MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky astrofyziky

Bakalářská práce

Brno 2023 Tereza Rybníčková

MASARYKOVA
UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY ASTROFYZIKY

Radioteleskop pro příjem signálu neutrálního vodíku

Bakalářská práce

Tereza Rybníčková

Vedoucí práce:

Prof. Mgr. Vít Kudrle, Ph.D. **Brno 2023**

Bibliografický záznam

Autor:	Tereza Rybníčková Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky astrofyziky
Název práce:	Radioteleskop pro příjem signálu neutrálního vodíku
Studijní program:	Fyzika
Studijní obor:	Astrofyzika
Vedoucí práce:	Prof. Mgr. Vít Kudrle, Ph.D.
Akademický rok:	2022/2023
Počet stran:	xiv + 70
Klíčová slova:	radioastronomie, neutrální vodík, hyperjemný přechod, parabolická anténa, vlnovod, galaktický vodík, SDR

Bibliographic Entry

Author:	Tereza Rybníčková Faculty of Science, Masaryk University Department of theoretical physics and astrophysics
Title of Thesis:	Radiotelescope for neutral hydrogen line
Degree Programme:	Physics
Field of Study:	Astrophysics
Supervisor:	Prof. Mgr. Vít Kudrle, Ph.D.
Academic Year:	2022/2023
Number of Pages:	xiv + 70
Keywords:	radio astronomy, neutral hydrogen, hyperfine transition, parabolic antenna, waveguide, galactic hydrogen, SDR

Abstrakt

Neutrální vodík je jedním z klíčových objektů radioastronomie. S jeho pomocí lze mimo jiné zmapovat galaktické struktury napříč vesmírem, zjistit rychlost rotace spirálních ramen a pozorovat signál z raného věku vesmíru. Detekce neutrálního vodíku je možná i s běžnou satelitní parabolou, vyladěnou přijímací anténou a přijímačem SDR (*Software defined radio*). Díky poznatkům o elektromagnetickém poli jsme vyrobili vhodnou přijímací anténu z cylindrického vlnovodu, sestavili vhodnou kaskádu zesilovačů, aby byl signál zachytitelný a důkladně proměřili všechny části aparatury. Signál neutrálního vodíku se nám podařilo zachytit, ale byl příliš slabý na kompletní zmapování Galaxie, nicméně graficky znázorníme Dopplerovský posun vodíkových mračen v galaktické rovině.

Abstract

Neutral hydrogen is one of the key objects of radio astronomy. Using neutral hydrogen, we can map galactic structures throughout the Universe, find the rotational velocity of spiral arms and observe the signal from early stages of the Universe. The detection of neutral hydrogen is possible with a common parabolic dish, a tuned feed antenna and with an SDR (Software defined radio) receiver. With the help of electromagnetic field theory, we built a feed antenna from a cylindrical waveguide, we assembled a suitable cascade of amplifiers in order for the signal to be receivable and we did a test measure of all aspects of the aparature. We received the signal of neutral hydrogen, however it was too weak for a complete map of the Galaxy. Nevertheless, we illustrated graphically the Doppler's shift of hydrogen clouds in the galactic plane.

MUNI
SCI

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KOTLÁŘSKÁ 2, 611 37 BRNO
IČ: 00216224
DIČ: CZ00216224

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2022/2023

Ústav:	Ústav fyzikální elektroniky
Studentka:	Tereza Rybníčková
Program:	Fyzika
Specializace:	Astrofyzika

Ředitel *ústavu* PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s názvem:

Název práce:	Radioteleskop pro příjem signálu neutrálního vodíku
Název práce anglicky:	Radiotelescope for neutral hydrogen line
Jazyk závěrečné práce:	čeština

Oficiální zadání:
Hlavním cílem je ověřit možnosti příjmu radiového signálu neutrálního vodíku na vlnové délce 21 cm za pomocí nenáročného, běžně dostupného vybavení. Nejvíce tvůrčí činnosti lze očekávat při návrhu a realizaci antény s vysokým ziskem a úzkopásmového filtru. Sestavení kaskády předzesilovačů a obsluha programem řízeného digitálního přijímače (SDR - software defined radio) bude tou jednodušší částí. Nedílnou součástí práce bude samozřejmě zpracování naměřených dat. Očekávaným výstupem pak bude intenzitní mapa oblohy, v případě kvalitního signálu včetně Dopplerovských posunů.

Vedoucí práce:	prof. Mgr. Vít Kudrle, Ph.D.
Datum zadání práce:	17. 11. 2021
V Brně dne:	23. 5. 2023

Zadání bylo schváleno prostřednictvím IS MU.

Tereza Rybníčková, 22. 5. 2023
prof. Mgr. Vít Kudrle, Ph.D., 23. 5. 2023
RNDr. Luboš Poláček, 23. 5. 2023

Poděkování

Největší poděkování si zaslouží vedoucí mé bakalářské práce, pan profesor Kudrle, za veškerý čas strávený na přípravě práce, v laboratoři a při konzultacích, ale především taky za neuvěřitelnou trpělivost s mým nesystematickým způsobem práce a pevné nervy se zdánlivě nekonečnou iterací oprav vzorců a slovních formulací v textu samotném. Dále bych ráda poděkovala svým rodičům, kteří mi zajistili podporu a občas potřebnou přepravu aparatury. Velké díky patří i panu doktoru Michalovi Pazderkovi za propůjčení antén na měření a sestavení úžasného nastavitelného upevnění pro přijímací anténu. V poslední řadě bych chtěla poděkovat svým přátelům a mému partnerovi, který mi dodal největší motivaci celou práci dokončit.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího práce s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 23. května 2023

. . . . . .

Tereza Rybníčková

Obsah

Úvod **1**

Kapitola 1. Elektromagnetické vlny **3**
1.1 Šíření elektromagnetických vln ve volném prostředí 3
1.2 Šíření elektromagnetických vln v materiálovém prostředí 5
1.3 Šíření elektromagnetických vln na vedení 5
1.3.1 Vlnovody 5
1.3.2 Koaxiální vedení 9
1.4 Šíření elektromagnetických vln v okolí antén 9
1.4.1 Vlastnosti antén 11

Kapitola 2. Radioastronomie **17**
2.1 Historie 17
2.2 Rádiové vlny 19
2.3 Přírodní zdroje rádiového záření 19
2.3.1 Záření absolutně černého tělesa 19
2.3.2 Brzdné záření 20
2.3.3 Přechody v atomech a molekulách 20
2.4 Neutrální vodík 20
2.4.1 Čára vodíku 21 cm 20
2.4.2 Rozložení H I v Galaxii 22
2.5 Radioastronomická pozorování 24
2.5.1 Rádiové okno 24
2.5.2 Šíření rádiových vln v zemské atmosféře 24
2.5.3 Dopplerův jev 25
2.6 Příjem rádiového signálu 26
2.6.1 Přijímač SDR 28
2.6.2 Zesilovač 29
2.7 Význam radioastronomie a neutrálního vodíku 30

Kapitola 3. Praktická část **33**
3.1 Software 33
3.2 Parabolická anténa 34
3.3 Přijímací anténa 1 34

3.3.1 Rozměry 35
3.3.2 Vyzařovací prut 36
3.4 Přijímací anténa 2 43
3.4.1 Rozměry 45
3.4.2 Ladění impedance 47
3.5 Zesilovač 48
3.6 Přijímač SDR 52
3.7 Porovnání přijímacích antén 52
3.8 Sestavení aparatury 53
3.9 Měření galaktického vodíku 56

Kapitola 4. Závěr 65

Seznam použité literatury 67

Úvod

Radioastronomie se může jako obor astronomie často jevit opomíjená. Přitom právě ona přinesla spoustu velkých objevů jak na fyzikálním, tak na astronomickém poli, jmenovitě například reliktní záření, pulsary, aktivní jádra galaxií, podílí se na detekci gravitačních vln a nebo pomáhá zkoumat vesmírné magnetické pole. Jedním z výrazných zkoumaných objektů radioastronomie je neutrální vodík.

Vodík je sám o sobě nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru. Jeho použití (nejen) v radioastronomii je tedy velmi rozšířené. Neutrální vodík je vodíkový atom v základním energetickém stavu. Pozorujeme ho pomocí spektrální čáry H I 21 cm. Ta vzniká při překlopení spinu v atomu vodíku, čímž se změní jeho energetický stav. Měřením neutrálního vodíku se zabývá mnoho špičkových radioteleskopů, např. *Green Bank Telescope, Very Large Array*, nebo třeba radioteleskop v *Parkes observatory*.

K pozorování neutrálního vodíku ale není třeba velkých radioteleskopů. Přestože je jeho signál slabý, k jeho detekci můžeme využít i menší běžné antény na příjem televizního signálu. Díky této možnosti se měření signálu neutrálního vodíku stalo oblíbeným jak pro školní projekty, tak pro radioamatéry. Nevýhodou některých těchto projektů je často jejich nepřesný popis, ukazující pouze vybavení a výsledky, bez odbornějšího komentáře.

Cílem této práce bude sestrojit radioteleskop pro příjem neutrálního vodíku z naší Galaxie pomocí detailně popsaných technik, na základě poznatků opírajících se o teorii elektromagnetického pole. K dispozici budeme mít pouze offsetovou parabolickou anténu a běžně dostupné součástky, ale samotné měření budeme provádět profesionálním vybavením. Důležitým komponentem aparatury bude přijímací anténa, kterou musíme navrhnout, vyrobit, vyladit a správně umístit na parabolickou anténu. Jelikož je neutrální vodík jako zdroj záření slabý, je nutné k jeho detekci využít zesilovačů. Budeme zjišťovat, jakého zesílení jsou schopné a jaký šum do měření přidají. V neposlední řadě signál zpracujeme a zjistíme, zda-li jsme schopni s naším radioteleskopem neutrální vodík zachytit. V případě dobrého signálu získáme radiální rychlost galaktických ramen a pokusíme se sestavit mapu intenzity vodíkového záření.

Kapitola 1

Elektromagnetické vlny

1.1 Šíření elektromagnetických vln ve volném prostředí

Elektromagnetické vlnění je kmitání elektrického a magnetického pole. Elektromagnetické vlnění popisuje vlnová rovnice. Ta se dá odvodit z Maxwellových rovnic pro vakuum:

$$\operatorname{div}\mathbf{E} = 0 \tag{1.1}$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \tag{1.2}$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{1.3}$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{B} = \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \tag{1.4}$$

kde $\mathbf{E}$ je intenzita elektrického pole, $\mathbf{B}$ je magnetická indukce, ε_0 relativní permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Fm^{-1}) a μ_0 je relativní permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Hm^{-1}). Dále na rovnici (1.18) můžeme použít operaci rotace

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\operatorname{rot}\mathbf{B} = -\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \tag{1.5}$$

což nadále pomocí identit (rot rot $\equiv$ grad div - Δ) upravíme jako

$$\operatorname{grad}\operatorname{div}\mathbf{E} - \Delta\mathbf{E} = -\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \tag{1.6}$$

ovšem grad div$\mathbf{E}$ je roven nule, proto zbude vlnová rovnice pro elektrickou složku elektromagnetického vlnění (pro magnetickou složku bude postup obdobný).

$$\Delta\mathbf{E} - \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \tag{1.7}$$

Fázová rychlost pak bude $v_\mathrm{f} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ což odpovídá rychlosti šíření světla ve vakuu c. Pro jiná prostředí než pro vakuum platí

$$v = \frac{\mathrm{c}}{\mathrm{n}} \tag{1.8}$$

kde n je index lomu daného prostředí. Elektromagnetické vlnění dále členíme dle vlnové délky nebo dle frekvence.

Jedno z možných harmonických řešení vlnové rovnice se uvádí jako

$$\mathbf{E}(r,t) = \mathbf{E_0}\sin(\omega t - \mathbf{kr} + \phi) \tag{1.9}$$

popřípadě pro magnetickou složku

$$\mathbf{B}(r,t) = \mathbf{B_0}\sin(\omega t - \mathbf{kr} + \phi) \tag{1.10}$$

Zde $\mathbf{E_0}$ (případně $\mathbf{B_0}$) jsou fázory pole, ω je kruhová frekvence, $\mathbf{k}$ je vlnový vektor ($|\mathbf{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$, jeho směr je identický se směrem šíření), r je vzdálenost od počátku ($r = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$) a ϕ je fáze vlny.

Rovnice

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} \tag{1.11}$$

definuje Poyntingův vektor $\mathbf{S}$, který udává plošnou hustotu toku energie. Směr šíření energie je kolmý na rovinu, ve které kmitají vektory $\mathbf{E}$ a $\mathbf{B}$, pro rovinnou vlnu je totožný s jejím směrem šíření.

