



MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Bakalárska práca

Detekcia rádiového žiarenia Slnka

Brno 2010

Juraj Poliak

Moje poďakovanie patrí vedúcemu tejto bakalárskej práce Mgr. Filipovi Hrochovi, Ph.D. za jeho trpezlivosť, čas a vynaložené úsilie pri tvorbe tejto práce. Ďalej chcem poďakovať pánovi Igorovi Halmovi, ktorý ochotne pomohol a poskytol technické vybavenie nutné pre experimentálnu časť práce a doc. Ing. Tomášovi Kratochvílovi, Ph.D. za pomoc pri objasnení praktických aspektov fungovania družicového systému. V neposlednej rade patrí moja vďaka mojej priateľke, rodine a všetkým, ktorí boli v správnom čase na správnom mieste.

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu napísal samostatne a výhradne s použitím prameňov citovaných v závere práce. Súhlasím so zapožičiavaním práce a jej zverejňovaním.

V Brne dňa 21.5.2010

Juraj Poliak

Abstrakt

Bakalárska práca pojednáva o prijme rádiového žiarenia z kozmických objektov pomocou družicového prijímacieho systému pre príjem DVB-S signálu. Je zameraná na laikov, ktorí chcú preniknúť do problematiky detekcie rádiového žiarenia z kozmu ako aj na odbornú verejnosť, ktorá si chce rozšíriť vedomosti o možnostiach pohľadu do Vesmíru.

Kľúčové slová

DVB-S, spektrum, anténa, detekcia, Slnko.

Abstract

Bachelor thesis deals with theory of detection of radiation from cosmic objects using a satellite DVB-S receiver. It's main focus is on beginners, who want to understand problem of detection of cosmic radiation as well as on broad scientific audience, who want to expand their knowledge about other possibilities how to look in to Space.

Keywords

DVB-S, spectrum, antenna, detection, Sun.

Obsah

Úvod.....	5
1. Elektromagnetické vlnenie.....	6
1.1 Elektromagnetická vlna v praxi.....	7
1.1.1 Prenos energie a intenzita.....	8
1.1.2 Polarizácia.....	9
1.2 Elektromagnetické spektrum.....	11
2. Družicový prenos.....	15
2.1 Základy družicového prenosu.....	15
2.2 Základné prvky satelitného systému.....	16
2.2.1 Družicový transpondér.....	16
2.2.2 DVB-S prijímač.....	17
2.3 Meranie signálu pri prijíme DVB-S.....	20
3. Návrh meracej aparatury.....	22
3.1 Praktické možnosti a presnosť prijímacieho systému.....	22
3.1.1 Fotónový šum.....	22
3.1.2 Šum prístrojov.....	23
3.1.2 Nepresnosť odčítania.....	23
4. Experiment.....	24
4.1 Určenie parametrov systému.....	29
4.2 Určenie citlivosti systému.....	30
5. Záver.....	32
6. Bibliografia.....	33

Úvod

Moderné metódy detekcie kozmického žiarenia sa čoraz viac zameriavajú na žiarenie v oblasti rádiového žiarenia. Poskytuje totiž informácie o objektoch, ktoré sú inak nepozorovateľné optickými prístrojmi (jadrá galaxií), alebo vyžarujú viac v rádiovom obore. Zemi najbližší kozmický rádiový zdroj je Slnko a preto je vhodné pre tých, ktorí začínajú s rádioastrónomiou. Citlivosť prístrojov nemusí byť vzhľadom na úroveň výkonu signálu zo Slnka vysoká a takisto nie je nutné veľká presnosť nasmerovania antény. Vďaka tomu postačia aj relatívne lacné a komerčne dostupné prístroje. Bude ukázané použitie bežne dostupného systému pre príjem TV signálu systémom DVB-S.

1. Elektromagnetické vlnenie

Pre pochopenie problému príjmu a detekcie rádiového (a koniec-koncov akéhokoľvek) žiarenia je prvoradé, ujasniť si niekoľko pojmov. Elektromagnetické vlnenie (žiarenie) je priečne vlnenie, ktoré pozostáva z dvoch zložiek: vektor intenzity elektrického poľa \mathbf{E} a vektor magnetickej indukcie \mathbf{B} . Tieto zložky sú premenné, kolmé na smer šírenia vlny, ako aj na seba navzájom. Rýchlosť šírenia vlny vo vákuu patrí medzi univerzálne fyzikálne konštanty a je rovné $c_0 = 299\,792\,458$ m/s. Zároveň platí:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}, \quad (1)$$

kde ε_0 je permitivita vákua a μ_0 permeabilita vákua.

Pre vlnovú dĺžku λ a frekvenciu f platí:

$$c_0 = \lambda f. \quad (2)$$

Celou problematikou elektromagnetického žiarenia sa zaoberali už osobnosti ako Coulomb, Ampère, Faraday. Neskôr v roku 1873 James Clark Maxwell vybral z do jeho doby experimentálne overených zákonov elektriny a magnetizmu tie, ktoré mali najširšiu platnosť a tieto následne formálne upravil, rozšíril ich platnosť na časovo premenné deje a dal im podobu diferenciálnych rovníc. Dôsledne sa pritom držal termínu elektromagnetické pole, ktoré chápal ako spojenie poľa elektrického a magnetického. Za základný považoval súbor štyroch rovníc [2], ktorý je uvedený v integrálnom tvare (v jednotkách sústavy SI):

$$\iint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0}, \quad (3)$$

$$\iint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0, \quad (4)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (5)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \left(\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + I_c \right). \quad (6)$$

Tento súbor rovníc je základom pre pochopenie javov v elektromagnetickom poli. Sú teda základom aj pre pochopenie príjmu rádiového, či iného signálu anténou, či skupinou antén. Ďalší text bude teda zameraný na výklad týchto vzťahov.

Vzťah (3), inak nazývaný aj Gaussovým zákonom pre elektrické pole vyjadruje súvislosť medzi tokom intenzity elektrického poľa \mathbf{E} uzavretou orientovanou plochou A na ľavej strane a celkovým elektrickým nábojom Q vnútri tejto plochy na pravej strane [1]. Konštantou úmernosti je prevrátená hodnota permitivity vákua ε_0 . Intenzita elektrického poľa náboja mimo túto uzavretú plochu S , alebo vo vnútri nabitého vodivého telesa je nulová.

V prípade, že má plocha A guľovú symetriu, potom má intenzita elektrického poľa radiálnu veľkosť:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}, \quad (7)$$

čo je tvar vychádzajúci z Coulombovho zákona [3]. Táto skutočnosť len poukazuje na všadeprítomnosť Maxwellových rovníc.

Druhá rovnica (4) sa nápadne podobá na predchádzajúcu s tým rozdielom, že je intenzita elektrického poľa nahradená magnetickou indukciou a na ľavej strane je nula. Popisuje tak skutočnosť, že tok magnetickej indukcie \mathbf{B} ľubovoľnou uzavretou plochou je rovný nule, čo znamená, že neexistuje magnetický náboj – magnetický monopól.

Ďalšia z rovníc (5), nazývaná Faradayov indukčný zákon, vyjadruje súvislosť medzi cirkuláciou intenzity elektrického poľa \mathbf{E} pozdĺž uzavretej orientovanej krivky A na ľavej strane a časovou zmenou indukčného magnetického toku Φ_B plochou ohraničenou touto krivkou. Táto krivka a plocha, ktorú krivka obopína, sú navzájom orientované pravotočivo.

Posledná rovnica (6) sa nazýva Ampérov-Maxwellov zákon. Vyjadruje súvislosť medzi cirkuláciou magnetickej indukcie \mathbf{B} pozdĺž uzavretej orientovanej krivky na jednej strane a časovou zmenou toku elektrickej intenzity Φ_E plochou ohraničenou touto krivkou a celkovým prúdom prechádzajúcim touto plochou.

1.1 Elektromagnetická vlna v praxi

V ďalšom texte budú priblížené javy sprevádzajúce vznik a šírenie elektromagnetického vlnenia. Pre zjednodušenie bude preberané generovanie vlnenia s vlnovou dĺžkou porovnateľnou s bežným svetom (od 10^{-3} m).

Uvažujme elektrický obvod tvorený pasívnym dvojpólom RLC a zdrojom striedavého napätia, resp. prúdu. Pri určitých hodnotách R , L a C sa dvojpól chová ako obyčajný odpor, t.j. napätie na jeho svorkách je vo fáze s prúdom tečúcim dvojpólom a zdroj napätia, resp. prúdu dodáva do tohto dvojpólu výhradne činný výkon. Tento pracovný režim dvojpólu sa nazýva rezonanciou. V tomto stave má obvod najmenšiu impedanciu a dodávaný prúd do záťaže je maximálny a konštantný. Obvod sa tak stáva rezonančným obvodom. Na obr. 1 je znázornený sériový rezonančný obvod – prvky R , L a C sú v sérii.

Pri nastavovaní parametrov rezonančných obvodov je smerodajná výsledná frekvencia elektromagnetického vlnenia. Pre komplexnú impedanciu platí:

$$\hat{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right), \quad (8)$$

kde j značí komplexnú jednotku $j = \sqrt{-1}$. Pri rezonancii platí, že

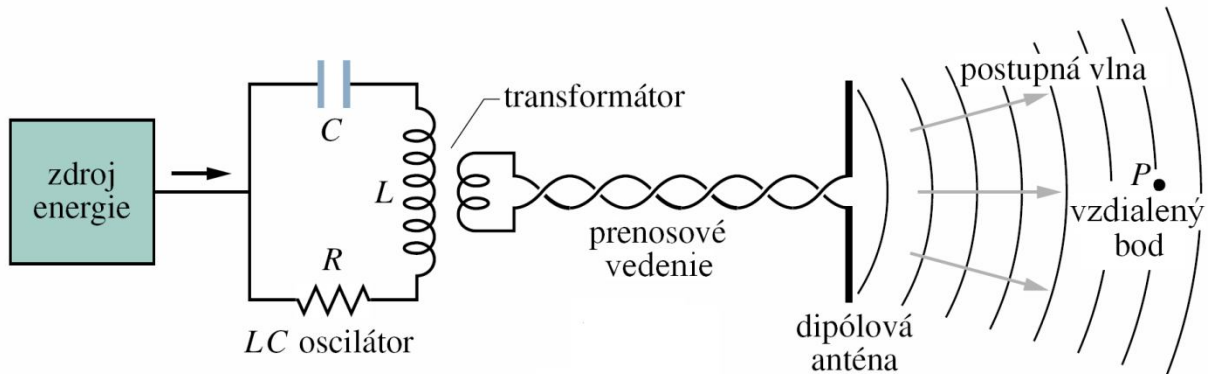
$$\text{Im}[\hat{Z}] = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (9)$$

a impedancia dvojpólu je $\hat{Z} = R$. Táto podmienka sa zabezpečuje nastavením jednotlivých reaktančných prvkov L a C , alebo nastavením frekvencie zdroja.

Ako vyplýva zo vzťahu (8), rezonančnú frekvenciu dostaneme pri splnení podmienky (10) známej ako Thompsonov vzťah:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_r \Rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (10)$$

Straty tepelné modelované odporom R , ako aj energiové straty súvisiace s generovaním elektromagnetických vln sú kompenzované generátorom striedavého napätia.



Obr. 1.: Sériový rezonančný obvod ako generátor elektromagnetických vln.

Energia z rezonančného obvodu je prenášaná indukčnou väzbou do prenosového vedenia a následne vyžiarená do priestoru dipólovou (prípadne inou) anténou vo forme elektromagnetického žiarenia s frekvenciou danou Thompsonovým vzťahom (10).

