šumové číslo LNA	N_{FLNA}	1,2	dB
útlum kabelu mezi LNA a anténou	B_C	0,5	dB
max. teplota kabelu LNA to ant.	T_C	300	K
útlum svodu	B_{CRX}	4	dB
rezerva	B_M	10	dB
šumové číslo přijímače	N_{FRX}	5	dB
připojení přijímače se svodem	B_{CRX}	4	dB
teplota	T_{CRX}	290	K
ef. šum. šířka pásma filtru přijímače	B_N	250	Hz
útlum přívodního kabelu	G_C	0,891	dB
útlum spojovacího kabelu	G_{CRX}	0,398	dB
svod spojovacího kabelu	B_{CRX}	-4	dB
zisk LNA	G_{LNA}	100	dB
referenční teplota 1.	T_C	290	K
teplota při přepočtu na vstup přijímače	T	332	K
šumový faktor	F_{LNA}	1,318	dB
šumový faktor	F_{RX}	3,162	dB