Nejtypičtější elektromagnetické vlny jsou vlny rovinné a vlny kulové. Kulová vlna vzniká z bodového zdroje, od kterého se šíří rovnoměrně ve všech směrech. V dostatečné vzdálenosti s od zdroje (s$>> \lambda$) se dá kulová vlna aproximovat vlnou rovinnou šířící se v jednom směru.

Další charakteristické dělení vln je dle charakteru elektrického a magnetického pole vlny. Předpokládejme směr šíření $\mathbf{r} = (0, 0, z)$:

1. **Transverzálně magnetické vlny** (TM-vlny), kdy je magnetické pole kolmé na směr šíření z (a zároveň $B_z = 0$)

2. **Transverzálně elektrické vlny** (TE-vlny), kdy je elektrické pole kolmé na směr šíření ($E_z = 0$)

3. **Transverzálně elektromagnetické vlny** (TEM-vlny), kdy jak elektrické, tak magnetické pole jsou kolmé na směr šíření ($B_z = 0$ a $E_z = 0$), takovou vlnu nazýváme příčnou vlnou. Ve výuce fyziky na SŠ a VŠ je často uváděno zavádějící tvrzení, že v elektromagnetickém vlnění je na sebe kolmá elektrická a magnetická složka. Toto je platné jen a pouze pro TEM-vlny.

Impedance Z je komplexní veličina složená z reálné rezistance a imaginární reaktance. Udává poměr mezi napětím a elektrickým proudem, přesněji mezi elektrickým polem E a magnetickým polem B. Rezistanci R lze vypočítat použitím Ohmova zákonu. Reaktance X může být ovlivněna kapacitní složkou (nazýváme ji pak kapacitance), vypočítáme ji

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \tag{1.12}$$

kde f je frekvence obvodu a C je kapacita. Pro induktivní složku kapacitance lze použít vztah

$$X_L = 2\pi f L \tag{1.13}$$

Impedanci vakua můžeme popsat

$$Z = 120\pi\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \tag{1.14}$$

1.2 Šíření elektromagnetických vln v materiálovém prostředí

Pro popis šíření elektromagnetických vln v prostředí používáme Maxwellovy materiálové rovnice

$$\varepsilon \operatorname{div} \mathbf{E} = \rho \tag{1.15}$$

$$\mu \operatorname{div} \mathbf{H} = 0 \tag{1.16}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \tag{1.17}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{j} \tag{1.18}$$

Zde ρ je objemová hustota elektrického náboje, $\mathbf{j}$ je proudová hustota ε je permitivita materiálu. Zjednodušený vztah (bez magnetizace) pro intenzitu magnetického pole $\mathbf{H}$ je

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu} \tag{1.19}$$

kde μ je permeabilita materiálu. Při šíření elektromagnetické vlny na vodivém prostředí lze pozorovat *skin effect*. To znamená, že elektromagnetické pole klesá směrem pod povrch prostředí s charakteristickou hloubkou vniku δ

$$\delta = \sqrt{i\omega\sigma\mu} \tag{1.20}$$

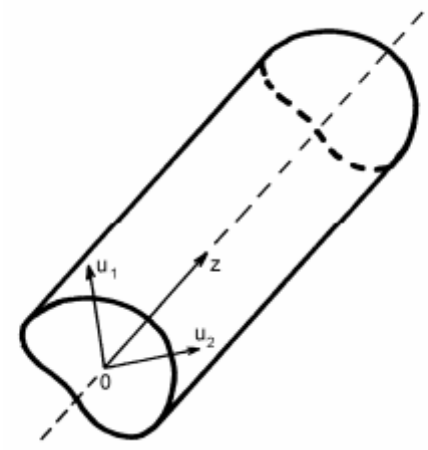
Zde σ je konduktivita materiálu.

1.3 Šíření elektromagnetických vln na vedení

Pro vedení vysokofrekvenčních vln nelze použít klasické paralelní dvouvodičové vedení, jelikož způsobuje silný a rychlý útlum amplitudy a samotné vedení se chová jako zářič. Proto používáme speciální druhy vedení, zejména koaxiální systémy a nebo vlnovody.

1.3.1 Vlnovody

Teoretickou definicí vlnovodu rozumíme systém vodičů a nebo dielektrik, podél kterých lze přenášet elektromagnetickou energii [7]. Prakticky se ale vlnovodem rozumí jednovodičové duté vedení. Nejčastější typy vlnovodů jsou například pravoúhlý a cylindrický vlnovod. Elektromagnetické pole je ve svém šíření omezeno stěnami vlnovodu, šíří se tedy jen podél jeho osy. V důsledku to znamená, že ve vlnovodech nalezneme pouze vlny typu TM nebo TE ve vzájemné superpozici.



Obrázek 1.1: Válcové souřadnice ve vlnovodu [7].

Při zavedení válcových souřadnic (nejlépe vystihujících symetrii vlnovodu) lze popsat elektromagnetické vlnění

$$\mathbf{E}(u_1,u_2,z,t) = \mathbf{E}_0(u_1,u_2)e^{i\omega t \mp \gamma z} \tag{1.21}$$

$$\mathbf{H}(u_1,u_2,z,t) = \mathbf{H}_0(u_1,u_2)e^{i\omega t \mp \gamma z} \tag{1.22}$$

kde γ je koeficient šíření ($\gamma = \sqrt{k^2 - \omega^2\varepsilon\mu}$, k je vlnové číslo, ε permitivita prostředí a μ permeabilita prostředí). Povahu chování vln ve vlnovodu určuje koeficient šíření. Uvažujeme tři hlavní případy:

1. γ je reálné číslo

$$\omega < \frac{k}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \tag{1.23}$$

   Vlnový faktor zapíšeme jako $e^{i\omega t - \gamma z}$, je to tedy tlumená vlna šířící se v kladném směru osy z. Frekvence elektromagnetického pole je omezena rovnicí (1.40), vyšší frekvence se ve vlnovodu šířit nemohou kvůli jejich rychlému útlumu.

2. γ je ryze imaginární číslo

$$\omega > \frac{k}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \tag{1.24}$$

   Koeficient útlumu pak můžeme zapsat $\gamma = i\beta = i\sqrt{\omega^2\varepsilon\mu - \mathrm{k}^2}$ a vlnový faktor zapíšeme jako $\mathrm{e}^{i(\omega t - \beta z)}$. Toto je popis vlny s konstantní amplitudou.

3. $\gamma = 0$

$$\omega = \frac{k}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \omega_k \tag{1.25}$$

   ω_k označujeme jako mezní frekvenci. Elektromagnetické pole tak kmitá s faktorem $e^{i\omega t}$ a nezávisí na souřadnici z. Vlnovod je neprůhledný pro vlny s $\omega < \omega_k$.

Na stěně vlnovodu je nutné uplatnit okrajové podmínky:

$$E_z = 0 \tag{1.26}$$

$$\frac{\delta H_z}{\delta n} = 0 \tag{1.27}$$

Známe-li mezní frekvenci vlnovodu, můžeme vyjádřit i kritickou vlnovou délku

$$\lambda_\mathrm{k} = \frac{2\pi v}{\omega_\mathrm{k}} = \frac{2\pi}{k} \tag{1.28}$$

Pro vlnovody platí, že se v nich nemohou šířit vlny s delší vlnovou délkou, než je ta kritická. Lze si povšimnout, že vlnovod je disperzní prostředí, tedy vlnová délka ve vlnovodu závisí na frekvenci, což je důležitou vlastností vlnovodu. Vlnová délka ve vlnovodu λ_v odpovídá

$$\lambda_\mathrm{v} = \frac{\lambda}{\sqrt{1-(\frac{\lambda}{\lambda_\mathrm{k}})^2}} \tag{1.29}$$

Jelikož je spodní část zlomku v rovnici (1.34) vždy menší než jedna, plyne z toho, že vlnová délka je ve vlnovodu delší než ve volném prostředí.

Kruhový vlnovod

Jelikož v aparatuře používáme cylindrický (nebo také kruhový) vlnovod jako přijímací anténu, je vhodné rozebrat povahu elektromagnetického pole uvnitř tohoto typu vlnovodu. Kruhovým vlnovodem myslíme vlnovod o konstantním kruhovém průřezu a. Kruhový vlnovod je méně používaným typem vlnovodu (oproti obdélníkovému), zejména kvůli tomu, že má o mnoho menší interval frekvencí, které zajišťují jednovidové šíření vlny a neudrží polarizaci vlny. Řešení vlnové rovnice je pro tento typ nejvhodnější v polárních souřadnicích (r, φ, z). Jelikož je chování vlny ve funkci souřadnice z popsané standardní harmonickou funkcí pro vlnové rovnice, v textu se budeme zabývat jen příčnými složkami. Vlnová rovnice vypadá

$$\frac{\delta^2\Psi}{\delta r^2} + \frac{1}{r}\frac{\delta\Psi}{\delta r} + \frac{1}{r^2}\frac{\delta^2\Psi}{\delta\varphi^2} + k^2\Psi = 0 \tag{1.30}$$

Při řešení použijeme opět okrajové podmínky na stěně vlnovodu (kdy $r = a$) (1.26) a (1.27). Řešením bude součin dvou funkcí.

$$\Psi(r,\varphi) = R(r)\Phi(\varphi) \tag{1.31}$$

Funkce Φ bude závislá na úhlu φ a jejím řešením bude harmonická funkce. Důležitější je funkce R, kterou lze zapsat pomocí kombinace Besselových funkcí prvního a druhého řádu. Fyzikální smysl má ovšem pouze ta prvního řádu ($J_m(kr)$). Výsledná vlna bude vypadat následovně.

$$\Psi(r,\varphi) = C_1 J_m(kr)\cos(m\varphi) \tag{1.32}$$

C_1 je integrační konstanta. Řád Besselových funkcí m nabývá pouze celých čísel (tzn. m = 0, 1, 2, ...), stejně tak i číslo kořene n. Pro TM-vlny platí podmínka (1.26). Při jejím uplatnění na rovnici (1.32) dostaneme

$$J_m(k\mathrm{a}) = 0 \tag{1.33}$$

To znamená, že výraz *ka* bude roven n-tému kořenu Besselovy funkce m-tého řádu, který označíme jako u_{mn}. Vlnové číslo pak lze vyjádřit jako

$$k = \frac{u_{mn}}{a} \tag{1.34}$$

Podélné magentické (TM) vlny zapíšeme tedy jako

$$E_z(r,\varphi) = C_1 J_m(\frac{u_{mn}}{a} r)\cos(m\varphi) \tag{1.35}$$

$$H_z = 0 \tag{1.36}$$

Obdobně z okrajové podmínky pro TE-vlny (1.26) dostaneme vlnové číslo

$$k = \frac{u'_{mn}}{\mathrm{a}} \tag{1.37}$$

Zde u'_{mn} představuje n-té řešení m-tého kořene derivace Besselovy funkce. Rovnice pro podélné elektrické vlny bude vypadat:

$$H_z(r,\varphi) = C_2 J_m(\frac{u_{mn}}{a} r)\cos(m\varphi) = 0 \tag{1.38}$$

$$E_z = 0 \tag{1.39}$$

Dle řešení je evidentní, že TM-vlny a TE-vlny budou mít v cylindrickém vlnovodu nekonečně mnoho vidů. Označme si je jako TM_{mn} a TE_{mn}. Obecně se tyto vidy šíří ve vlnovodu v superpozici. Z tabulky 1.1 a 1.2 lze dedukovat, že dominantním videm v cylindrickém vlnovodu bude vid TE_{11}, jelikož má nejnižší možný kmitočet. Vid TM_{01} bude pak druhý nejdominantnější.

m	n				
	0	1	2	3	4
1	2,405	3,832	5,135	6,379	7,586
2	5,520	7,016	8,417	9,761	11,065
3	8,654	10,173	11,620	13,015	14,373
4	11,792	13,324	14,796	16,223	17,616

Tabulka 1.1: Prvních 5 kořenů Besselovy funkce J_m [7]

Pro určení mezní frekvence $\mathrm{f_c}$ jednotlivých vidů použijeme vztah (1.34)

$$f_\mathrm{c} = \frac{2\pi u_{mn}}{a} \tag{1.40}$$

Po dosazení $\mathrm{u'}_{11}$ a u_{01} do rovnice (1.40) dostaneme interval frekvencí, při kterých se bude vlnovodem šířit pouze dominantní vid TE_{11}.

m	n					
	0	1	2	3	4	5
1	3,832	1,841	3,054	4,201	5,317	6,416
2	7,016	5,331	6,706	8,015	9,282	10,520
3	10,173	8,536	9,969	11,846	12,682	13,987
4	13,324	11,706	13,170	14,586	15,964	17,313

Tabulka 1.2: Prvních 6 kořenů derivace Besselovy funkce J'_m [7]

1.3.2 Koaxiální vedení

Nejtypičtějším případem vysokofrekvenčního dvouvodičového systému je koaxiální vedení. Elektromagnetická vlna se šíří mezi dvěma souosými válci s poloměry R_0 a r_0. Pro mezní vlnovou délku platí vztah analogický vztahu (1.40), s příslušnými hodnotami řešení Besselovy funkce J_{mn} a pro $a = r_0$. Vztah pro kritickou vlnovou délku lze aproximovat

$$\lambda_n \approx \frac{2\pi r_0(x-1)}{(n-1)\pi} \tag{1.41}$$

Zde $x = \frac{R_0}{r_0}$ a n je číslo kořene Besselovy funkce.