1.1.1 Prenos energie a intenzita

Energia vyžiarená (viď obr.1.) sa ďalej dostáva do priestoru, kde sa šíri rýchlosťou svetla smerom daným Poyntingovým vektorom \mathbf{S} definovaným:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}. \quad (11)$$

Smer tohto vektora elektromagnetickej vlny udáva v každom bode smer prenosu energie. Iba v homogénnom prostredí sa tento smer zhoduje so smerom šírenia vlny. Nakoľko vektory \mathbf{E} a \mathbf{B} sú na seba kolmé, tak veľkosť ich vektorového súčinu v smere šírenia je rovná EB a následne platí:

$$|\mathbf{E} \times \mathbf{B}| = E \cdot B \Rightarrow |\mathbf{S}| = \frac{1}{\mu_0} E \cdot B. \quad (12)$$

Na mieste je dodať, že tvar rovníc (11) a (12) je platný pre šírenie elektromagnetickej vlny vo vákuu.

S využitím vzťahu

$$c = \frac{E}{B}, \quad (13)$$

sa získa pre veľkosť Poyntingovho vektoru:

$$S = \frac{1}{\mu_0} E \cdot B = \frac{1}{c\mu_0} E^2. \quad (14)$$

Ak E je rovinná vlna šíriaca sa v smere osi x podľa: $E = E_m \sin(kx - \omega t)$ sa získa vzťah pre prenos energie v závislosti na čase. Pre energiu platí aj ďalší dôležitý vzťah:

$$E = h \cdot f, \quad (15)$$

kde h je Plancková konštanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,1 \text{ eV}\cdot\text{GHz}^{-1}$.

Výhodnejšie je však poznať strednú hodnotu energie prenesenú za určitý čas, čo je vlastne intenzita vlny I :

$$I = \langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{c\mu_0} E_m^2 \langle \sin^2(kx - \omega t) \rangle = \frac{1}{c\mu_0} E_m^2 \frac{1}{2} = \frac{1}{c\mu_0} E_{ef}^2, \quad (16)$$

kde E_m je maximálna hodnota intenzity elektrického poľa a E_{ef} je jej efektívna hodnota. So vzdialenosťou od zdroja sa intenzita všeobecne mení veľmi komplikovane, nakoľko bežné zdroje nie sú izotropné. V niektorých prípadoch sa však dá zdroj takýmto izotropným zdrojom aproximovať. Vlnoplochy žiarenia generovaného týmto zdrojom sa v istom okamihu dajú predstaviť ako sústredné gule so stredom v tomto zdroji. V prípade stacionárneho zdroja je v bode pozorovania nachádzajúcom sa v definovanej vzdialenosti r intenzita žiarenia:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (17)$$

kde P je výkon izotropného zdroja. Práve táto hodnota výkonu je detekovaná pri prijímaní elektromagnetických vln.

1.1.2 Polarizácia

Okrem intenzity je v praxi dôležité zistiť polarizáciu elektromagnetickej vlny. Polarizácia je vlastnosť vlnenia, ktorá popisuje smer kmitov. Rovina polarizácie je tak rovnobežná s rovinou kmitov budiacich elektrónov. Elektromagnetické vlnenie je vo väčšine prípadov vlnenie priečne, čo znamená, že smer polarizácie je kolmý na smer šírenia vlny. Konvencia je taká, že polarizácia popisuje orientáciu elektrického poľa v priestore po dobu jednej periódy vlny.

Tým, že budiace elektróny sú zväčša v materiáli rozložené chaoticky a takisto chaoticky aj kmitajú spôsobuje, že bežné zdroje elektromagnetických vln generujú nepolarizované vlnenie. Taká vlna sa k smeru šírenia chová úplne symetricky. Polarizovaná vlna však má v rôznych smeroch kolmých k smeru šírenia rôzne vlastnosti.

Ako už bolo spomenuté, ak sa elektromagnetická vlna šíri v smere osi z , vektor elektrickej intenzity \mathbf{E} a vektor magnetickej indukcie \mathbf{B} sú na seba navzájom kolmé a ležia

v rovine kolmej na smer šírenia – rovine xy . Ich skutočná poloha navyše môže byť rôzna a môže sa meniť aj v čase.

Všeobecne sa vektor elektrickej intenzity dá rozložiť na dve navzájom kolmé zložky do dvoch ortogonálnych smerov x a y . Tým sa vlastne získa vyjadrenie polarizácie elektromagnetickej vlny ako superpozícia dvoch polarizovaných vln, ktorých roviny kmitov sú navzájom kolmé. Dá sa ukázať [6], že pre najvšeobecnejší prípad polarizácie je výsledkom rovnica elipsy.

Všetky druhy polarizácie, teda:

- lineárna,
- kruhová,
- eliptická,

sú len zvláštne prípady eliptickej polarizácie.

Navyše sa rozoznáva smer polarizácie. Ten sa určuje pozorovaním koncového bodu vektora elektrickej intenzity pri pohľade v smere šírenia vlny. Ak tento bod obieha proti smeru pohybu hodinových ručičiek, tak ide o polarizáciu ľavotočivú. V opačnom prípade ide o polarizáciu pravotočivú.

Polarizované elektromagnetické vlnenie však v prírode nie je bežné. Zväčša je pozorované po odraze od vhodných materiálov, či po prechode nimi. Takéto materiály sa inak nazývajú polarizátory. Po prechode takýmto materiálom dochádza k pohlteniu zložky kolmej na smer polarizácie polarizátora.

Ako polarizátory sa používali rovnobežne uložené kryštály herapalitu uloženého medzi tenké priehľadné sklíčka. Tento kryštál bol neskôr nahradený molekulami polyvinyl alkoholu. Tieto molekuly sú dlhé a tak môžu valenčné elektróny v pozdĺžnom smere kmitať ľahšie, čím v tomto smere pohlcujú menej svetla ako v smere kolmom.

K polarizácii môže však čiastočne dochádzať aj odrazom. Stupeň polarizácie závisí potom od uhla dopadu elektromagnetickej vlny na povrch polarizačného materiálu. Tento jav je bežne pozorovaný pri odraze svetla na vodnej hladine. Svetlo dopadá na vodnú hladinu, čiastočne sa odráža pod rovnakým uhlom a čiastočne sa láme podľa Snellovho zákona. Avšak pri dopade pod tzv. Brewsterovým uhlom (18) dochádza k odrazu len tej časti vlnenia s polarizáciou rovnobežnou s rovinou odrazu a tým k úplnej polarizácii. Rovina polarizácie je v tomto konkrétnom prípade vodnou hladinou. Pre Brewsterov uhol platí:

$$\theta = \arctan \frac{n_1}{n_0}, \quad (18)$$

kde θ je uhol dopadu a n_1 , resp. n_0 označujú indexy lomu látky, na ktorú vlnenie dopadá, resp. prostredia v ktorom sa šíri.

To bol kvalitatívny popis polarizácie. Pri kvantitatívnom vyjadrení je dôležité, aká bude intenzita polarizovaného vlnenia. Pre nepolarizované svetlo platí, že ak sa v danom okamihu pohltí jedna z dvoch ortogonálnych zložiek, prejde polarizátorom, resp. sa odrazí práve polovica intenzity a druhá polovica bude pohltená polarizátorom. Toto pravidlo sa označuje aj ako pravidlo jednej polovice a platí len pre nepolarizované svetlo.

Na druhej strane ak polarizátorom prechádza už polarizované svetlo, vektor elektrickej intenzity sa dá opäť rozložiť na dve kolmé zložky. Jedna zložka (E_y) bude rovnobežná s rovinou polarizácie, druhá (E_x) bude na túto rovinu kolmá. Ak rovina polarizácie vlnenia

a rovina polarizácie doštičky zvierajú uhol θ , bude elektrická intenzita vlnenia za polarizátorom rovná

$$E_y = E \cos \theta . \quad (19)$$

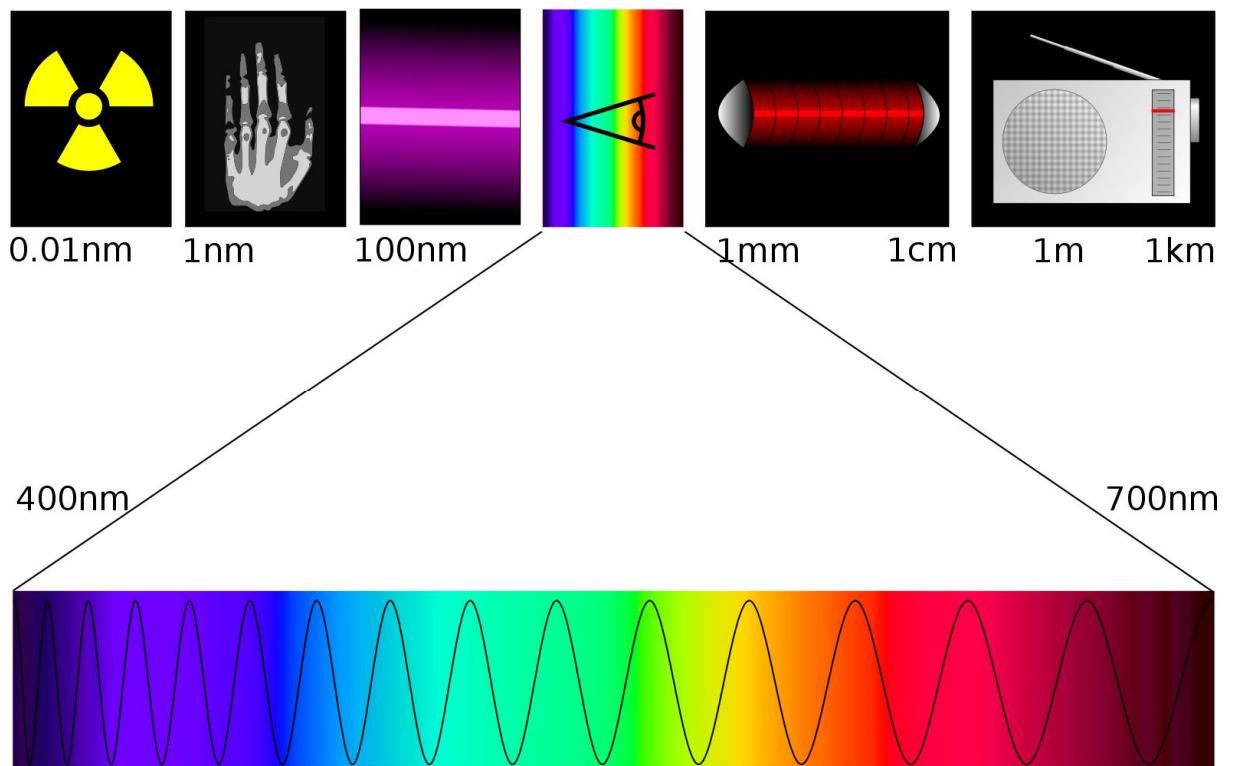
Keďže intenzita žiarenia je úmerná E_y^2 platí, že

$$I = I_0 \cos^2 \theta , \quad (20)$$

kde I je intenzita vlnenia za polarizátorom a I_0 intenzita vlnenia pred ním. Podľa (20) je intenzita vlnenia maximálna pre $\theta = 0^\circ$ a nulová pre $\theta = 90^\circ$.

1.2 Elektromagnetické spektrum

Ako už bolo spomenuté v (2), jednou zo základných vlastností pre popis elektromagnetického žiarenia je vlnová dĺžka, resp. frekvencia. Spektrom elektromagnetického žiarenia (obr.2) potom nazývame súhrn elektromagnetického žiarenia všetkých vlnových dĺžok. Toto spektrum sa delí na isté oblasti, ktoré zahŕňujú elektromagnetické vlnenie podľa istých špecifických vlastností, prípadne pôvodu.



Obr. 2.: Elektromagnetické spektrum.

Elektromagnetické žiarenie najväčších vlnových dĺžok sa nazýva rádiové vlny. Generované sú na princípe rezonancie anténami porovnateľných veľkostí. Využíva sa tu tzv. skin efektu, kedy po dopade elektromagnetickej vlny na vodič sa naň viaže a putuje po jeho povrchu indukovaním prúdu tak, že excituje elektróny vodiča. Vlnové dĺžky sú rádovo od 10^{-3} m

do 10^2 . Ich hlavné využitie je pri prenose informácie v rôznych komunikačných systémoch. Použitie systémov v tejto časti spektra je chránené licenciami a riadené vládnyimi organizáciami.

Elektromagnetické žiarenie s vlnovými dĺžkami rádovo 0,1 m je generované hlavne klystrónmi a magnetrónmi, ako aj napr. Gunnovými diódami. Prenášané je vlnovodmi s pričnými rozmermi porovnateľnými s použitou vlnovou dĺžkou vlnenia. Používajú sa hlavne v moderných vysokorýchlostných rádioreléových spojoch, Wi-Fi zariadeniach, pozičných systémoch ako aj pri komunikácii pozemných staníc s družicami. Človeku najbežnejšie je ale využitie v mikrovlnných rúrach. Mikrovlnné žiarenie je v nich absorbované v molekulách s dipólovým momentom, čím ich rozkmitá a jedlo tak zahreje oveľa rýchlejšie než bežným spôsobom.

Ďalším v poradí je infračervené žiarenie. Ide o vlnenie vlnových dĺžok rádovo 750 nm až jednotky mm. Dá sa rozdeliť do 3 hlavných oblastí:

- Ďaleké infračervené žiarenie od asi 10 μm je z veľkej časti pohlcované vodou obsiahnutou v Zemskej atmosfére. Napriek tomu je atmosféra v pásme od 200 μm relatívne priehľadná a toto pásmo je využívané na tzv. sub-milimetrovú astronómiu.
- Stredná infračervená oblasť žiarenia s vlnovými dĺžkami väčšími než asi 2,5 μm je typická tým, že absorbné spektrum zlúčenín je v tomto obore pre ne typické a dá sa použiť na ďalšiu chemickú analýzu.
- Blízka infračervená oblasť je svojimi vlastnosťami blízka viditeľnému svetlu. V komunikáciách ide o najperspektívnejšiu oblasť, nakoľko ide o oblasť, v ktorej pracujú moderné optické komunikácie.

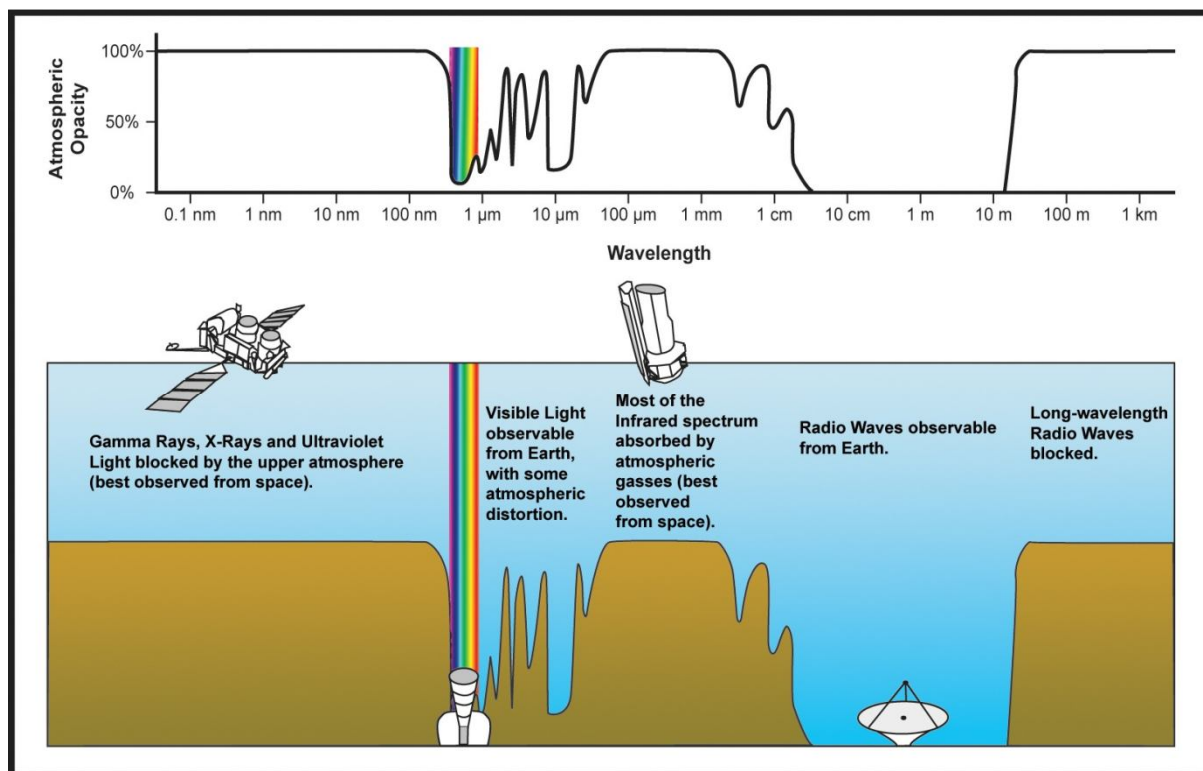
Viditeľné svetlo sa nachádza v rozmedzí 380 až 760 nm. Tieto hodnoty sú dané citlivosťou ľudského oka. Je to zároveň oblasť vlnových dĺžok, na ktorých všetky hviezdy vyžarujú najviac žiarenia. Je to najužšie definovaná časť spektra. Je to dané aj priepustnosťou atmosféry, ktorá bude rozobraná nižšie.

Elektromagnetické vlnenie s vlnovými dĺžkami rádovo desiatok až stoviek nanometrov sa nazýva ultrafialové. Vzhľadom na jeho malú vlnovú dĺžku má vysokú energiu a spôsobuje rozpad chemických väzieb. Ide teda o ionizujúce žiarenie. Ide o oblasť žiarenia, v ktorej je Slnko veľmi silné a dokáže spôsobiť silné popálenia a v niektorých prípadoch aj rakovinu kože. Zem by pri takejto dávke žiarenia vyschla, keby nie je vrstvy ozónu O_3 , ktorý toto žiarenie pohlcuje.

Presné hranice spektra v týchto vysokoenergetických oboroch už nie sú presne dané. Ide tu už skôr o členenie žiarenia podľa pôvodu. Röntgenové žiarenie je tiež ionizujúce a s látkou interaguje Comptonovým efektom. Vďaka svojej vysokej energii sa využívajú v lekárstve, ale uplatnenie má aj v astronómii. V tomto obore žiaria hlavne neutrónové hviezdy, čierne diery a aj niektoré typy hmlovín.

Najenergetickejším žiarením s energiami rádovo od stoviek keV je gama žiarenie. Dovoľujú astronómom študovať vysokoenergetické oblasti, ktoré sú pre iné vlnové dĺžky nepriehľadné. V lekárstve sa využíva toto žiarenie pri liečbe rakoviny a taktiež pri niektorých zobrazovacích metódach (PET). Takto malé vlnové dĺžky sú merané s veľmi vysokou presnosťou Comptonovým rozptylom.

Ako bolo už spomenuté, elektromagnetické žiarenie a látka spolu interagujú. Popísané boli aj špecifické interakcie pre jednotlivé oblasti elektromagnetického spektra. Na obr. 3 je naznačená frekvenčná závislosť priepustnosti atmosféry pre jednotlivé oblasti spektra.



Obr. 3.: Frekvenčná závislosť relatívnej priepustnosti Zemskej atmosféry.

V pravej časti je vidieť, že pre dlhé vlny je Zemská atmosféra nepriehľadná. Pre vlnové dĺžky od centimetrov do nízkych desiatok metrov je však atmosféra elektromagneticky priehľadná. Hovorí sa o tzv. spektrálnom okne, v danom prípade o rádiovom okne. Ďalšie takéto okno sa nachádza v oblasti viditeľnej – optické okno a v infračervenej. V ďalekej infračervenej oblasti sa nachádza významné okno pre submilimetrovú astronómiu. Tieto tri okná sú základom pre pozorovanie zo Zeme. Meranie vesmírneho žiarenia ako aj ostatného mimo tieto oblasti sa tak môže diať výlučne mimo Zemskú atmosféru – vysoké pohoria, alebo najlepšie družice na obežnej dráhe okolo Zeme.

Toto prirodzené delenie spektra je však v technickej praxi doplnené o umelé delenie medzinárodne dohodnutými plánmi pre kmitočtové prídely:

- Ženevský plán (1975)
- Stockholmský plán (1961)
- Ženevský plán (1984)
- Wiesbadenský plán (1995)

Na úrovni štátov majú rozdelenie spektra na starosti telekomunikačné úrady. V Českej republike funguje Odbor správy kmitočtového spektra a Odbor štátnej inšpekcie rádiokomunikačných staníc Českého telekomunikačného úradu a platí Jednotné pravidlo č.2R/1997 – Národná kmitočtová tabuľka.

V ďalšom texte sú uvedené prehľady rozdelenia spektier podľa jednotlivých organizácií. Medzinárodnú telekomunikačný úrad (ITU) zaviedol rozdelenie rádiové spektra podľa tab.1.

Názov pásma anglicky	Skratka	ITU pásmo	Frekvencia	Typické zdroje
Subhertz	subHz	0	< 3 Hz	Komunikácia ponoriek
Extremely low	ELF	1	3 – 30 Hz	Ponorky, Rozvodná sieť
Super low	SLF	2	30 – 300 Hz	Zemetrasenia
Ultra low	ULF	3	300 – 3000 Hz	Komunikácia ponoriek na hladine
Very low	VLF	4	3 – 30 kHz	AM rozhlas
Low	LF	5	30 – 300 kHz	Komunikácia prízemnou vlnou
Medium	MF	6	300 – 3000 kHz	Komunikácia priestorovou vlnou
High	HF	7	3 – 30 MHz	Komunikácia priamou vlnou
Very high	VHF	8	30 – 300 MHz	FM rozhlas, DVB-T
Ultra high	UHF	9	300 – 3000 MHz	Moderné mobilné zariadenia
Super high	SHF	10	3 – 30 GHz	DVB-S, WiMAX, Radary
Extremely high	EHF	11	30 – 300 GHz	Skenery na letisku, Radary s vysokým rozlíšením
Terahertz	THz	12	300 – 3000 GHz	Optické komunikácie

Tab. 1.: Kmitočtové rozdelenie rádiového spektra podľa ITU.

Inštitút Elektrických a Elektronických inžinierov (IEEE) však zaviedol iné značenie používané v bežnej technickej praxi, uvedené v tab.2.