Dominantní typ vlny v koaxiálním vedení je TEM-vlna, za jistých podmínek se v něm ale v superpozici vyskytují i TE a TM vlny, které však v praxi chceme omezit. Největší kritickou vlnovou délku má TEM-vlna (nekonečně dlouhou), z TM a TE vidů je to vid TE_{11}, je tedy nutné, aby vlny přenášené vlnovodem měly vlnovou délku větší než $\lambda_{TE_{11}}$. Při jeho použití ve vysokofrekvenčních obvodech používáme impedanci 50 Ω nebo 75 Ω. Impedance koaxiálního vedení se počítá jako poměr napětí a proudu přes Gaussův zákon a Ampérův zákon (které lze použít, jelikož má koaxiální vedení válcovou symetrii) a vychází jako

$$Z = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ln\left(\frac{R_0}{r_0}\right) \tag{1.42}$$

1.4 Šíření elektromagnetických vln v okolí antén

Anténa je součástka, která umožňuje převádět elektromagnetické vlny z volného média do vlnovodu. Podstatná vlastnost všech antén je reciprocita, může signál přijímat i vyzařovat.

Pro pochopení funkce antén je potřeba pochopit vznik elektromagnetické vlny. Tentokrát místo Maxwellových rovnic pro **E** a **B** využijeme pro větší názornost vektorové potenciály. Jako zdroj elektromagnetické vlny se uvádí vysokofrekvenční střídavý proud. Pokud bychom chtěli zjistit intenzitu elektrického pole v prostoru vytvořenou právě tímto proudem, museli bychom vyřešit materiálové Maxwellovy rovnice (1.3) a (1.4). Jejich řešení můžeme hledat pomocí dynamických potenciálů $\phi(\mathbf{x},t)$ a $\mathbf{A}(\mathbf{x},t)$, přičemž

$$\mathbf{B} = \mathrm{rot}\mathbf{A} \tag{1.43}$$

$$\mathbf{E} = -\mathrm{grad}\phi - \frac{\delta \mathbf{A}}{\delta t} \tag{1.44}$$

Tyto potenciály vedou pomocí úprav a zbylých Maxwellových rovnic na vlnové rovnice

$$\Delta\phi - \frac{1}{c^2}\frac{\delta^2\phi}{\delta t^2} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{1.45}$$

$$\Delta\mathbf{A} - \frac{1}{c^2}\frac{\delta^2\mathbf{A}}{\delta t^2} = \mu_0\mathbf{j} \tag{1.46}$$

Dále pro libovolnou složku potenciálu **A** zavedeme vlnovou funkci Ψ_1, která musí vyhovovat podmínce

$$\Delta\Psi_1 - w^2\Psi_1 = -\mu_0\mathbf{j} \tag{1.47}$$

Zde $w = \frac{1}{c}$. Zavedeme také novou vlnovou funkci Ψ_2 vyhovující homogenní vlnové rovnici

$$\Delta\Psi_2 - k^2\Psi_2 = 0 \tag{1.48}$$

Řešení budeme uvažovat na objemu V, ohraničeném plochou S, s pozorovatelem v bodě P, **n** normálu na plochu S a libovolnou vzdálenost od pozorovatele označíme jako r. Funkce Ψ_2 není v bodě P spojitá, vyloučíme ho tedy z objemu V kulovou plochou S_1. Rovnici řešíme pro Ψ_1(P)

$$\Psi_1(P) = \frac{\mu}{4\pi}\int_V j_{x,y,z}\frac{e^{-iwr}}{r}dV + \frac{1}{4\pi}\int_S\left(\Psi_1\frac{d\Psi_2}{dn} - \Psi_2\frac{d\Psi_1}{dn}\right)dS \tag{1.49}$$

Řešení rovnice (1.49) interpretujeme tak, že první člen na pravé straně rovnice odpovídá příspěvku proudů tekoucích v objemu V směrem k potenciálu v bodě P. Bude součtem elementárních kulových vln vyjadřujících proudy jednotlivých elementů. Druhý člen je příspěvek potenciálů na ploše S, které vznikly ze zdrojů ležících vně objemu V. Tomu můžeme rozumět tak, že každý bod na ploše S ozářený vnějším vlněním se bude chovat uvnitř plochy S jako zdroj elementárních kulových vln. Z toho plyne, že zdroj elektromagnetického vlnění může být i ozářená plocha. Při řešení rovnice (1.49) pro skutečné zdroje je tedy nutné znát buď proudovou hustotu (v případě drátových antén, kdy je zdroj vlnění proudový), přičemž uplatníme objemovou část integrálu, nebo potenciál **A** na ozářené ploše (v případě, že zdrojem bude ozářená plocha, např. u parabolické antény), uplatníme plošnou část integrálu. V praxi se pro zjednodušení výpočtů používá metoda elementárních zdrojů (tzn. počítáme intenzity dipólů, které se skládají do příslušného tvaru lineárního zdroje), nebo metoda Huygensova zdroje (tzn. vypočítá se intenzita nekonečně malé elementární plošky, které se skládají do plošného zdroje) [37].

Oblasti pole antény

Elektromagnetické pole antény se mění v závislosti na vzdálenosti od antény. Blízká reaktanční oblast se vyznačuje tím, že málo vyzařuje energii a převládá v ní reaktanční složka impedance. Nazýváme ji také Rayleighovou oblastí. Její hranice R je uváděna jako

$$R < 0,62\frac{d^3}{\lambda} \tag{1.50}$$

Kde d je největší rozměr antény. Další oblastí je blízká zářivá oblast (Fresnelova oblast). Je to přechodná zóna mezi blízkou reaktanční oblastí a vzdálenou oblastí. Zde se začíná

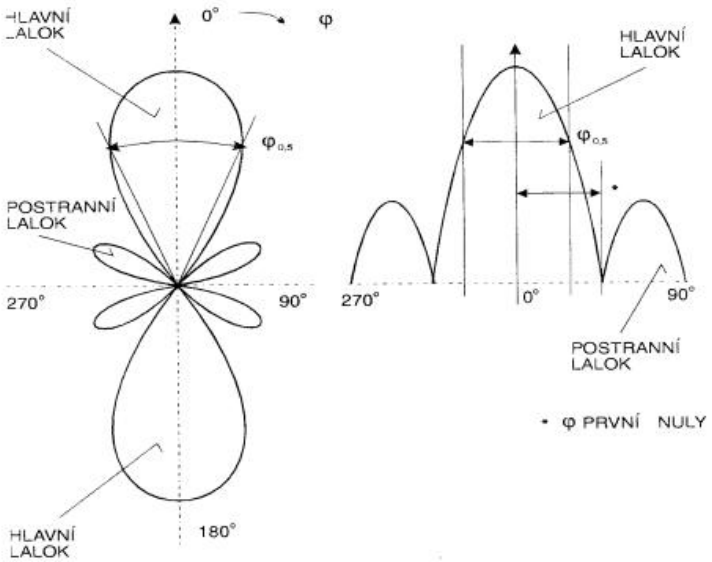
uplatňovat vyzařování antény, ale elektromagnetické pole se výrazně mění v závislosti na vzdálenosti od antény. Její limit je dán

$$0,62\frac{d^3}{\lambda} < R < \frac{2D^2}{\lambda} \tag{1.51}$$

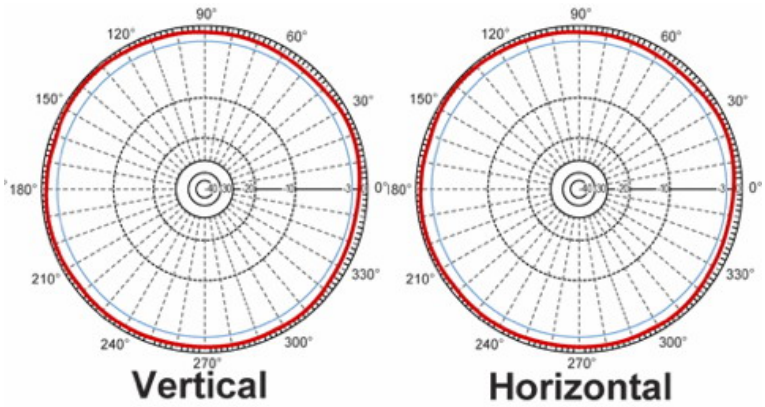
Ve vzdálené oblasti (Fraunhoferově) anténa prostorově vyzařuje (téměř) konstantně bez závislosti na vzdálenosti. Narozdíl od předchozích oblastí, kde byl útlum vyzářeného výkonu nepřímo úměrný vyšším mocninám vzdálenosti R, v této oblasti je nepřímo úměrný druhé mocnině. Pro TEM-vlny platí, že pole H (ve vakuu B) bude kolmé na pole E. Jelikož je vzdálená oblast stabilnější než oblasti blízké a hlavní využití antén je na velké vzdálenosti, právě v ní definujeme charakteristické veličiny, kterými popisujeme antény. (Poznamenejme, že specifické antény mohou fungovat na principu NFC, tedy *Near Field Communication*. To znamená, že pracují v oblasti blízkého pole a jejich charakteristické veličiny definujeme právě v něm. Nečastěji tuto technologii využíváme např. při bezkontaktním placením mobilem, při párování mobilních telefonů nebo pro kontaktní nabíjení smartphonů.)

1.4.1 Vlastnosti antén

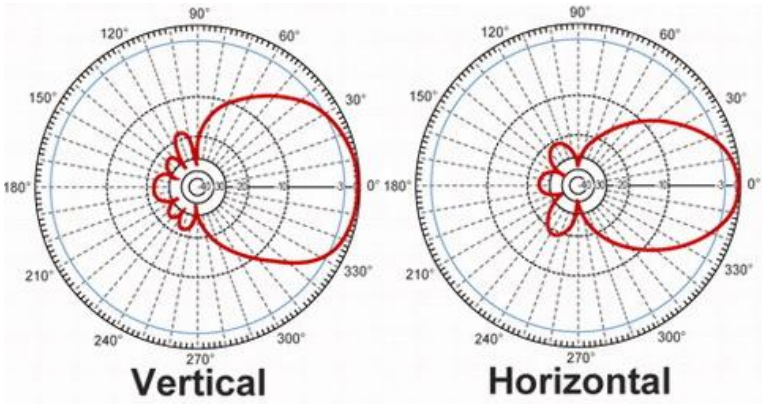
Důležitým parametrem antén je vyzařovací diagram (směrový diagram). Je to grafické znázornění vyzařovaného (nebo přijímaného) výkonu v závislosti na úhlu. Zpravidla se vynáší v polárních souřadnicích. Vyzařovací diagram se skládá z hlavního laloku (ve směru největšího vyzařování antény) a z bočních laloků (ostatní menší laloky). Vyzařovací diagram je specifický pro jednotlivé antény. Ze směrového diagramu nejen zjistíme směrovost (tedy citlivost vyzařování antény na směr), ale také vyzařovací úhel antény θ_0, tedy úhlovou šířku hlavního laloku do bodu, kde signál poklesne o 3 dB (tedy intenzita signálu klesne na polovinu). Důležitý referenčním bodem je dipólová anténa. Pro její vyzařovací charakteristiku jsou typické dva hlavní laloky postavené vůči sobě o 180°. Pro ideální všesměrovou (neboli izotropní) anténu by vyzařovací diagram byl ve všech směrech identický (obr.1.3). Pro směrovou anténu je typický jeden hlavní lalok a ideálně co nejmenší počet vedlejších (obr.1.4).



Obrázek 1.2: Vyzařovací charakteristika obecného dipólu v polárních souřadnicích (vlevo) a v kartézských (vpravo), zaznačen vyzařovací úhel antény (zde označen jako φ) [44].



Obrázek 1.3: Vyzařovací diagram fyzikálně nerealizovatelné všesměrové antény [46].



Obrázek 1.4: Vyzařovací diagram obecné směrové antény [46].

Směrovost antény je charakteristika popisující schopnost antény přijímat signál v závislosti na směru (typicky na výškovém úhlu θ a azimutálním úhlu ϕ). Vyjádříme jej činitelem směrovosti D. Ten vyjadřuje poměr ploch ozářených směrovou a všesměrovou anténou (při stejném výkonu).

$$D(\theta,\phi) = \frac{U(\theta,\phi)}{P_{\text{tot}}/4\pi} \tag{1.52}$$

Zde $U(\theta,\phi)$ představuje zářivost antény (tzn. intenzita záření na prostorový úhel) a P_{tot} je celkový vyzářený výkon

$$P_{\text{tot}} = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} U \sin\theta \mathrm{d}\theta \mathrm{d}\phi \tag{1.53}$$

Činitel směrovosti lze aproximovat následovně:

$$D_{\text{max}} \simeq \frac{4\pi(\frac{180}{\pi})^2}{\theta_E\,\theta_H} \simeq \frac{41\,253}{\theta_E\,\theta_H} \tag{1.54}$$

Zde θ_E a θ_H jsou vyzařovací úhly antény v rovině E a H (tedy v rovinách na sebe kolmých).

Dalším parametrem je zisk antény G. Ten udává kolikrát větší výkon poskytuje anténa vůči referenční anténě (se známým ziskem). Standardně zisk můžeme vztáhnout buď vůči půlvlnné dipólové anténě, nebo vůči izotropnímu zářiči. Zisk antény můžeme vyjádřit i pomocí činitele směrovosti antény D_{max}.

$$G_{\text{abs}} = 10\log D_{\text{max}} \tag{1.55}$$

Pro zisk oproti půlvlnnému dipólu použijeme vztah

$$G_{\text{rel}} = 10\log\frac{D_{\text{max}}}{1,64} \tag{1.56}$$

Konstanta 1,64 v rovnici (1.56) označuje maximální hodnotu směrovosti půlvlnného dipólu. Jednotka zisku je dB, je-li zisk vztažený k izotropnímu zářiči, píšeme jako dB_i, je-li vztažen k půlvlnnému dipólu, píšeme dB_d.

Šířka pásma antény určuje interval frekvencí kolem frekvence středové, pro které se intenzita signálu blíží té středové. Většinou to odpovídá poklesu o 3 dB. Rozdělujeme antény širokopásmové a úzkopásmové. Širokopásmové antény mají velký interval frekvencí, na kterých vyzařují/přijímají se srovnatelnými vlastnostmi.

Polarizace antény popisuje polarizaci vlny vysílané/přijímané anténou. Může být horizontálně polarizovaná, vertikálně polarizovaná, nebo také elipticky polarizovaná (speciální případ eliptické polarizace je kruhová polarizace).

Impedance antény by neměla mít imaginární složku. Správná impedance antény je nutná k minimalizování ztrát signálu. O anténě říkáme, že je v rezonanci, pokud má impedance pouze reálnou složku. Při skokové změně impedance na rozhraní mezi kabelem a anténou dochází pro vysokofrekvenční vlny k odrazu, tedy ztrátě signálu. Standardizovaná impedance koaxiálních kabelů a příslušenství je 50 Ω a 75 Ω, často je proto nutné anténu impedančně přizpůsobit, aby nedošlo k odrazu na rozhraní.

S-parametry

Při proměření antén budeme povětšinou používat síťový analyzátor *Rohde and Schwarz ZVL network analyzer* (pokud nespecifikováno jinak). Ten měří síťové parametry a impedanci obvodu Z.

Z pohledu síťového vedení se na anténu díváme jako na jednobran. Při měření parametrů antény se na vstup vrátí jen část signálu, jelikož byla zbylá část vyzářena. Poměr odraženého signálu a dodávaného signálu na bráně značí koeficient odrazu. Takto definujeme S-parametr na jednobranu.

Systém dvou antén považujeme za dvojbran. S-parametry tedy značí koeficienty odrazu na různých portech. Jsou-li například čísla portu shodná (např. S_{22}), vyznačují koeficient odrazu signálu na tomtéž portu. S-parametry tedy v případě dvojbranu tvoří matici 2x2. [27]

Síťové parametry měříme síťovým analyzátorem. Ty se dělí na dva typy; skalární a vektorové, přičemž vektorové kromě amplitud výše zmíněných veličin měří i fázi. Jelikož je síťový analyzátor nastaven na dvojbran, značí i u jedné antény parametr S jako S_{11}. V tomto značení budeme konzistentní, takže ho u jednobranu budeme brát jako ekvivalent S.

Kapitola 2

Radioastronomie

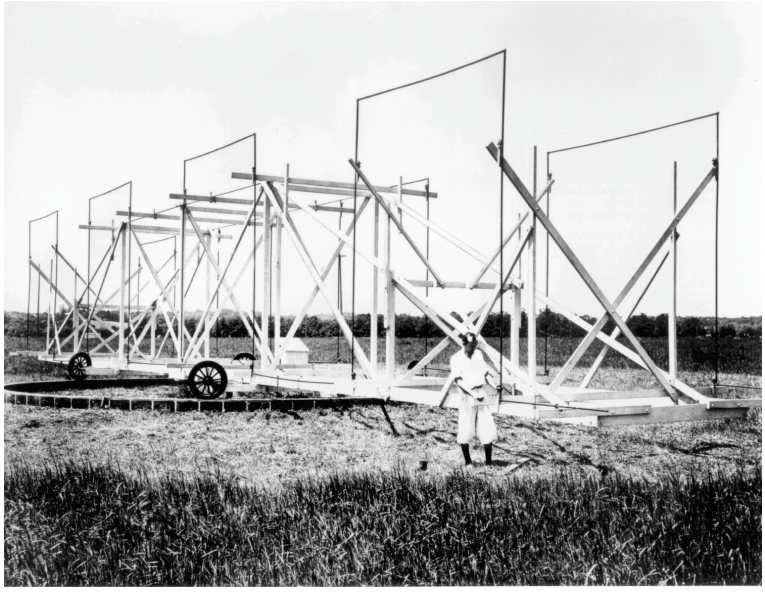
2.1 Historie

Radioastronomie je obor zabývající se zkoumáním rádiových signálů a jejich zdrojů z vesmíru. Úplné počátky radiofyziky sahají do 19. století. V tomto období se James Clerk Maxwell na King's college seznámil s Michaelem Faradayem. Maxwella zaujaly Faradayovy pokusy s elektromagnetickým polem, dal se tedy do jejich matematického popisu, což v roce 1867 vyústilo v sestavení čtveřice rovnic popisujících elektromagnetické pole; tzv. Maxwellových rovnic. Pomocí řešení těchto rovnic pak Maxwell předpověděl existenci elektromagnetických vln a položil tak základy radioastronomie. O dvacet let později, roku 1887, německý fyzik Heinrich Hertz jako první experimentálně potvrdil jejich existenci. Pokus spočíval ve vygenerování elektromagnetických vln pomocí LC obvodu a jejich následné detekci pomocí kovové smyčky s mikrometrovou mezerou mezi svými konci. Dle předpovědi by měly elektromagnetické vlny vytvořit na smyčce elektrický proud a mezi jejími konci by se měl vytvořit elektrický výboj, což se také potvrdilo.

Již v 19. století existovaly spekulace o tom, že bychom mohli z vesmíru přijímat rádiový signál, dle teorie se ve vesmíru vyskytovaly zdroje záření, například naše nejbližší hvězda Slunce. Pokusy o změření onoho signálu ovšem selhaly z důvodu nedostačující technologie. V roce 1901 navíc Gigliemo Marconi provedl pokus s přenosem rádiového signálu přes Atlantický oceán [14], přičemž úspěšné přijetí signálu spočívalo v odražení rádiových vln v atmosféře. Díky úspěchu pokusu se odvodilo, že se rádiové vlny v atmosféře odráží (což později vedlo na objev ionosféry) a veškeré pokusy o změření vesmírného rádiového signálu byly opuštěny.

Počátek radioastronomie jako takové sahá do 30. let 20. století. Jako spousta velkých objevů, i tento vznikl nedopatřením. Karl Guthe Jansky, výzkumný pracovník společnosti Bell, byl požádán o prověření zdroje šumu na pozadí komunikačního rádiového signálu. Jansky proto sestavil první radioteleskop (obr. 2.1), který vzhledem připomínal železné lešení a pro jeho schopnost rotace se mu přezdívalo *Merry-go-Round* (neboli kolotoč). S jeho pomocí se mu podařilo detekovat tři zdroje šumu; první dva byly interference lokálních a tropických bouřek, ovšem třetí byl pro Janského záhadou. Neustálým proměřováním oblohy zjistil, že tento typ rušivého signálu pochází z centra Galaxie, avšak o jeho zdroji se mohlo pouze spekulovat [15]. Jansky je doposud považován za otce radioastronomie, na jeho počest byla pojmenována jednotka spektrální intenzity jansky [Jy] (1

Jy = 10^{-26}Wm^{-2}Hz^{-1}). Ve své době Janskyho objev bohužel neupoutal dostatek pozornosti a Jansky nedostal prostředky ke zkoumání neznámého zdroje záření. Neodradilo to ale nadšence z laické veřejnosti, a tak první radioteleskop sestavil o pár let později radioamatér Grote Reber. Pomocí svého radioteleskopu zjistil, že nejsilnější zdroj vesmírného záření je v souhvězdí Střelce, avšak i jiné zdroje (jako Labuť, Velký pes nebo Kasiopea) jsou signifikantně intenzivnější. I přes prvotní zdráhání byla jeho měření publikována v Astrophysical Journal [16] a radioastronomie tak pronikla do akademické sféry.



Obrázek 2.1: První radioteleskop (zdroj: NRAO/AUI/NSF).

Reber teleskopem měřil široké spektrum vlnových délek, ovšem holanský fyzik Jan Oort si uvědomil, že zaměřit se pouze na jednu spektrální čáru bude efektivnější. Spojil se tedy s astronomem Henrikem van Hulstem, který jako nadějný objekt ke zkoumání navrhl hyperjemný přechod u neutrálního vodíku. Van Hulst předpověděl, že přechod bude mít vlnovou délku 21 cm a signál by měl být dostatečně intenzivní na to, aby se dal zachytit [18]. O sedm let později toto tvrzení potvrdili svým měřením Harold I. Ewen a Edward M. Purcell [31]. Neutrální vodík se stal pro svoje neobyčejně vysoké zastoupení ve vesmíru jedním z největších témat radioastronomie.

Během druhé světové války začala překotná snaha o zdokonalení rádiové technologie vzhledem k vojenskému využití radaru. To vedlo k vynalezení tranzistorového zesilovače, který byl oproti tehdy používanému elektronkovému přesnější, měl větší šířku pásma a hlavně byl lineární. Toto znamenalo slibný pokrok pro radioastronomii, jelikož se neustále posouvaly hranice měřitelné hranice signálu. Od té doby začaly radioastronomické objevy rapidně přibývat. Pro ilustraci v roce 1956 bylo objeveno, opět na základě rušení rádiového signálu, reliktní záření [28], v roce 1966 se díky radioastronomii odhalila existence pulsarů [34]. Dnešní radioastronomická měření jsou na míle vzdálená těm od Rebera a přináší zásadní poznatky o našem vesmíru z míst, kde pozorování jinými metodami není možné, tvoří tedy pomyslnou páteř astronomie.

2.2 Rádiové vlny

Rádiové vlny, předmět zkoumání radioastronomie, jsou součástí elektromagnetického spektra. Je to dlouhovlnné záření, definujeme ho frekvencemi od 3000 GHz a níže (což koresponduje s vlnovou délkou 0,1 mm a větší). Rádiové vlny dělíme dle frekvenčních pásem viz. tabulka 2.1.

Pásmo	**Frekvence**
ELF	3 – 30 Hz
SLF	30 – 300 Hz
ULF	300 – 3000 Hz
VLF	3 – 30 kHz
LF	30 – 300 kHz
MF	300 – 3000 kHz
HF	3 – 30 MHz
VHF	30 – 300 MHz
UHF	300 – 3000 MHz
SHF	3 – 30 GHz
EHF	30 – 300 GHz
THF	300 – 3000 GHz

Tabulka 2.1: Historické dělení frekvenčních pásem rádiových vln.

Toto rozdělení slouží převážně pro přiřazení pásem pro jednotlivá využití (např. komerční rádio, wifi, TV). V radioastronomii je nejpoužívanější UHF (ultra high ferquency) a SHF (super high frequency), neboť právě v tomto rozsahu se nachází rádiové okno atmosféry (obr. 2.4).