Pásmo	Frekvenčný rozsah	Pôvod mena
HF	3 – 30 MHz	High Frequency
VHF	30 – 300 MHz	Very High Frequency
UHF	300 – 1000 MHz	Ultra High Frequency
L	1 – 2 GHz	Long wave
S	2 – 4 GHz	Short wave
C	4 – 8 GHz	Compromise between S and X
X	8 – 12 GHz	Ako kríž zameriavača; používané od 2. svetovej vojny
K _u	12 – 18 GHz	Kurz – under (z nem. Kurz - krátky)
K	18 – 27 GHz	Kurz
K _a	27 – 40 GHz	Kurz – above
V	40 – 75 GHz	
W	75 – 110 GHz	W nasledovalo za V
mm	110 – 300 GHz	

Tab. 2.: Kmitočtové rozdelenie rádiového spektra podľa IEEE.

Tabuľky tab.1 a tab.2 by mali dať čitateľovi prehľad vo frekvenčných pásmach používaných v praxi. Všetky pásma sú ďalej delené a pridelované určitým službám, či už komunikačným, vedeckým, amatérskym, vojenským a podobne. Takisto je určené, aký maximálny výkon môže daný vysielač v určitom pásme mať, či aká jeho vyžarovacia charakteristika.

2. Družicový prenos

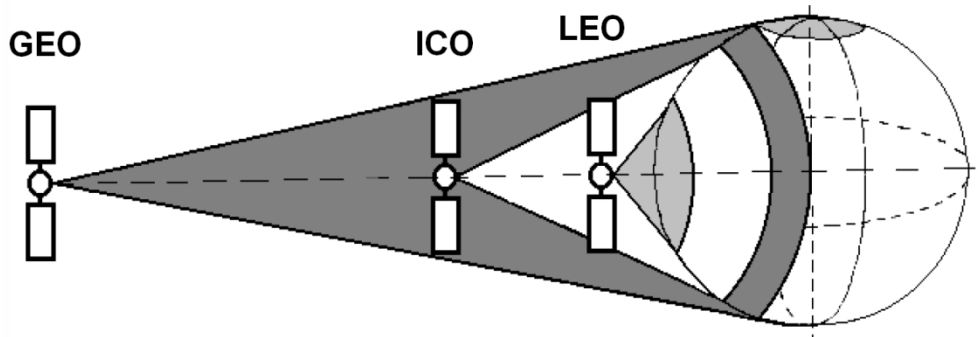
Cieľom tejto kapitoly bude oboznámiť čitateľa so základnými charakteristikami televízneho prenosu pomocou družíc a jeho príjmom. Toto je dôležité pre pochopenie meracieho systému, ktorý bude navrhnutý v 3. kapitole. Už dopredu bude asi dobré načrtnúť, že pôjde o parabolickú anténu s LNB konvertorom pripojeným k DVB-S prijímaču.

2.1 Základy družicového prenosu

Využitie umelej družice Zeme ako retranslačnej prenosovej stanice prvýkrát navrhol Arthur C. Clarke v roku 1945. 12 rokov pred vypustením prvej umelej družice Zeme navrhol umiestniť transpondér na družicu, ktorá sa pohybuje po kruhovej dráhe v rovine Zemského rovníka v takej výške, že doba jej obehu by bola práve jeden siderický (hviezdny) deň. Umiestnenie družice na takej, tzv. geostacionárnej dráhe, by umožňovalo neustály príjem a stačili by prakticky 3 družice na obežnej dráhe pre úplné pokrytie Zemského povrchu signálom. Prvou družicou na geostacionárnej dráhe bola družica Syncom 3 vypustená v roku 1964. Každý takýto systém sa skladá z 2 hlavných častí:

- Kozmický segment – patrí sem družica a jej pozemná riadiaca stanica,
- Pozemský segment – skladá sa z rôznych užívateľských pozemských staníc. [10]

Družica môže byť podľa potreby aplikácie umiestnená na rôznych dráhach. Na obr.4 sú zobrazené niektoré z nich, ktoré sú dôležité pre družicový prenos dát.



Obr. 4.: Zobrazenie rôznych obežných dráh družíc. [10]

Rozlišujú sa hlavne 4 dráhy pre komunikačné satelity:

LEO – nízka kruhová dráha - do 2000 km nad povrchom Zeme

ICO – stredná kruhová dráha – 5000 až 15000 km nad povrchom Zeme

HEO – vysoká eliptická dráha – v apogeu 40000 km nad povrchom Zeme, inklinácia $i = 63^\circ$

GEO (GSO) – geostacionárna dráha – 35768 km nad povrchom Zeme

Pre satelitný prenos televízneho signálu je využívané výhradne umiestnenie družíc na geostacionárnej dráhe. Odpadá tak nutnosť prepínania užívateľa medzi družicami a taktiež Dopplerov efekt.

2.2 Základné prvky satelitného systému

Družicová komunikácia sa skladá z:

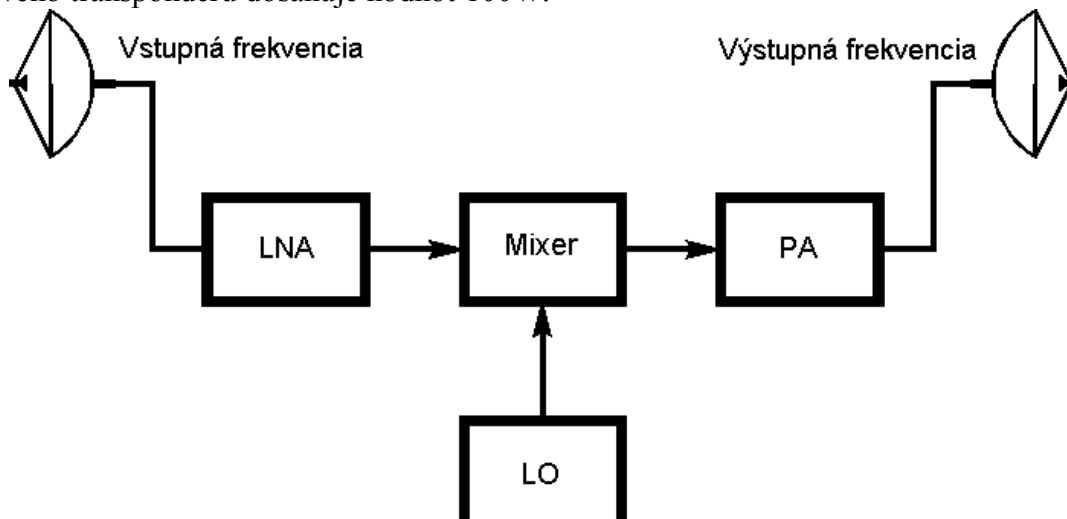
- Downlinku – prenos zo satelitu k pozemským staniciam. Dnešné komunikačné satelity pre DVB vysielajú signál v pásme (10,7 – 12,75) GHz. Do budúcnosti sa ale uvažuje aj s pásmom (21,4 – 22,0) GHz,
- Uplinku – prenos z pozemskej riadiacej stanice k družici. Do budúcnosti s rozvojom interaktívnej TV sem bude patriť aj prenos od užívateľa k družici.

Uplink aj downlink sú navyše polarizované pomocou vertikálnej a horizontálnej polarizácie. To umožňuje preniesť dvakrát viac kanálov, respektíve dvojnásobnú šírku pásma. Tá je voliteľná v rozmedzí (26 – 36) MHz. Šírka kanálu je 40 MHz a tak zvyšok tvorí tzv. ochranný interval pre obmedzenie rušenia susednými kanálmi, či Dopplerov efekt v prípade družíc na nižších obežných dráhach.

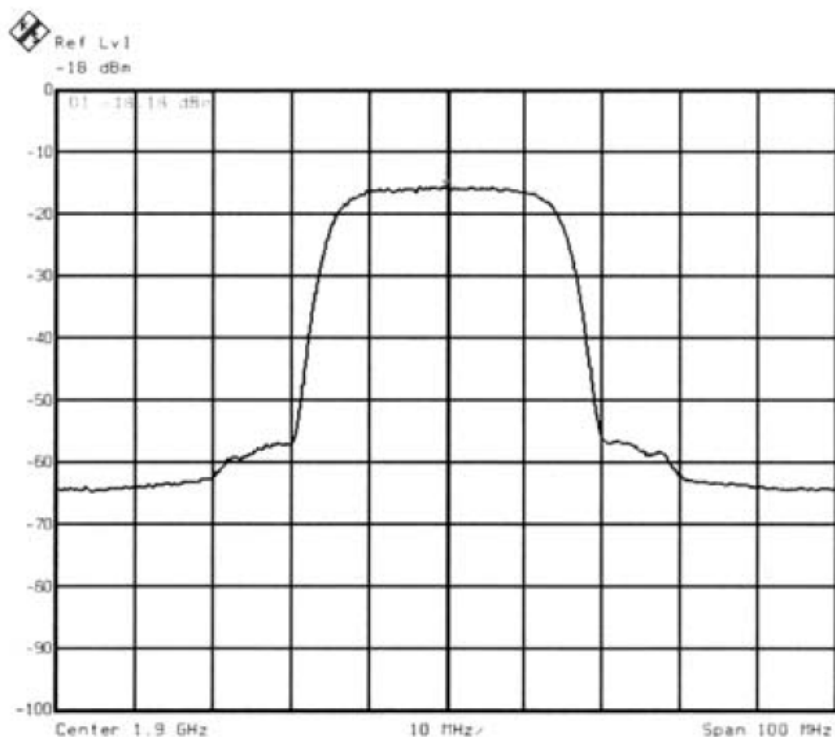
Vďaka smerovým charakteristikám prijímacích antén môžu družice použiť rovnaké kmitočty na rôznych kmitočtových pozíciách a transpondéroch. Jeden satelitný systém môže byť použitý na prenos digitálneho, ako aj analógového vysielania. Digitálne komunikačné kanály (TV programy) sa len umiestnia na iné frekvenčné pásma.

2.2.1 Družicový transpondér

Jednotka, ktorá riadi spracovávanie signálu na družici – jeho vysielanie a prijímanie – sa nazýva transpondér a jej zjednodušená bloková schéma je zobrazená na obr. 5 [12]. Signál uplinku, ktorý je v pásme (14 – 19) GHz (aby sa downlink a uplink nerušili) tvorí vstupnú frekvenciu. Následne je zosilnený nízkošumovým zosilňovačom (LNA) a v zmiešavači (Mixer) je jeho frekvencia znížená na frekvenciu v pásme downlinku. Táto frekvencia po zosilnení výkonovým zosilňovačom (PA) tvorí výstupnú frekvenciu vysielanú anténou. Zníženie výstupnej frekvencie je dané frekvenciou lokálneho oscilátora (LO) a nastavením zmiešavača, ktorý pomocou vhodného filtra vyberie príslušný rozdielový produkt. Výstupný výkon družicového transpondéru dosahuje hodnôt 100W.



Obr. 5.: Bloková schéma družicového transpondéru. [5]



Obr. 6.: Spektrum kanálu družicového prenosu. [11]

2.2.2 DVB-S prijímač

Signál vyslaný z družice prostredím a prechádza atmosférou. Jeho výkon je tak kvôli atmosférickým podmienkam utlmený o cca. 205 dB [11]. Jeho spektrum je naznačené na obr.6. Signál je zachytený anténou. Pri prijíme signálu v tomto frekvenčnom pásme sa používajú reflektorové parabolické antény. Základom antény je výsek rotačného paraboloidu. Do ohniska sa umiestni prijímač (LNB). Podľa toho, ktorá časť rotačného paraboloidu tvorí anténu (obr.6) sa parabolické antény rozdeľujú na:

- Antény stredové, ohniskové (prime focus)
- Antény ofsetové
- Cassegrainove antény
- Gregoriánska

Dnes je najčastejšie používaná ofsetová konfigurácia. Odstraňuje zatienenie plochy antény prijímacím LNB blokom. Najmä pri menších priemeroch antén je tento jav významný a dovoľuje tak použitie menšej ofsetovej antény s rovnakým ziskom ako by mala taká istá, ale väčšia stredová anténa. Ostatné konfigurácie sú používané hlavne v profesionálnych aplikáciách. Obdoba Cassegrainovej antény sa používa ale napríklad pre príjem z viacerých družíc naraz. Odpadá tak problém s natáčaním paraboly.



Obr. 7.: Rozdelenie reflektorových parabolických antén. [13]

Dôležitým aspektom je tak výber vhodného polomeru prijímacej antény. Treba voliť kompromis. Voľbou väčšieho polomeru je síce úroveň prijímaného signálu väčšia, ale rastie tým aj smerovosť antény. Nároky na presné nastavenie a stabilizáciu môžu potom presiahnuť možnosti používateľa. Smerovosť antény je kvantitatívne popísaná šírkou hlavného laloka označovaného θ a jej veľkosť sa dá určiť zo vzťahu [10]:

$$\theta = \frac{\chi \cdot \lambda}{d} = \frac{\chi \cdot c}{d \cdot f}, \quad (21)$$

kde λ je vlnová dĺžka pozorovaného žiarenia, d polomer antény a f frekvencia pozorovaného žiarenia. Konštante χ sa vraví anténny faktor a jej rozmer je $[\circ]$. V jeho definícii sa publikácie rôznia. Pre potreby aplikácie stačí uviesť, že závisí na tom, ako je ožarovaná plocha antény, resp. je daná smerovou charakteristikou LNB. Tento vzťah potom udáva uhlovú veľkosť pozorovaného miesta na oblohe.

Dôležitým parametrom je ďalej zisk antény G definovaný ako pomer efektívnych plôch antény S_{ef} a izotropného žiariča S_i podľa

$$G_{max} = \frac{S_{ef}}{S_i} = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{ef} . \quad (22)$$

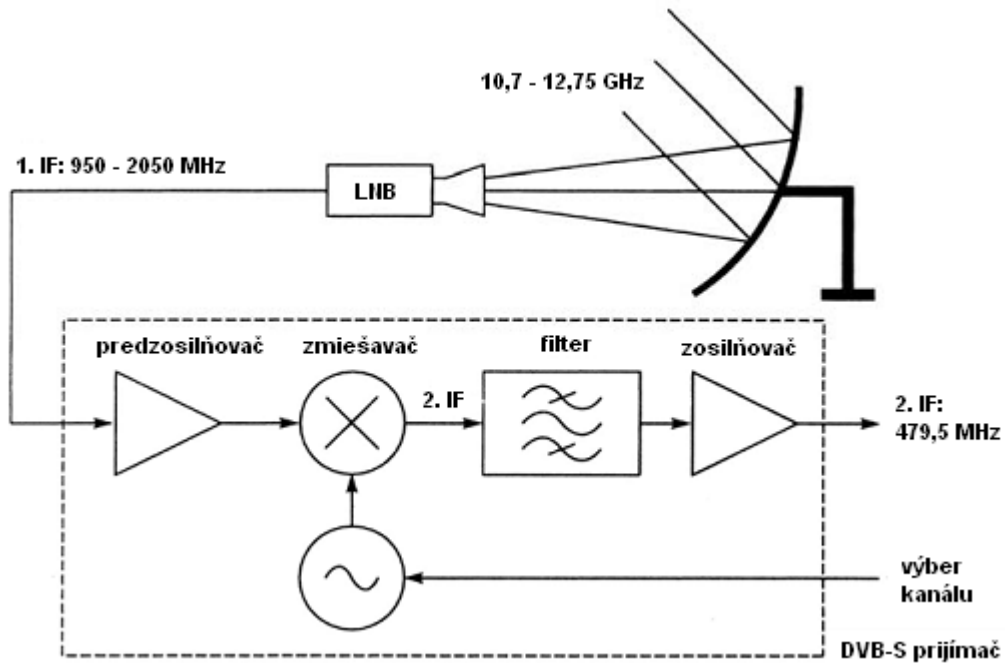
Potom pre plošnú anténu s kruhovou apertúrou s polomerom D platí

$$G_{max} = \eta \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 , \quad (23)$$

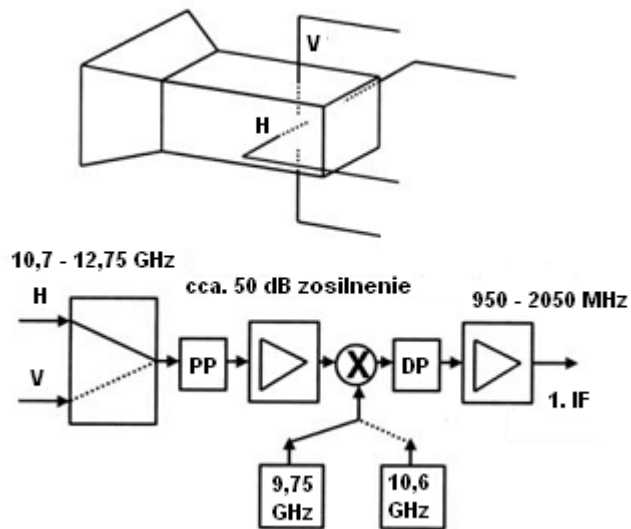
kde η je účinnosť antény daná efektívnej a skutočnej plochy antény. Pri správne ožarovanom parabolickom zrkadle je dosahované $\eta = 0,6$.

Treba si ďalej uvedomiť, že anténa bude umiestnená vo voľnom priestore a bude tak vystavená poveternostným vplyvom, tak aj požiadavky na pevné uchytenie budú pri väčších anténach vysoké. Čiastočne sa tento vplyv dá eliminovať použitím sieťovej štruktúry. Sieťová (alebo tzv. mesh) anténa má značne nižšiu hmotnosť a jej vyžarovací diagram je takmer ideálny za podmienky, že rozostupy medzi jednotlivými drôtmí budú menšie ako desatina prijímanej vlnovej dĺžky. Navyše je treba pri výbere paraboly dbať na kvalitu vyhotovenia. Podmienkou je navyše, že odchýlka od parabolického tvaru nesmie byť na okraji viac než šestnástina vlnovej dĺžky prijímaného vlnenia.

V ohnisku antény sa nachádza prijímač – konvertor (LNB, resp. LNC, z angl. Low noise block, resp. Low noise converter). Ten obsahuje vlnovodné vedenie spolu s detektormi pre vertikálnu a horizontálnu polarizáciu. Rovina polarizácie je vyberaná pomocou amplitúdy napájacieho napätia LNB bloku (14/18 V) superponovaného na koaxiálnom vedení po ktorom sa súčasne prenáša prijímaný signál. Ten je následne obdobne ako v družicovom transpondéri frekvenčne posunutý do prvého medzifrekvenčného (1. IF) pásma (950 – 2050 MHz). Tak sa deje pomocou lokálneho oscilátora zabudovanom v LNB, ktorý generuje kmitočet 9,75 GHz, resp. 10,6 GHz podľa toho, či sa prijímaný signál nachádza v dolnom, resp. hornom kmitočtovom pásme transpondéru. Výber konkrétneho kmitočtu lokálneho oscilátora je pomocou 22kHz prepínacieho napätia superponovaného opäť na napájanie LNB. Signál v prijímači prechádza ďalšou frekvenčnou transláciou smerom nadol do druhého medzifrekvenčného (2. IF) satelitného pásma – 479,5 MHz – pomocou IQ zmiešavača riadeného oscilátorom z obvodu obnovenia nosného kmitočtu.



Obr. 8.: Blokové schéma prijímacej sústavy systému DVB-S. [11]



Obr. 9.: Bloková schéma LNB bloku. [11]

2.3 Meranie signálu pri prijíme DVB-S

Meranie signálu prijímaného DVB-S prijímačom sa zameriava na testovanie 4 hlavných parametrov DVB-S signálu:

- úroveň prijímaného signálu,
- šumový pomer C/N (carrier to noise ratio),
- chybovosť BER ,
- potlačenie ramien spektra.

Pre meranie sú potrebné:

- spektrálny analyzátor,
- DVB-S merací prijímač s meraním *BER*,
- DVB-S testovací a merací vysielateľ pre meranie set-top boxov a IDTV prijímačov.

Meranie chybovosti je pre navrhovanú aplikáciu irelevantné, preto bude pozornosť zameraná predovšetkým na meranie úrovne signálu. Pre úplnosť je však dobré uviesť, že meranie chybovosti je založené na porovnávaní prijatých bitov pred a po dekódovaní. Podiel bitových chýb k celkovému počtu prijatých bitov sa rovná hodnote parametra *BER*.

Pre meranie výkonu v prijímanom kanále môže byť použitý spektrálny analyzátor. Ten vyhodnocuje úroveň prijatého výkonu v zadanej frekvenčnej oblasti s príslušným krokom využívajúc algoritmu rýchlej Fourierovej transformácie (FFT). Spektrálny analyzátor môže byť využitý aj pre stanovenie parametra *C/N*.

Niektoré prijímače majú zabudované meranie výkonu. Jednosmerný signál je buď vyvedený, zväčša v zadnej časti prístroja, alebo je meranie priamo prístupné cez užívateľské menu prístroja s výstupom na obrazovku. Výstupom je buď hodnota v absolútnej miere alebo relatívnej. V takom prípade hodnote 0% odpovedá medzná citlivosť prístroja a hodnote 100% hodnota, kedy dôjde k saturácii. Konkrétne hodnoty je potom možné získať kalibráciou prístroja pomocou testovacieho vysielateľa.

Meranie výkonu je pri parametroch:

- stredná frekvencia (center frequency) na strede DVB-S kanálu,
- span (frekvenčný rozsah) 100 MHz,
- resolution bandwidth (rozlíšenie šírky pásma) 2 MHz,
- video bandwidth (šírka pásma zobrazenia) 10 MHz,
- detektor RMS,
- parameter slow sweep time (doba rozmetania) 2000 ms,
- noise marker (merač šumu) na stred kanálu.

Vďaka približne šumovým vlastnostiam signálu je možné použiť šumový marker pre meranie výkonu signálu.

Predtým, než bude rozobraný návrh systému, je vhodné sa oboznámiť s uvádzaním hodnôt v decibelovej miere. Vzhľadom na rozsah hodnôt s akými sa v bežnej praxi pracuje je to vhodné a prehľadnejšie.

Bel je bezrozmerná miera udávajúca pomer medzi dvoma veličinami. A nazvaná je podľa vynálezcu A.G.Bella. Decibel je potom jeho desaťnásobok. Väčšinou sa používa pre pomer výkonov podľa

$$P_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad (24)$$

kde P_0 vyjadruje pomernú veličinu, väčšinou miliwatt. Potom sa je jednotkou dBm. V prípade porovnávania napätí, ktoré sú na konštantnej impedancii dané odmocninou z výkonu, sa celý vzťah násobí exponentom napätia dva. V satelitnej technike je zaužívaná jednotka [dBμV] vyjadrujúca mieru vzťahnutú k 1 mikrovoltu. Vhodné je pamätať si, že pokles výkonu o 3dB značí pokles na polovicu a o 10 dB na desatinu. Pri napätí je to potom odmocnina z polovice, resp. desatiny. Lepšie je však opäť si zapamätať, že pokles napätia o 6dB, je pokles napätia na polovicu.