2.3 Přírodní zdroje rádiového záření

Ve vesmíru se můžeme setkat s vícero zdroji elektromagnetického záření. Nejčastější zdroje popíšeme v následujících podkapitolách.

2.3.1 Záření absolutně černého tělesa

Absolutně černé těleso (déle AČT) je takové těleso, které pohlcuje veškerou energii, která na něj dopadá a zároveň vyzařuje spojité elektromagnetické záření. Za AČT můžeme aproximativně považovat i hvězdy. Záření AČT je popsáno Planckovým zákonem

$$B_f(T) = \frac{2hf^3}{\mathrm{c}^2} \frac{1}{e^{\mathrm{h}f/\mathrm{k}T} - 1} \tag{2.1}$$

Zde pak T je teplota AČT, k je Boltzmannova konstanta, f je frekvence a B_f je intenzita. Maximální vyzařovaná vlnová délka je popsána Wienovým posouvacím zákonem

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \tag{2.2}$$

Zde b je Wienova konstanta. Příkladem takového zdroje je např. kosmické reliktní záření.

2.3.2 Brzdné záření

Brzdné záření vzniká při změně trajektorie nabité částice, např. vlivem silového pole či při srážce. Změní-li se trajektorie, je emitováno elektromagnetické záření. Toto je důsledek zákonu zachování energie, kdy emitované záření kompenzuje změnu kinetické energie. Tento typ emise se také nazývá jako volně-volná, jelikož částice pouze změní směr trajektorie, ale není zachycena. Speciální případy brzdného záření jsou cyklotronové a synchrotronové záření.

Cyklotronové a synchrotronové záření

Cyklotronové záření vzniká v magnetickém poli, do kterého vstoupí nabitá částice s nenulovou hybností. Vlivem Lorentzovy síly, která je kolmá na magnetické pole a trajektorii, je trajektorie částice zakřivena a částice se pohybuje po spirále. To vyvolá emisi elektromagnetického záření. Spektrum cyklotronového záření je spojité, nacházíme v něm tedy i rádiové záření.

Synchrotronové záření funguje na principu cyklotronového, s výjimkou toho, že nabité částice mají rychlost přirovnatelnou k rychlosti světla (tedy relativistickou). Díky silné prezenci magnetického pole u planet, hvězd a černých děr je cyklotronové i synchrotronové záření podstatný zdroj rádiového záření ve vesmíru.

2.3.3 Přechody v atomech a molekulách

Neopomenutelným zdrojem rádiového záření jsou i energetické přechody v atomech a molekulách. Při deexcitaci elektronu v systému z vyššího energiového stavu do nižšího dojde k vyzáření fotonu o vlnové délce úměrné rozdílu energie. Rádiové spektrum má nižší frekvence než optické spektrum, k emisi rádiového fotonu dochází spíše při přechodech z jemných a hyperjemných struktur, kde jsou energetické rozdíly menší. Jemné a hyperjemné struktury tvoří rozštěpení energetických hladin v magnetickém poli v důsledku vnitřního magnetického momentu nebo spinu. V molekulách (které jsou komplexnější než atomy) dochází také ke spontánnímu nebo vyvolanému přechodu mezi vibračními a rotačními stavy. K výrazným zdrojům patří např. molekuly HCN, ^{13}CO, nebo ionty HCO^+.

2.4 Neutrální vodík

Neutrální vodík je atom sestávající z jednoho protonu a jednoho elektronu. Jeho spektroskopické označení je H I. Neutrální vodík tvoří jeden z nejpodstatnějších zdrojů rádiového záření ve vesmíru a je to předmět studia této bakalářské práce, je tedy nezbytné ho podrobněji rozebrat.

2.4.1 Čára vodíku 21 cm

Pro pochopení principu emise H I čáry je nutné přejít z vlnového pojetí elektromagnetického záření na částicové. Proton i elektron jsou nositelé spinu (vnitřního momentu hybnosti). Spin můžeme vůči ose (nejčastěji z) promítnout tak, že bude ve stavu up nebo down.

V externím magnetickém poli pozorujeme rozštěpení základního stavu na dvě hladiny, ovšem rozdíl mezi nimi je oproti excitovaným hladinám téměř zanedbatelný, říkáme tomu tedy hyperjemná struktura (na obr. 2.2 lze vidět hladiny energie v atomu vodíku, můžeme si povšimnout, že pro všechny hyperjemné struktury jsou vyzářené frekvence podstatně menší, než mezi klasickými energetickými hladinami). Pro zjednodušení si představme, že jedna energetická konfigurace je paralelní (tedy průmět spinu protonu se shoduje s průmětem spinu elektronu) a druhá je antiparalelní (průměty spinů se neshodují). Stav s vyšší energii je paralelní, naopak stav s antiparalelní kombinací má energii nižší. Při přechodu z paralelní do antiparalelní konfigurace je tedy kladné ΔE. Energie jednotlivých hladin v hyperjemné struktuře lze vypočítat za pomocí Hamiltoniánu [51]

$$\hat{\mathbf{H}} = \frac{g_e \mu_0 e^2}{8\pi m_p m_e 3} \frac{3(\mathbf{I}\cdot\hat{\mathbf{r}})(\mathbf{S}\cdot\hat{\mathbf{r}}) - \mathbf{I}\cdot\mathbf{S}}{r^3} + \frac{g_e \mu_0 e^2}{3\pi m_p m_e 3} \delta^3(\mathbf{r}_i)\mathbf{I}\cdot\mathbf{S} \tag{2.3}$$

zde g_e je g-faktor elektronu, $\mathbf{r}$ je pozice vzhledem k jádru, $\mathbf{S}$ je spin elektronu, $\mathbf{I}$ je spin protonu. Jelikož řešíme atom vodíku v základním stavu, vynechali jsme první část Hamiltoniánu, která vyjadřuje energii dipólu s orbitálním momentem hybnosti $\mathbf{L}$, protože $\mathbf{L} = 0$. Druhá část popisuje interakci dipólu s elektronovým spinovým magnetickým momentem a poslední část popisuje interakci dipólu se spinovým dipólem. Druhá část z Hamiltoniánu zmizí, jelikož je základní stav sféricky symetrický. Zbude tedy poslední část. Energii vyjádříme díky perturbační teorii následovně :

$$\Delta E = \frac{g_p \mu_0 e^2}{3\pi m_p m_e 3} \langle \mathbf{I}\cdot\mathbf{S}\rangle |\Psi(0)|^2 \tag{2.4}$$

Kvadrát vlnové funkce (tedy hustota pravděpodobnosti) je zde $|\Psi(0)|^2 = \frac{1}{\pi a_0^3}$ (a_0 je Bohrův poloměr). Finální vztah pro výpočet hodnoty rozdílu energie při přechodu z paralelního stavu na antiparalelní stav je

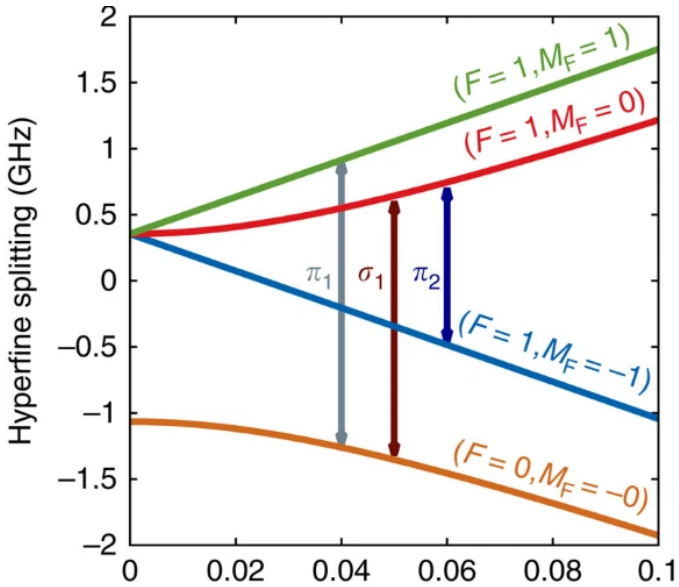
$$\Delta E = \frac{4g\hbar^4}{3m_p m_e^2 e^2 a_0^4} \tag{2.5}$$

Výpočet vlnové délky pak bude

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E_p} = \frac{hc}{9{,}4157\cdot 10^{-25}\,[\mathrm{J}]} = 0{,}211\,\mathrm{m} \tag{2.6}$$

Odpovídající frekvence je $f_{HI} = 1420{,}405751768(2)\,10^6$ Hz [26]. Frekvence tohoto přechodu je jedna z nejpřesněji naměřených fyzikálních veličin.

Při uvážení běžných (elektrických dipólových) výběrových pravidel je tento přechod zakázaný, jelikož změna jeho momentu hybnosti je $\Delta \mathrm{J} = 0$ (povolené přechody s $\Delta \mathrm{J} = \pm 1$ pouze pokud $\mathrm{J} \neq 0$). Přechod je ale povolen výběrovými pravidly pro magnetické dipólové momenty [58], avšak jeho pravděpodobnost je velice malá, $\mathrm{P} = 2{,}88\,10^{-15}\,\mathrm{s}^{-1}$ [4]. K přechodu u jednoho individuálního atomu dojde jednou za 10 milionů let. Nicméně, díky hojnému počtu vodíkových atomů v mezihvězdném prostředí je tento jev ve vesmíru zcela běžný a lze ho proto bez problémů zachytit.



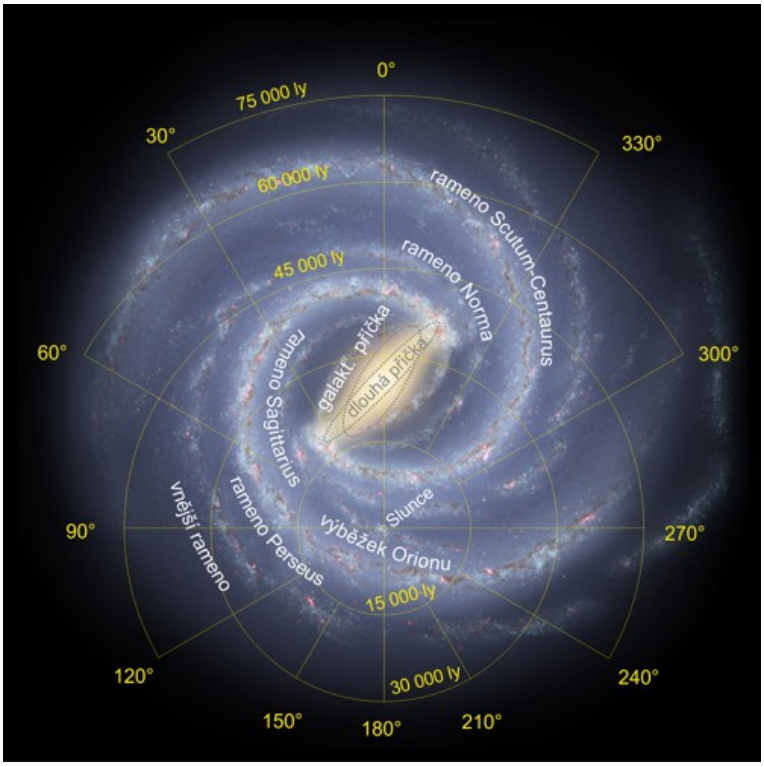
Obrázek 2.2: Hyperjemná struktura základního stavu v atomu vodíku, rozštěpení hladin vlivem Zeemanova jevu. [42] Oblast grafu, kterou se zabýváme, je pro $B = 0\,\mathrm{T}$.

2.4.2 Rozložení H I v Galaxii

Jak již bylo několikrát zmíněno, vodík je běžně vyskytující se prvek ve vesmíru, tedy i v naší Galaxii. Pro bližší popis ale musíme nejdříve porozumět galaktické struktuře. Naše Galaxie patří do skupiny spirálních galaxií s příčkou (SBb dle Hubblovy klasifikace), klasicky se uvádí, že má 4 hlavní spirální ramena a několik vedlejších (obr. 2.3), ovšem je nutné zmínit, že v poslední době vychází dle některých prací najevo, že v úvahu můžeme brát pouze dvě hlavní ramena.

V samém jádru Galaxie se ukrývá supermasivní černá díra Sagittarius A*, obklopena jasným akrečním diskem. Ten je mohutným zdrojem rádiového záření, díky kterému byla černá díra také objevena. Galaktické jádro je obestřeno kulovou hvězdokupou a směsí mezihvězdné látky. Hvězdy v hvězdokupě s vysokými radiálními rychlostmi rotují okolo Sgr A*. Většina z nich jsou starší červení trpaslíci, ovšem vyskytují se zde i mladší hvězdy o hmotnosti desítek Sluncí, naznačující tvorbu nových hvězd i v tomto regionu. Přítomnost velmi hustého prachu a hvězd způsobuje neprůhlednost galaktického jádra pro většinu vlnových délek kromě rádiových vln, právě proto je také jedním z intenzivně zkoumaných objektů radioastronomie.