3. Návrh meracej aparatury

Pomocou teoretických úvah prezentovaných v prvých dvoch kapitolách práce bol navrhnutý systém pre meranie signálov s frekvenciami, ktoré ležia v pásme využívanom v systéme DVB-S. Cieľom bolo, aby aparatura bola ľahko dostupná ako fyzicky, tak cenovo. Obe podmienky sú ľahko splniteľné, nakoľko v dnešnej dobe využíva takmer každá domácnosť príjem TV signálu systémom DVB-S, prípadne si ho za cenu rádovo pár tisíc českých korún (cca. 200 eur) dokáže zaobstarat'.

Základom tak bola parabolická ofsetová anténa s priemerom 90 cm. LNB bloky boli k dispozícii 3:

- Alps BSTE8-601B,
- Sharp K73,
- Grundig AUN 12S.

Pripojenie LNB k vstupu prijímača bolo pomocou 10 metrového koaxiálneho káblu na oboch stranách ukončeného F-konektormi. Ako prijímač bol použitý moderný DVB-S prijímač HUMAX F1-CI. Z prijímača bol signál vyvedený pomocou SCART káblu do AV vstupu TV prijímača. Prijímač HUMAX F1-CI umožňuje meranie prijímaného signálu cez užívateľské menu s výstupom na obrazovku TV prijímača. Z tej môžu byť hodnoty zapisované, prípadne môže byť meranie automatizované cez sériové rozhranie RS-232. [14]

3.1 Praktické možnosti a presnosť prijímacieho systému

Pri konkrétnom experimente je dôležité vziať do úvahy, čo daný výsledok reprezentuje a ukrýva. Výsledný prijímaný signál totiž okrem užitočného signálu obsahuje množstvo rušivých vplyvov, ktoré sa nachádzajú či v mieste príjmu, alebo na ceste signálu. Väčšinou ide o šumy tepelného pôvodu

3.1.1 Fotónový šum

Fotónový šum je daný predovšetkým kvantovou povahou prijímaného elektromagnetického žiarenia. Príčinou vzniku je skutočnosť, že fotóny dopadajú na apertúru meracieho systému náhodne, a to ako v čase, tak aj priestore. Fotónový šum sa riadi Poissonovým rozdelením pravdepodobnosti [15]:

$$P(p|\rho, T) = \frac{(\rho T)^p e^{-\rho T}}{p!}, \quad (25)$$

kde p značí počet vzniknutých fotónov (náhodná veličina), T je dĺžka časového intervalu, po ktorú je systém vystavený žiareniu a ρ značí počet fotónov prijatých za sekundu. Ďalej nech

$$N = \rho T \quad (26)$$

značí počet prijatých fotónov. Potom pre rozptyl meraných hodnôt σ platí:

$$\sigma = \sqrt{N}. \quad (27)$$

3.1.2 Šum prístrojov

Šum použitých elektronických prístrojov – LNB, prijímač – je určený hlavne použitými súčiastkami, šumovým prispôbením jednotlivých častí a konkrétnou konštrukciou. Tieto druhy šumov sa v najväčšej miere podieľajú na výsledkoch experimentov. Tzv. šumové čísla F sa dajú vyčítať z katalógových listov výrobcov komponentov a prístrojov. V dnešnej dobe bežné LNB bloky dosahujú šumového čísla $F = 0,1$ dB. Nízkošumové zosilňovače (LNA) dnes dosahujú úrovne $F = 0,5$ dB a menej. Tieto údaje poskytované výrobcami však nie vždy zodpovedajú realite, nakoľko aj šumové číslo je uvádzané s určitou presnosťou. Preto je výhodnejšie si toto číslo zmerať. [16] Všetko závisí od možností finančných a časových.

Ďalším aspektom, ktorý môže znehodnotiť meranie je rušenie tzv. human noise. Ako samotný anglický názov naznačuje, ide o rušivé vplyvy, ktoré si človek priamo či nepriamo zapríčinil sám. Pri pozorovaní oblohy v pásme DVB-S je samozrejme vždy prítomný signál z blízkej družice vysielajúcej na danej frekvencii. Hlavne pri pozorovaní Slnka je dôležité vziať túto skutočnosť do úvahy. Čiastočne sa toto rušenie dá potlačiť smerovosťou prijímacieho systému, prípadne voľbou kmitočtu a polarizácie prijímaného signálu.

Pri citlivejšom snímaní je vhodné umiestniť prijímaciu anténu ďalej od prijímača a hlavne ďalej od počítačov. Pri uvážení pravouhlého hodinového signálu dnešných procesorov $f_{clk} = 2,5$ GHz, môže stále intenzívna 5. harmonická spôsobiť rušenie pri prijímaní.

3.1.2 Nepresnosť odčítania

Ako už bolo spomenuté, nepresnosť odčítania súvisí s diskretizáciou stupnice. V prípade prijímača HUMAX F1-CI je stupnica delená nerovnomerne. Ako bude neskôr ukázané, v oblasti vybudenia je krok stupnice rovný 1 – 2 percentám. Táto nepresnosť môže byť čiastočne preklenutá interpoláciou (napríklad pri pozorovaní, že systém rytmicky prepína medzi dvoma stavmi, môže sa experimentátor rozhodnúť pre aritmetický priemer týchto dvoch stavov). Napriek tomu býva táto nepresnosť jedným z hlavných zdrojov nepresností.

Všetky tieto aspekty treba vziať do úvahy, aby sa experimentátor vyhol napríklad časovo náročnému návrhu nízkošumového zosilňovača a LNB pre požadovaný kmitočet a nakoniec narazil na skutočnosť, že jeho prijímací systém ako celok nie je natoľko citlivý a presný, aby tieto presné parametre zužitkoval.

4. Experiment

Experimentálne overenie systému bolo vykonané pri meraní Slnka za jasného dňa 25.4.2010. Parametre prijímacieho systému boli uvedené v kap.3. Zhrnutie:

- 90 cm parabolická ofsetová anténa (materiál Al - Hliník),
- 3 rôzne LNB bloky:
 - Alps BSTE8-601B,
 - Sharp K73,
 - Grundig AUN 12S,
- 10 metrový koaxiálny kábel (75 Ω),
- DVB-S prijímač HUMAX F1-CI
- TV prijímač AIWA

Meranie bolo vykonané v kopuli Masarykovej univerzity:

- Zemepisná šírka: 49° 12' 15,9",
- Zemepisná dĺžka: 16° 35' 0,5",
- Nadmorská výška 305 m.n.m.

Meranie bolo koncipované pre detekciu prechodu Slnka cez apertúru antény. Anténa bola nastavená do miesta predpokladaného prechodu a následne boli v minútových intervaloch zapisované hodnoty detekovanej úrovne signálu. Použili sa k tomu 3 rôzne LNB a každý bol použitý na rôznom páre frekvencií. Nakoľko údaje boli odčítané v relatívnej miere, bola vykonaná kalibrácia na presnom spektrálnom analyzátore (tab.3).

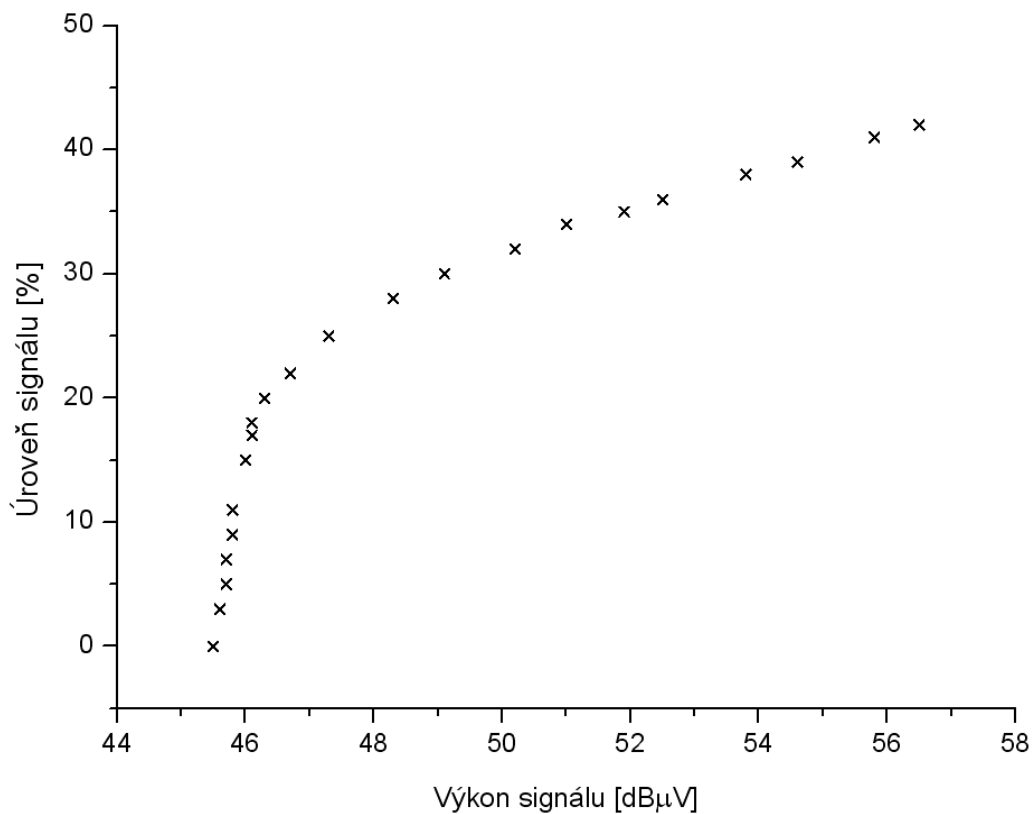
Úroveň signálu [%]	42	41	39	38	36	35	34	32	30	28	25
Výkon signálu [dBμV]	56,5	55,8	54,6	53,8	52,5	51,9	51,0	50,2	49,1	48,3	47,3
Úroveň signálu [%]	22	20	18	17	15	11	9	7	5	3	0
Výkon signálu [dBμV]	46,7	46,3	46,1	46,1	46,0	45,8	45,8	45,7	45,7	45,6	45,5

Tab. 3.: Dáta pre kalibráciu DVB-S prijímača HUMAX F1-CI.

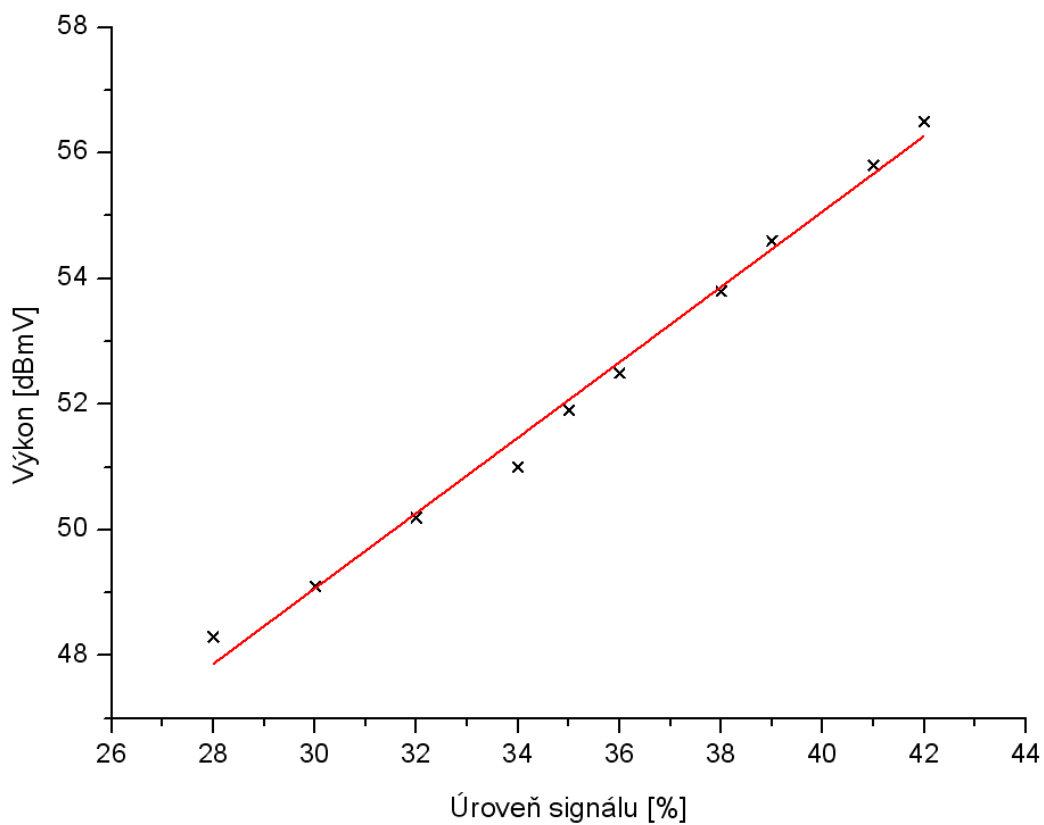
Z obr.10 je evidentné, že pri úrovni signálu od 28% do 42% je závislosť úrovne signálu na prijímanom výkone približne lineárna. Programom OriginPro 8 bol získaný predpis priamky:

$$P = (31,061 \pm 0,683) + (0,600 \pm 0,019) \cdot P' \quad (28)$$

vhodný pre kalibráciu prijímača v danom rozsahu (červená priamka v obr.11), kde P značí výkon signálu v dBμV a P' meranú úroveň signálu v %.



Obr. 10.: Meraná závislosť úrovne signálu na prijímanom výkone signálu.



Obr. 11.: Lineárna oblasť závislosti úrovne signálu na prijímanom výkone signálu.

Kalibrácia bola vykonaná na družici ASTRA na pozícii 23,5° východne. Prijímané žiarenie bolo privedené cez útlmový člen na spektrálny analyzátor, kde boli odčítané hodnoty výkonu v [dBμV] a zároveň boli odčítané hodnoty úrovne signálu z meraného prijímača HUMAX v [%]. Relatívna chyba určenia priamky podľa (28) je

$$\delta = \frac{\delta_k}{k} = \frac{0,019}{0,600} = 3,2 \% . \quad (29)$$

Následné meranie bolo vykonané za vyššie zmiených podmienok. Výsledky sú uvedené v tab.4.

Čas [min]	LNB					
	ALPS		Sharp		Grundig	
	12 544 MHz	12 183 MHz	12 183 MHz	12 525 MHz	12 544 MHz	12 525 MHz
	Meraná úroveň signálu [%]					
1	43	49	53	49	41	41
2	43	49	53	49	41	41
3	43	49	53	49	41	41
4	44	50	54	50	42	42
5	45	51	57	50	43	43
6	46	52	59	51	45	45
7	47	53	61	52	47	46
8	48	54	63	53	48	47
9	49	57	64	54	49	48
10	49	58	65	57	50	48
11	49	58	65	58	50	47
12	49	58	65	59	50	46
13	49	57	64	58	49	45
14	48	54	63	57	48	43
15	47	53	61	54	47	43
16	46	51	58	52	46	42
17	45	50	54	52	45	41
18	44	49	53	51	43	41
19	43	49	53	50	42	41
20	43	49	53	49	41	41
21	43	49	53	49	41	41
22	43	49	53	49	41	41

Tab. 4.: Merané úrovne prijímaného signálu pre rôzne použité LNB.

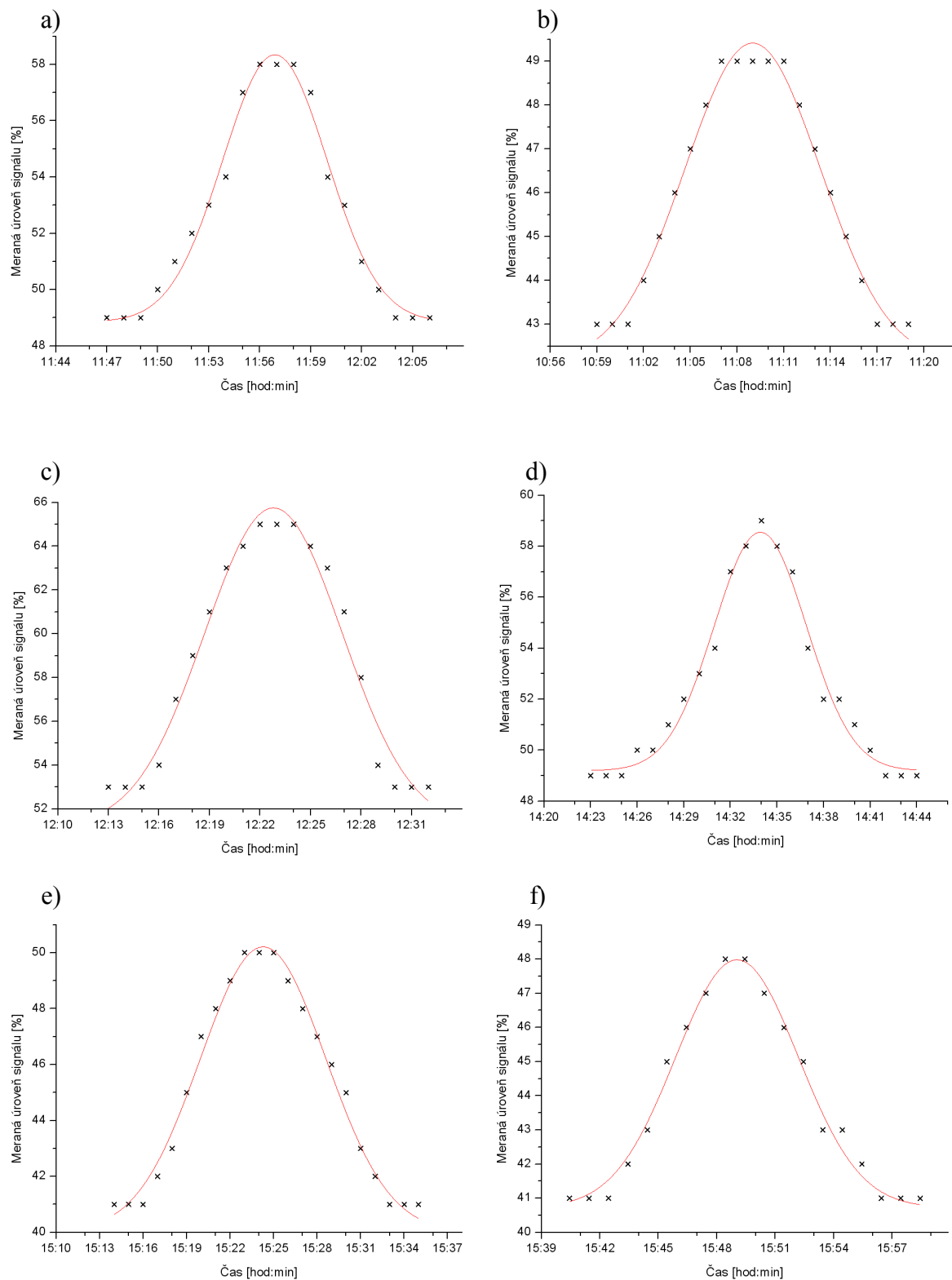
Kalibračný vzťah (28) je vypočítaný z oblasti úrovne signálu, ktorý je pod oblasťou meraných úrovní v experimente. V danom prípade je možné tento vzťah extrapolovať aj do oblastí úrovní meraných pri experimente. Akokoľvek sa zdá, že závislosť sa chová logaritmicky, nie je tomu celkom tak a preto sa muselo pri kalibrácii vychádzať z lineárnej časti

charakteristiky. Pri kalibrácii nebolo daných výkonov dosiahnutých z dôvodu pozorovania družice s menším výstupným výkonom. Prepočítané hodnoty meraných výkonov sú v tab.5.

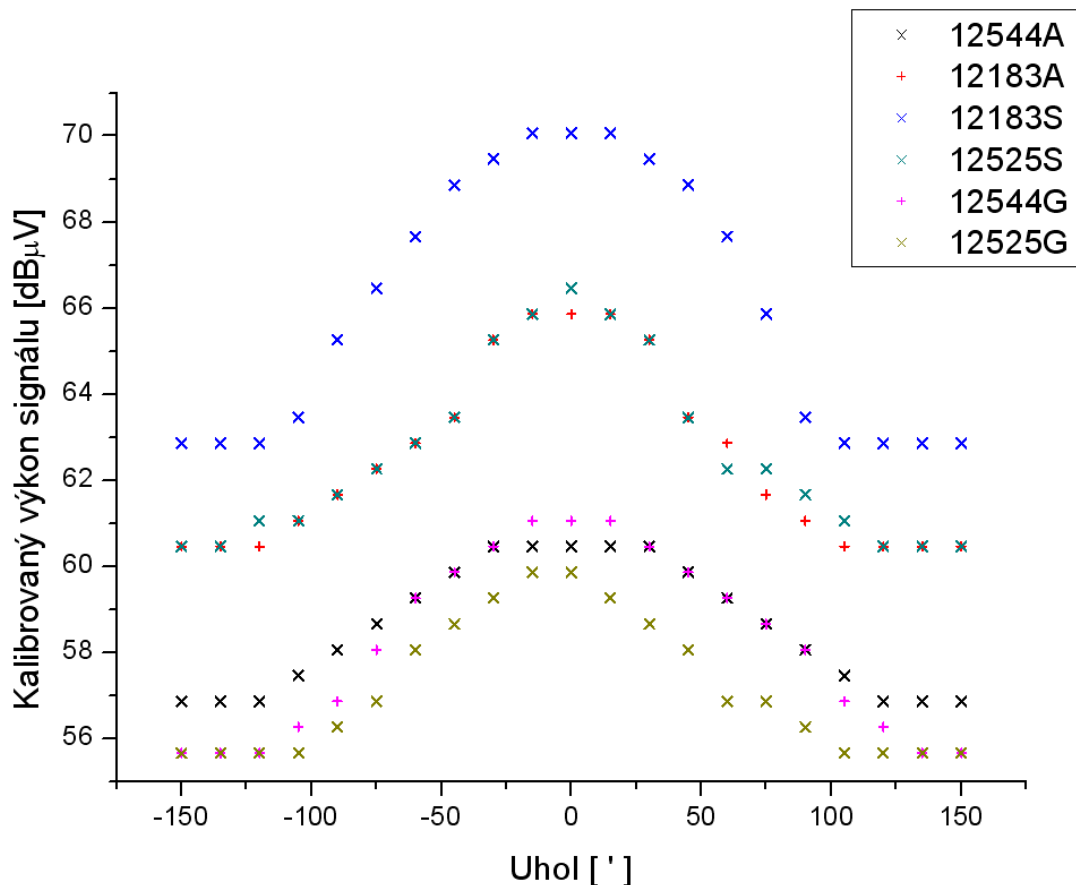
Čas [min]	LNB					
	ALPS		Sharp		Grundig	
	12 544 MHz	12 183 MHz	12 183 MHz	12 525 MHz	12 544 MHz	12 525 MHz
	Meraný výkon signálu [dBμV]					
1	56,861	60,461	62,861	60,461	55,661	55,661
2	56,861	60,461	62,861	60,461	55,661	55,661
3	56,861	60,461	62,861	60,461	55,661	55,661
4	57,461	61,061	63,461	61,061	56,261	56,261
5	58,061	61,661	65,261	61,061	56,861	56,861
6	58,661	62,261	66,461	61,661	58,061	58,061
7	59,261	62,861	67,661	62,261	59,261	58,661
8	59,861	63,461	68,861	62,861	59,861	59,261
9	60,461	65,261	69,461	63,461	60,461	59,861
10	60,461	65,861	70,061	65,261	61,061	59,861
11	60,461	65,861	70,061	65,861	61,061	59,261
12	60,461	65,861	70,061	66,461	61,061	58,661
13	60,461	65,261	69,461	65,861	60,461	58,061
14	59,861	63,461	68,861	65,261	59,861	56,861
15	59,261	62,861	67,661	63,461	59,261	56,861
16	58,661	61,661	65,861	62,261	58,661	56,261
17	58,061	61,061	63,461	62,261	58,061	55,661
18	57,461	60,461	62,861	61,661	56,861	55,661
19	56,861	60,461	62,861	61,061	56,261	55,661
20	56,861	60,461	62,861	60,461	55,661	55,661
21	56,861	60,461	62,861	60,461	55,661	55,661
22	56,861	60,461	62,861	60,461	55,661	55,661