Vizuálně nejpatrnější složkou celé galaktické struktury je galaktická výduť obsahující převážně hvězdy II. populace, tedy starší hvězdy s nízkou metalicitou, často sdružené v hojně přítomných kulových hvězdokupách, nebo proměnné hvězdy typu RR Lyrae. Výduť má příčkovitou strukturu (obr. 2.3).



Obrázek 2.3: Galaktická struktura (zdroj: NASA/JPL-Caltech, překlad Aldebaran.cz).

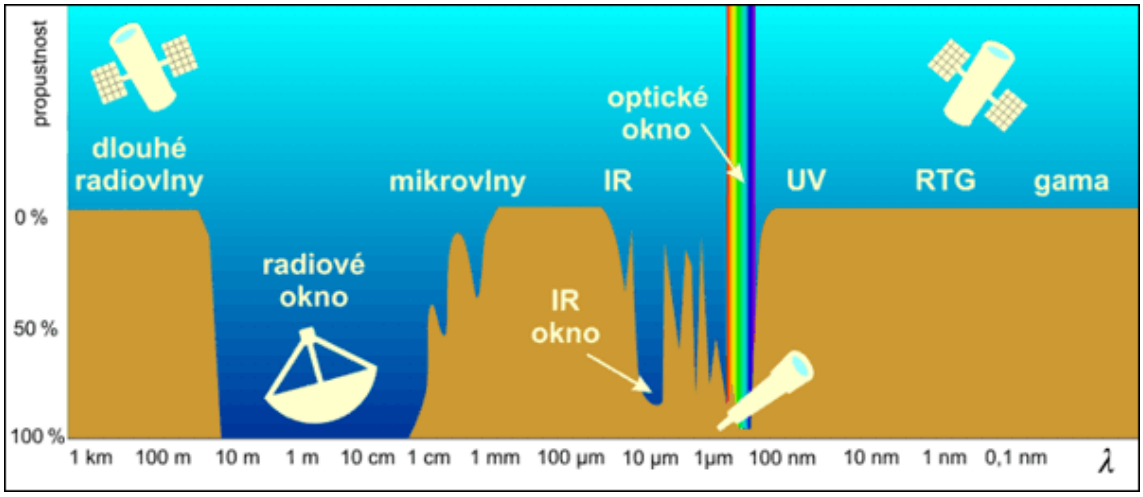
Okolo galaktické výdutě se rozpíná galaktický disk. Je tvořen ze dvou částí, tenkého disku, kde se nachází většina mezihvězdného prachu, plynu a nejmladší hvězdy populace I a tlustého disku, který obsahuje starší hvězdy populace I. Disk není homogenně rozložený prostorem, ale tvoří ho shluky hmoty, které nazýváme spirální ramena, hlavní dvě jsou Scutum-Centaurus a Perseus, vedlejší pak Sagittarius a Norma. Ve spirálních ramenech pozorujeme větší koncentraci shluků mezihvězdného prachu a plynu, ideální prostředí pro tvorbu nových hvězd, které tu nalezneme, stejně jako otevřené hvězdokupy. Právě v disku a spirálních ramenech je neutrální vodík nejvíce koncentrovaný. Převážně kopíruje rozložení hvězd, okolo disku a ve spirálních ramenech je jeho koncentrace největší (4x větší než v prostoru mezi rameny [1]), na okrajích disku je patrný záhyb (*the warp of the galactic plane*). Neutrální vodík je vitální součástí mezihvězdné látky (až 90 % [1]) a vytváří tzv. vodíková mračna. Neutrální vodík lze nalézt ve dvou stabilních fázích, studené a teplé. Studená vodíková mračna mají filamentární povahu a mají větší hustotu (cca 20 – 50 cm^{-3} [17]) , zatímco teplá se hustotou pohybují okolo 0,01 – 1 cm^{-3} [17]. V teplých mračnech je neutrální vodík pozůstatkem ionizovaného vodíku H II. Tvoří jakési kapsle, v tepelné rovnováze s prostředím, chráněné vrstvou H II před ionizací.

Největší, ale nejméně patrná část Galaxie, je galaktické halo. Tvoří bublinu volně přecházející do mezigalaktického prostoru. Obývají ho nejstarší hvězdy v Galaxii, kulové hvězdokupy a mezihvězdná hmota. Halo představuje jednu ze záhad naší Galaxie, jelikož se v něm ukrývá většina hmotnosti Galaxie — právě ono totiž ovlivňuje nepravidelnou rotaci v naší Galaxii [8]. I zde se neutrální vodík nachází, ovšem v menším zastoupení a ve formě oblak s vysokou rychlostí rotace.

2.5 Radioastronomická pozorování

2.5.1 Rádiové okno

Rádiové vlny mají obrovskou výhodu v propustnosti atmosféry. Zemská atmosféra je pro většinu elektromagnetického spektra nepropustná. To způsobuje nerealizovatelnost měření elektromagnetického záření ze zemského povrchu.



Obrázek 2.4: Propustnost atmosféry.

2.5.2 Šíření rádiových vln v zemské atmosféře

Při pozorování v zemské atmosféře musíme brát v úvahu to, že je atmosféra opticky aktivní prostředí a signál s ní interaguje. Vzduch má za ideálních podmínek pro rádiové vlny téměř stejný index lomu n jako pro viditelné světlo, avšak s přibývající vzdušnou vlhkostí index lomu rádiových vln stoupá 20krát rychleji. Index lomu se pojí s refraktivitou N

$$\mathrm{N} = 10^6(n-1) \tag{2.7}$$

přičemž refraktivitivu zjistíme díky výškovému úhlu tělesa h následovně [5]

$$N = \frac{1,02}{\tan\left(h + \frac{10,3}{h+5,11}\right)} \tag{2.8}$$

Index lomu zkresluje směr, odkud k nám vlny přichází. Pro výškové úhly $h < 80°$ můžeme aproximovat změnu úhlu Δh

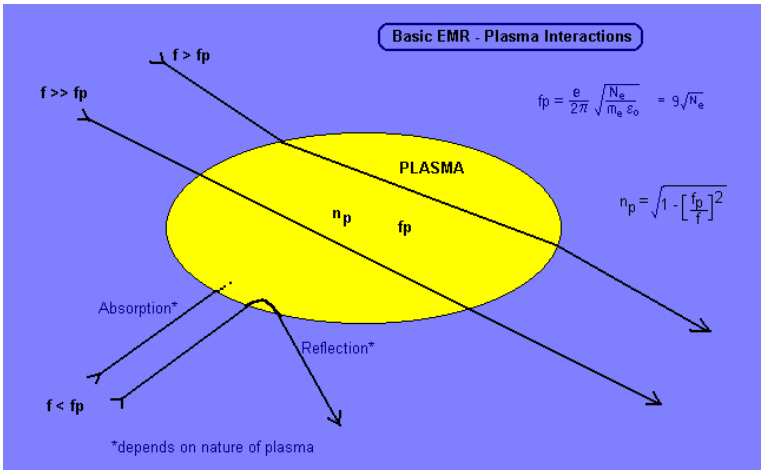
$$\Delta h = (n-1)\tan(h) \tag{2.9}$$

Pro rádiový signál v rozsahu od 100 GHz do 10 MHz je atmosférická absorpce zanedbatelná a nemá signifikantní vliv na měření. Této mezeře říkáme rádiové okno. Horní okraj je limitován tím, že jeho frekvence jsou podobné frekvencím přechodů molekul N_2, CO_2 či H_2O, které se nacházejí v atmosféře, což znamená, že záření je jimi z velké části absorbováno. Spodní limit je dán odrazem vln s frekvencí menší než 30 MHz na ionosféře.

Tento limit není pevný, je úměrný koncentraci volných elektronů v atmosféře, která se mění v závislosti na denní době a sluneční aktivitě [9]

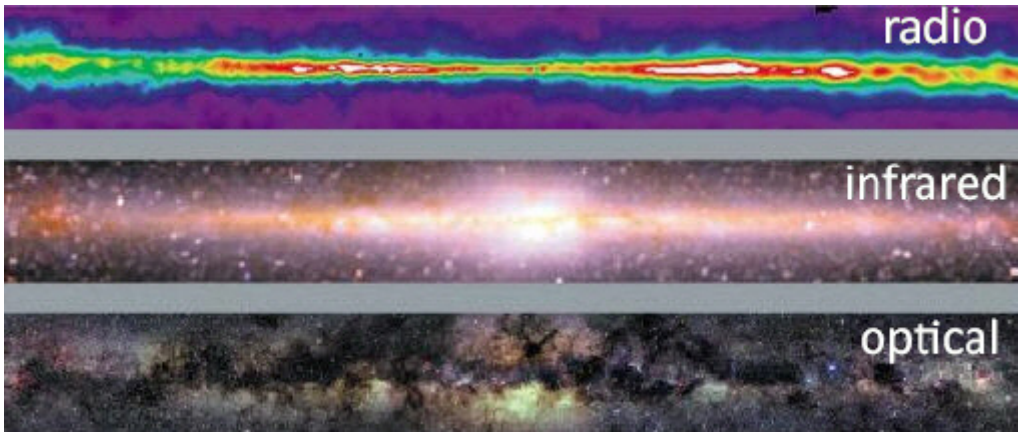
$$\mathrm{f_p} = \frac{e}{2\pi}\sqrt{\frac{\mathrm{N}_e}{m_e \varepsilon_0}} \tag{2.10}$$

kde f_p je frekvence ionizovaného plynu v atmosféře, N_e je koncentrace volných elektronů v atmosféře, e elementární náboj a m_e hmotnost elektronu.



Obrázek 2.5: Základní interakce elektromagnetického záření s plasmou v ionosféře [56].

Výrazný vliv na pozorování mohou mít také pozemské signály, jako například WiFi, Bluetooth, rádiové vysílání, komunikační kanály IZS, GPS a podobně. Déšť, sníh, prach a jiné nečistoty v atmosféře ovlivňují rádiové signály od 10 GHz a výš.



Obrázek 2.6: Panoramatický řez Galaxie ve třech spektrech [45].

2.5.3 Dopplerův jev

Dopplerův jev označuje změnu frekvence přijatého signálu způsobenou vzájemným pohybem zdroje a pozorovatele. Dopplerův jev je platný pro všechny typy vlnění. V případě

elektromagnetického vlnění použijeme relativistický Dopplerův jev

$$f_{\mathrm{p}} = \sqrt{\frac{1-\frac{v}{\mathrm{c}}}{1+\frac{v}{\mathrm{c}}}} f_0 \tag{2.11}$$

kde f_0 je laboratorní frekvence, f_{p} je pozorovaná frekvence a v je rychlost zdroje vůči pozorovateli. Pokud se zdroj od pozorovatele vzájemně po jedné přímce vzdalují rychlostí v$<<$ c, změnu frekvence je možno vyjádřit:

$$\frac{f_0 - f_{\mathrm{p}}}{f_{\mathrm{p}}} = \frac{v}{\mathrm{c}} \tag{2.12}$$

2.6 Příjem rádiového signálu

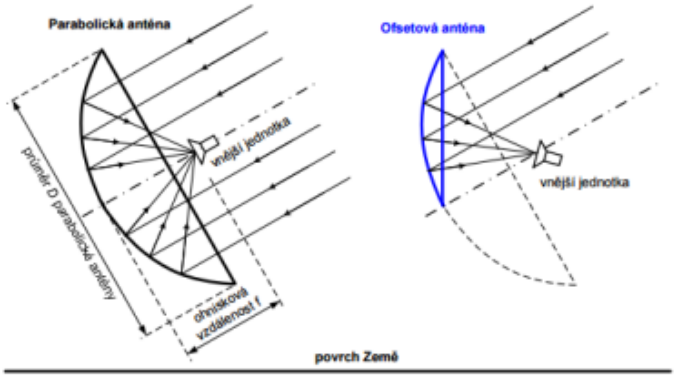
Vlivem velkých vlnových délek se příjem rádiového signálu podstatně liší od příjmu viditelného světla. Je přijímán radioteleskopem, který má oproti optickým přístrojům větší rozměry. Radioteleskopy typu refraktor bychom jen těžko hledali, jelikož by refraktory musely být obrovské a byly by velmi citlivé na vady, což je náročný požadavek na výrobu. Z toho důvodu používáme reflektory, které se většinou vyrábí z tenkého plátu kovu. Díky své dlouhovlnné povaze, rádiové vlny nejsou tolik náchylné na nedokonalosti zrcadla, pro povolené odchylky platí

$$\delta \mathrm{z} < \frac{\lambda}{20} \tag{2.13}$$

kde δz je velikost odchylky a λ vlnová délka pozorovaného signálu. Reflektor slouží ke sběru a zaostření signálu. Platí, že čím větší plocha, tím více signálu.