Tab. 5.: Merané výkony prijímaného signálu pre rôzne použité LNB.

Namerané dáta boli následne vynesené do grafu (obr.12a až 12f). Na osi x je vyneseny priamo skutočný čas merania. Na osi y je meraná relatívna úroveň prijímaného signálu odčítaná z výstupu DVB-S prijímača. Namerané priebehy boli následne preložené Gaussovou krivkou programom OriginPro 8. Na obr.13 sú ďalej zobrazené priebehy s osou x prepočítanou v uhlovej miere zmeny azimutu voči polohe maximálnej úrovne prijímaného signálu. Na os y je už ale vynášaný výkon signálu kalibrovaný pomocou vzťahu (28).



Obr. 12.: Merané závilosti úrovně přijímaného signálu na čase pro různé kmitočty a použité LNB: a) ALPS 12 183 MHz, b) ALPS 12 544 MHz, c) Sharp 12 183 MHz, d) Sharp 12 525 MHz, e) Grundig 12 544 MHz, f) Grundig 12 525 MHz.



Obr. 13.: Závislosť kalibrovaného výkonu signálu na odchýlke smeru k Slnku voči smeru pozorovania.

Legenda na obr.13 charakterizuje jedno meranie pre danú frakvenciu v MHz a písmeno označuje prvé písmeno výrobcu použitého LNB.

4.1 Určenie parametrov systému

Z preloženia Gaussovou krivkou (obr.12) bol zistený parameter FWHM (full width at half maximum – šírka charakteristiky na polovičnej úrovni maxima), ktorý vyjadruje šírku hlavného laloka θ podľa (21). Tieto parametre sú uvedené v tab. 6. V prvom stĺpci sú uvedené skratky pre dátový blok ako v obr.13. Pre tieto boli odčítané hodnoty FWHM v sekundách a prepočítané do uhlovej miery zo znalosti, že ak berieme do úvahy iba zemskú rotáciu, tak za 1 minútu sa obloha otočí o 15 uhlových minút.

Meranie	FWHM [min:sek]	Amplitúda [%]	Θ [°]
12544A	11:09 ± 0:34	7,46 ± 0,29	2,79 ± 0,14
12183A	7:40 ± 0:19	9,49 ± 0,28	1,92 ± 0,08
12183S	10:13 ± 0:45	14,54 ± 0,77	2,55 ± 0,19
12525S	7:25 ± 0:20	9,35 ± 0,31	1,85 ± 0,08
12544G	10:50 ± 0:31	10,19 ± 0,34	2,71 ± 0,13
12525G	7:53 ± 0:21	7,25 ± 0,22	1,97 ± 0,09

Tab. 6.: Meranie šírky hlavného laloka.

Šírku hlavného laloka je možné vypočítať ako priemernú šírku $\bar{\theta}$ podľa

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_i \theta_i}{n} = 2,30^\circ, \quad (30)$$

kde n je počet meraní. Rozptyl bude potom

$$s^2 = \frac{\sum_i (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n-1} = 0,19^\circ. \quad (31)$$

Dosadením do (21) je možné za predpokladu strednej frekvencie 12 500 MHz vypočítať strednú hodnotu anténneho faktora AF

$$\chi = \frac{\bar{\theta} \cdot d \cdot f}{c} = \frac{2,30 \cdot 0,9 \cdot 12,5 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} \doteq (86,3 \pm 0,7)^\circ. \quad (32)$$

Táto hodnota dobre súhlasí s teoretickou, ktorá v bežných aplikáciách predpokladá hodnotu okolo 70° . Následne je možné zo vzťahu (23) dopočítať teoretickú hodnotu zisku antény:

$$G_{\max} = \eta \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 = 0,6 \left(\frac{\pi \cdot 0,9}{0,024} \right)^2 = 8327 = 39 \text{ dB}. \quad (33)$$

4.2 Určenie citlivosti systému

Pre určenie citlivosti systému je dôležité uviesť si pôsobenie jednotlivých faktorov vstupujúcich do merania.

Jeden z neodstrániteľných šumov – fotónový šum – vyplýva z kvantovej povahy spracovávaného žiarenia a bol teoreticky rozobraný v kap. 3.1.1. Energia jedného fotónu dopadajúceho žiarenia je daná podľa (15)

$$E = h \cdot f = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 12,5 \cdot 10^9 = 8,28 \cdot 10^{-24} \text{ J} = 5,17 \cdot 10^{-5} \text{ eV}. \quad (34)$$

Intenzita prijímaného žiarenia je daná podľa (16), kde E_{ef} je meraná hodnota výkonu signálu. Potom pre najnižšiu úroveň detekovaného žiarenia (LNB Grundig) platí

$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{ef}^2 = \frac{1}{c\mu_0} \left(10^{\frac{1}{20}} \cdot 10^{-6} \right)^2 = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \left(10^{\frac{55,661}{20}} \cdot 10^{-6} \right)^2 \doteq 9,8 \cdot 10^{-10} \text{ W.m}^{-2}. \quad (35)$$

Potom pre počet prijatých fotónov N platí

$$N = \frac{I}{E} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{9,8 \cdot 10^{-10}}{8,3 \cdot 10^{-24}} \pi \left(\frac{0,9}{2} \right)^2 \doteq 7,5 \cdot 10^{13} \text{ fotónov.s}^{-1}. \quad (36)$$

Rozptyl meraných hodnôt je potom podľa (27)

$$\sigma = \sqrt{N} = \sqrt{7,5 \cdot 10^{13}} = 9 \cdot 10^6 . \quad (37)$$

Neurčitosť merania je recipročnou hodnotou rozptylu a teda

$$\sigma^{-1} = \frac{1}{9 \cdot 10^6} \doteq 10^{-7} , \quad (38)$$

čo znamená, že tento šum nie je potrebné brať do úvahy.

Neurčitosť merania súvisiaca s diskretizáciou stupnice je daná vzdialenosťou medzi dvoma bodmi merania. Krok v stupnici úrovne signálu mal veľkosť 2%. Avšak v prípade, že dochádzalo k rytmickému prepínaniu, bola zapisovaná hodnota daná aritmetickým priemerom týchto hodnôt. Táto nepresnosť však nemusí byť na škodu hlavne pri „fitovaní“ nameraných priebehov. Táto nepresnosť, ako bolo ukázané je zároveň najväčším obmedzením pri získavaní presnejších hodnôt.

5. Záver

V práci boli rozobrané teoretické aspekty prijmu rádiových signálov z kozmických objektov. Tie boli aplikované v navrhnutom systéme pre detekciu žiarenia Slnka v mikrovlnnej oblasti. Z dôvodu dostupnosti bol zvolený systém primárne určený pre príjem digitálneho TV signálu systémom DVB-S. Navrhnutý systém bol odskúšaný a kalibrovaný. Meraním prechodu Slnka popred hlavný lalok systému boli overené teoretické hodnoty hlavných parametrov systému. V prvom rade bola po preložení nameraných dát Gaussovou krivkou s parametrami podľa tab.6 spočítaná šírka hlavného laloka pre pokles o 3dB $\theta = (2,30 \pm 0,19)^\circ$. Takisto anténny faktor $\chi = (86,3 \pm 0,7)^\circ$ sa zhoduje s teoretickou hodnotou, ktorá sa volí väčšinou 70° . Zisk antény bol vypočítaný čisto teoreticky pre pracovnú frekvenciu $f = 12,5$ GHz a účinnosť $\eta = 0,6$; $G_{\max} = 39$ dB.

Systém má svojimi parametrami značné rezervy. Tie sú cenou za nízku cenu komerčne dostupných súčastí. Ukázané to bolo na tom, že teoretické obmedzenie neurčitosti merania vyplývajúce z fotónového šumu je rádu 10^{-7} , pričom ale hodnoty boli odčítané s presnosťou 10^{-2} . Vylepšenie by teda mohlo byť buď v integrácii hodnôt a eliminovaní tak šumu prístrojov.

Práca bola poňatá ako manuál pre niekoho, kto by rád začal s pozorovaním oblohy v rádiovom obore. Pokračovaním tejto práce by teda bol skôr návrh a zhotovenie systému tak povediac „na mieru“.

6. Bibliografia

- [1] Halliday D., Resnick R., Walker J.: *Fyzika, část 3: Elektřina a magnetismus*. Brno: VUTIUM, 2003.
- [2] Čechová M., Vyšín I.: *Teorie elektromagnetického pole*. Olomouc: VUP, 1998.
- [3] http://sk.wikipedia.org/wiki/Gaussov_z%C3%A1kon_elektrostatiky (citované 1.5.2010)
- [4] http://www.kemt.fei.tuke.sk/predmety/KEMT320_EA/_materialy/2008/cvicenia/%DAloha_2.t%FD%9Ede%F2_Rezonan%E8n%E9_obvody.pdf (citované 1.5.2010)
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_%28waves%29 (citované 1.5.2010)
- [6] <http://www.sev.wz.cz/temy/7.php> (citované 1.5.2010)
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum (citované 1.5.2010)
- [8] Prokeš A.: *Přednášky z předmětu BRPV*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009.
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum
- [10] Kasal M.: *Přednášky z předmětu MSDS*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2003.
- [11] Kratochvíl T.: *Přednášky z předmětu MDTV*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [12] http://www.radio-electronics.com/info/satellite/communications_satellite/satellite-communications-basics-tutorial.php (citované 1.5.2010)
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_antenna (citované 1.5.2010)
- [14] Manuál k přijímači HUMAX F1-CI.
- [15] <http://www.ktl.elf.stuba.sk/portal/?a=1&id=207> (citované 1.5.2010)
- [16] <http://www.parabola.cz/clanky/667/overujeme-sumove-cislo-konvertoru/>
(citované 1.5.2010)
- [17] <http://www.elmag.org/lib/exe/fetch.php/k317:ekr:uloha2.pdf>