Obrázek 2.7: Arecibo býval typickým příkladem velkého radioteleskopu (zdroj: David Parker).

Ideálním tvarem reflektoru je parabola, jelikož soustřeďuje paprsky do svého ohniska a potlačuje efekt sférické aberace. Signál je soustředěn do ohniska paraboly, kde je následně zachycen přijímací anténou a přenesen do přijímače. Parabolické antény můžeme dělit na několik typů, mezi nejčastější patří ohniskové, které mají ohnisko ve svém geometrickém středu, offsetové, které mají ohnisko mimo geometrický střed a typ Cassegrain, ten má v ohnisku umístěné hyperbolické zrcadlo, které signál odrazí na vlastní detektor. Výhoda offsetové antény spočívá v jejím tvaru, který vychází z výřezu paraboly mimo její střed symetrie. Jelikož má ohnisko posunuté od středu a při jejím umístění není nutné řešit vysoký elevační úhel, tím pádem se v ní nedrží sníh a jiné nečistoty. Offsetová parabola není oproti ohniskové středově symetrická, ale tvarem je spíše elipsoidní, jedna strana je nepatrně protáhlejší.



Obrázek 2.8: Parabolická anténa a její offsetová varianta.

Zisk offsetové parabolické antény lze dle literatury [36] aproximovat vztahem:

$$G = 10\log\left[k\left(\frac{\pi D_{\mathrm{v}}}{\lambda}\right)^2\right] \tag{2.14}$$

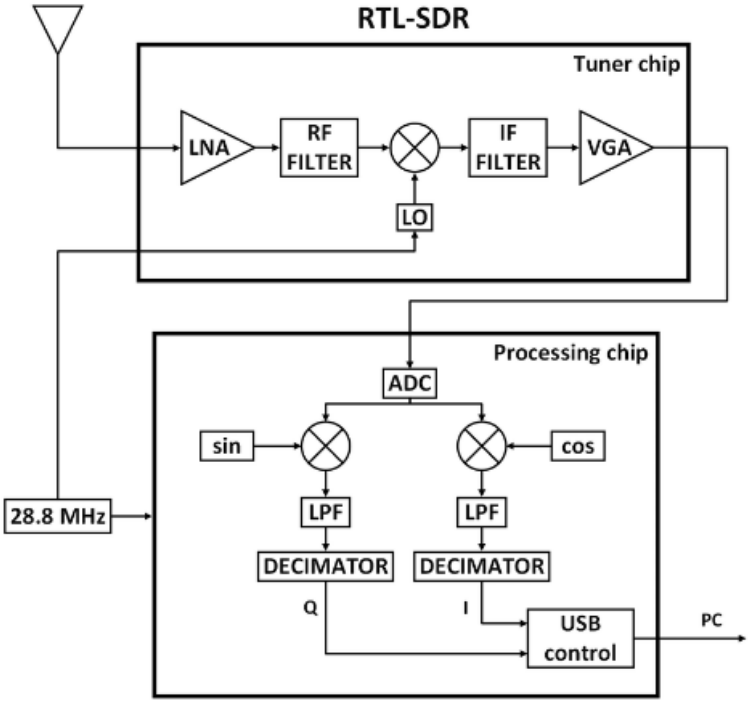
kde D_{v} je průměr delší strany paraboly a k je účinnost antény udávající poměr mezi vyzářeným výkonem a dodaným výkonem.

Přijímací anténa je umístěna v ohnisku parabolické antény a zajišťuje přenos signálu ze vzduchu do přijímače.

Velký přínos radioastronomie byl v podobě nové techniky, interferometrie. Soustava radioteleskopů v takovém případě funguje jako jeden velký radioteleskop, který má vysoké rozlišení (úměrné vzdálenosti radioteleskopů, proto se v astronomii používá tzv. *very long base interferometry*). Signál se zpracuje syntézou apertury, na základě posunutí fáze příchozí vlny lze zjistit směr, ze kterého přichází. Jelikož musí být zdroj záření koherentní, je těžší vyrobit dostatečně přesnou aperturu pro kratší vlnové délky, využívá se jí proto hlavně v radioastronomii. Mezi nejznámější přístroje patří *Very Large Array*, *Event Horizon Telescope* nebo *Atacama Large Milimeter Array*.

2.6.1 Přijímač SDR

Ke zpracování signálu se obvykle používají fyzické součástky, jako modulátory, demodulátory, filtry a podobně. SDR neboli *software defined radio* je přijímač, který zpracovává signál pomocí softwaru. To znamená, že tyto komponenty jsou řešeny pomocí naprogramovatelných obvodů, což umožňuje flexibilitu v přijímání signálu ve velkém rozsahu frekvencí (zpravidla od 100 kHz do 2 GHz). Na obrázku 2.9 můžeme vidět ilustrační blokové schéma SDR.



Obrázek 2.9: Zjednodušené blokové schéma SDR přijímače [57].

2.6.2 Zesilovač

Mezi anténou a přijímačem je často umisťován zesilovač signálu. Přijímače jsou limitovány minimální hranicí intenzity signálu, avšak zdroje z vesmíru jsou zpravidla dost slabé, je tedy nutné je zesílit. Ideální zesilovač je takový, který zvyšuje amplitudu signálu bez jeho jiné modifikace. Pro zesílení se používá obvod s tranzistorem, RF zesilovače jsou typicky na bázi MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*).

Mezi základní parametry zesilovače patří jeho zisk, což je poměr výstupního signálu ke vstupnímu. Dalším parametrem je šířka pásma, která určuje rozsah frekvencí, ve kterých zesilovač efektivně zesiluje signál, zatímco lineární rozsah je interval frekvencí, pro který zesilovač nezkresluje signál. Parametrem bývá i maximální vstupní a výstupní výkon, který lze přivést na zesilovač. Velmi důležitý parametr je poměr signálu a šumu (S/N), jelikož právě ten je často u zesilovačů rozhodující. Standardně je při vyšším zisku i nižší poměr S/N. Šumový faktor je parametr udávající znehodnocení signálu šumem přidaným zesilovačem. Čím lepší zesilovač, tím nižší šumový faktor. Při zapojení v sérii se šumový faktor ostatních zesilovačů přičítá k celkovému šumovému faktoru následujícím způsobem [59]:

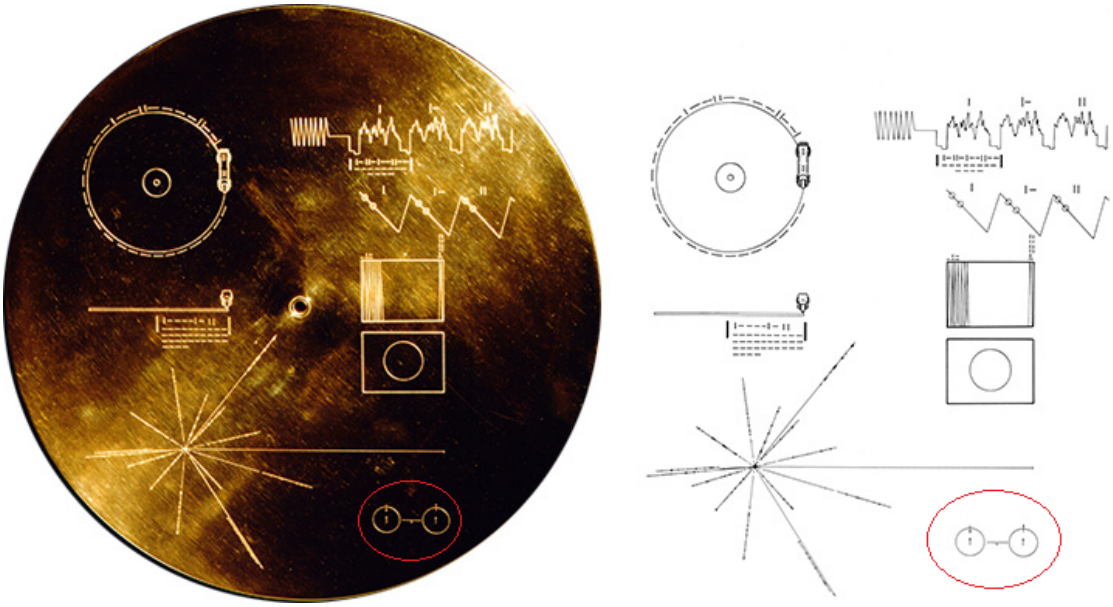
$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \ldots \tag{2.15}$$

Zde F_n představuje šumový faktor zesilovače (číslovaný směrem od přijímače), F celkový šumový faktor a G_n zisk jednotlivých zesilovačů. Nejvýhodnější je tedy zapojení nejkvalitnějšího zesilovače ihned za přijímací anténu, jelikož u ostatních zesilovačů se faktor dělí. Impedance zesilovače by měla být standardně rovna 50 Ω nebo 75 Ω.

2.7 Význam radioastronomie a neutrálního vodíku

Největší výhodou radioastronomických pozorování je jejich univerzálnost v rámci pozorování různých objektů. V mezihvězdné látce se kromě neutrálního vodíku nachází i molekulární vodík, ionizovaný vodík a cca 1 % tvoří prach (křemičitanový, uhlíkový, ledové krystalky, apod.) [30]. Toto prostředí způsobuje výraznou extinkci a mnohdy je průhledné pouze pro rádiové vlny. Stejně tak i většina pozorování vesmírného elektromagnetického záření je prováděna ze Země, takže i v těch přírodně nejpříznivějších podmínkách na pozorování je ovlivněna propustností zemské atmosféry. Ta, jak jsme již dříve uvedli, je propustná pro viditelné světlo a rádiové vlny. Tyto skutečnosti dělají (s nadsázkou) z radioastronomie prakticky všemocný (a vševidoucí) nástroj. Od černých děr po aktivní galaxie, pulzary až po reliktní záření, radioastronomie přináší rozsáhlé spektrum informací nejen o naší Galaxii, ale o celém vesmíru (a o jeho historii).

Vodík je nejrozšířenější komodita ve vesmíru a neutrální vodík proplétá téměř celou strukturu Galaxie. Je nanejvýše logické jej proto použít právě pro její zmapování. Právě díky němu lze odhadnout její podoba, počet spirálních ramen, její rotace (čára H I je úzká, proto se dá kvalitně změřit Dopplerovský posun) a mnoho dalších parametrů. Neutrální vodík je dokonce tak užitečné médium, že by měl, alespoň podle naší úvahy, být schopen překonat komunikační propast mezi lidskou a mimozemskou civilizací. Roku 1977 byl vypuštěn Voyager I, sonda na zkoumání Sluneční soustavy, která na sobě nese zlatou desku s několika základními informacemi o lidském životě, civilizaci a Sluneční soustavě. Deska byla sestavena pro případ kontaktu s mimozemskou civilizací, přestože její reálná funkce je spíše symbolická (navíc jak krásná představa je, že základní poznatky o naší existenci proplouvají hlubokým vesmírem). Na desce je za pomocí čáry H I zakódovaná jednotka času a vzdálenosti, v naději, že vodíkový spin flip bude důvěrně známý i mimozemským civilizacím.



Obrázek 2.10: Zlatá deska na sondě Voyager, vodíkový spin flip, znázorněn červeně (zdroj: NASA/JPL).

Kapitola 3

Praktická část

Při sestavování vhodného přijímače signálu neutrálního vodíku bylo zapotřebí obstarat několik součástek a celkově přizpůsobit a naladit aparaturu pro optimální zachycení signálu. Inspirací byl článek [49], který poskytl kostru naší konstrukce, ovšem sám o sobě není dostatečným zdrojem a nedokáže odpovědět na důležité otázky, které během sestavování aparatury a měření vyvstaly. Tato praktická část rozvinuje původní článek a zabývá se jak jeho nedostatky, tak přidává nové poznatky a vylepšení.

3.1 Software

Důležitou součástí praktické části bakalářské práce bylo zpracování dat. K tomuto účelu bylo využito několik programů.

vna/J.3.4.8 je program na analýzu síťových obvodů, respektive jejich parametrů. S připojeným síťovým analyzátorem dělá frekvenční scan, z něhož pak určí parametr S_{11}, impedanci (jak celkovou, tak její reálnou i imaginární složku) a fázi.
Dostupný z https://vnaj.dl2sba.com/

Airspy SDR# je program pro přijímání rádiových signálů z přijímače SDR. Lze si s jeho pomocí určit šířku pásma pro SDR, demodulovat signál a číst data v reálném čase. Díky pluginu *IFAverage* lze navíc průměrovat a exportovat data z daných časových úseků, což je pro čáru HI 21 cm kritické.
SDR# dostupný z https://airspy.com/download/
IFAverage dostupný z http://dkami.umcs.pl/programs/ave-for-sdr/ (program byl přejmenován na *AVE*)

Parabola calculator 2.0 slouží k určení parametrů parabolické antény. Vypočítá vzdálenost ohniska, poměr f/D a předpokládaný gain.
Dostupný z https://parabola-calculator.software.informer.com/2.0/

EZNEC PRO2+ v.7.0 je profesionální program sloužící k modelování, analýze a optimalizaci antén. Pro modelování používá metodu elementárních zdrojů, které je nutné parametrizovat kartézskými souřadnicemi jako vstupní data. Jeho výstup je pak zisk antény, vyzařovací charakteristika, impedance, rezonanční frekvence a spousta dalších parametrů. Vstupní data jsou ve formě souřadnic jednotlivých prvků, ze kterých se anténa skládá.
Dostupný z https://www.eznec.com/

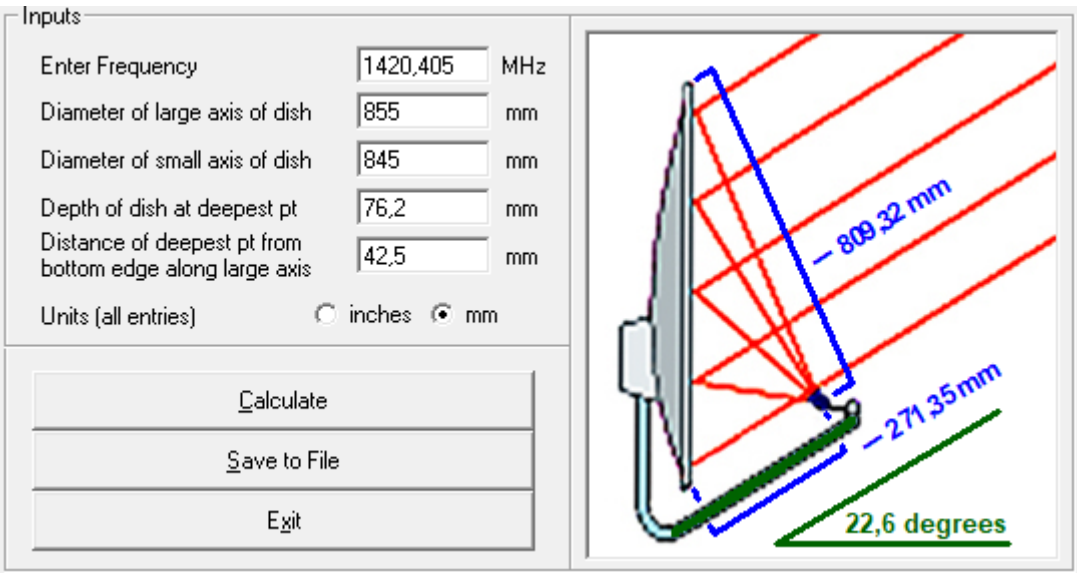
4NEC2 je open-source program k modelování antén. Na rozdíl od EZNECu umožňuje

za pomocí nástroje *Build* uživatelům vygenerovat geometrii vlastní antény (zatímco EZNEC pouze umožňuje již vygenerovaný objekt načíst). Nabízí také velkou škálu již vygenerovaných modelových antén.
Dostupný z https://www.qsl.net/4nec2/

Stellarium je open-source program mapující hvězdnou oblohu, slouží tedy jako virtuální planetárium. S jeho pomocí lze porovnávat objekty na noční obloze či zjistit jejich souřadnice pro pozorování.
Dostupný z http://stellarium.org/

3.2 Parabolická anténa

Základem radioastronomické aparatury je anténa, která zajišťuje sběr signálu. V našem případě k měření budeme používat komerční parabolickou offsetovou anténu pro příjem satelitního televizního zapůjčenou od kolegů z ÚTFA. Tato asymetrická parabola má rozměr $d_1 = 85{,}5$ cm na výšku a $d_2 = 84{,}5$ cm na šířku. Její hloubka je $h = 7{,}62$ cm s ramenem o délce $l = 27{,}14$ cm. Pomocí programu *Parabola calculator 2.0* jsme vypočítali její ohniskovou vzdálenost, viz (3.1). Původně anténa sloužila k příjmu televizního signálu v rozsahu frekvencí od 10 GHz do 12 GHz, což znamená, že je dostatečně přesná na příjem signálu o 1,4 GHz. Oproti jiným pokusům o příjem H I, naše parabola je podstatně menších rozměrů. Na měření většina autorů používá parabolickou anténa o průměru 2 m a více [61] [62], případně se menší plocha kompenzuje frekvenčním filtrem. Je tedy dost možné, že se nacházíme na limitu detekovatelnosti signálu.



Obrázek 3.1: Výpočet ohniskové vzdálenosti paraboly z programu Parabola calculator.

3.3 Přijímací anténa 1

Přijímač bylo potřeba pro aparaturu vytvořit. Rozhodli jsme se pro dvě technicky nenáročné varianty. V prvním případě použijeme otevřený cylindrický vlnovod, vytvořený z válcové

kovové nádoby, vyzařovacího prutu a SMA konektoru. Je důležité, aby anténa byla kovová, vyzkoušeli jsme i variantu z kartonu s pokovenou folií, ale tato anténa nebyla funkční. Radioamatéři tento typ antény přezdívají *can antenna* (zkráceně *cantenna*), jelikož je často vyráběná právě z plechovek.

3.3.1 Rozměry

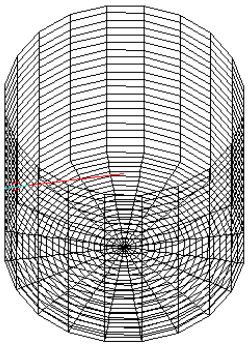
V první fázi je důležité zajistit správné rozměry vlnovodu. Ty se odvíjí od frekvence, na kterou chceme přijímač naladit. Poloměr a vlnovodu určíme z frekvenčního rozsahu jednovidového šíření vidu TE_{11}. Podmínku pro vlnovou délku zjistíme ze vztahu (1.28) a tabulky 1.2

$$\frac{\lambda u'_{11}}{2\pi} < a < \frac{\lambda u_{01}}{2\pi} \tag{3.1}$$

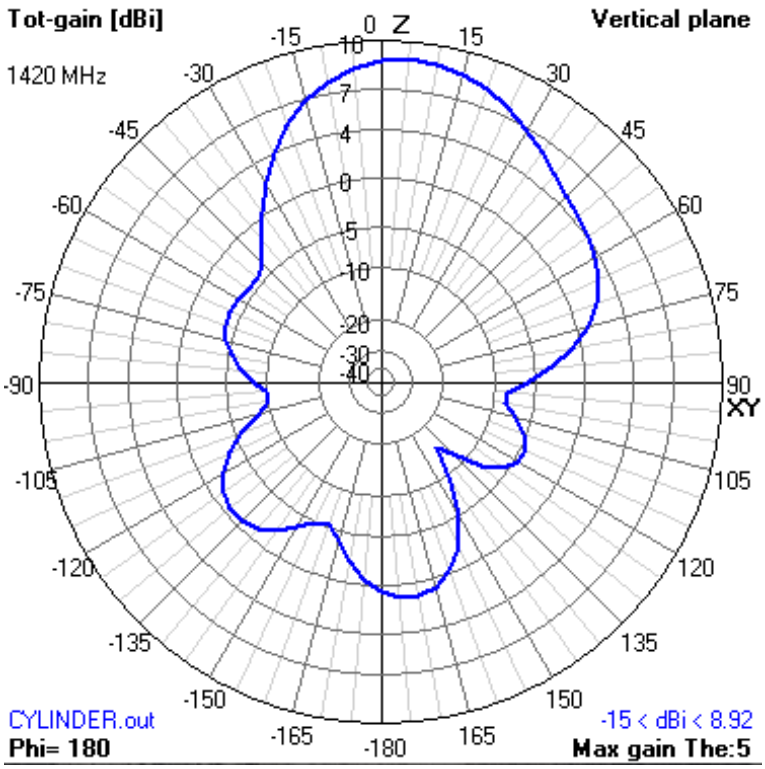
a po dosazení

$$0,293\lambda < a < 0,383\lambda \tag{3.2}$$

Při naší vlnové délce $\lambda = 21{,}106$ cm tedy rozsah možných poloměrů nádoby odpovídá $a = (6{,}184 – 8{,}084)$ cm. Jedním z požadavků práce bylo najít co nejdostupnější součástky, byla zakoupena plechová nádoba z běžného obchodu s domácími potřebami. Kvůli úzkému výběru jsme se museli spokojit s poloměrem a = 8,1 cm a výškou $v_p = 16{,}6$ cm. Dostupné nádoby s větším poloměrem byly svou velikostí nevhodné pro umístění do aparatury, protože by zastiňovaly část sběrné plochy a došlo by tak ke ztrátě signálu, kterou jsme se snažili omezit. Jelikož se rozměry antény pohybujeme těsně u limitu jednovidového šíření TE_{11}, riskujeme šíření dalších vidů a zhoršení zisku antény.



Obrázek 3.2: Model vlnovodové antény v EZNEC PRO/2+, červeně zaznačený je vyzařovací prut.



Obrázek 3.3: Teoretická vyzařovací charakteristika vlnovodové antény namodelovaná programem 4NEC2.

Díky tomu, že známe poloměr nádoby, vlnovou délku vlny ve vlnovodu zjistíme jednoduše. Ze vztahu (1.28) získáme kritickou vlnovou délku vidu TE_{11}, od které pak ze vztahu (1.34) dedukujeme hledanou vlnovou délku ve vlnovodu λ_v. Konkrétně v našem případě to bude $\lambda_v = 33{,}310$ cm.

3.3.2 Vyzařovací prut

Napáječ jsme umístili kolmo na plášť nádoby. Použili jsme měděný drát o průměru p = 1 mm. Ten byl napájen na konektor typu SMA a zašroubován do plechovky. Dle teorie by se napáječ měl optimálně nacházet ve vzdálenosti $\frac{\lambda_v}{4}$ od podstavy nádoby. V našem případě $\frac{\lambda_v}{4} = 8{,}328$ cm. Délka napáječe také teoreticky odpovídá $\frac{\lambda_v}{4}$.

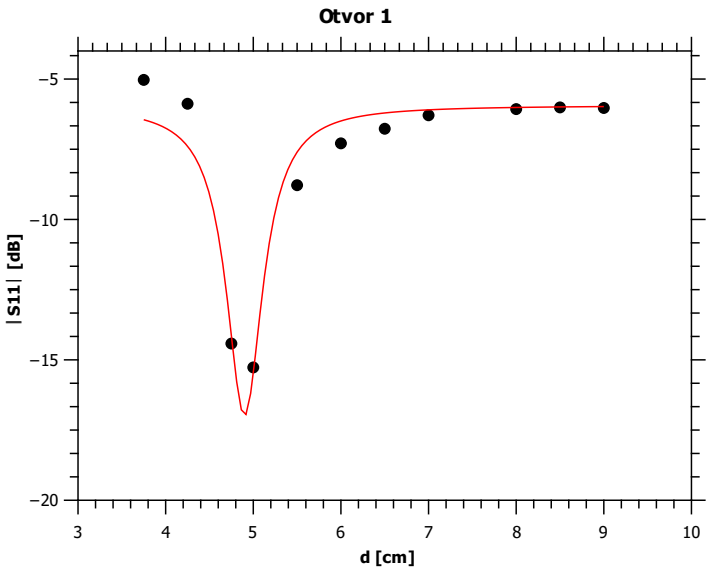
Měření

Experimentálně bylo zjištěno, že optimální geometrie navržená dle modelu se v praxi liší. Proto jsme provedli sadu experimentů pro jeho určení. Poloměr a a výšku v_n nádoby jsme ponechali stejnou, ale zaměřili jsme se na polohu a délku napáječe. Do nádoby jsme vyvrtali sérii osmi děr po její výšce (tab. 3.1), v průměru 6 mm široké, pro vložení SMA konektoru. V rámci měření jsme hledali minimum absolutní hodnoty parametru S_{11} v oblasti 1420 MHz, neboť právě pro toto minimum anténa vyzařovala (tedy i přijímala) nejlépe. První měření bylo orientační, pomocí síťového analyzátoru *MiniVNA tiny*. Před měřením jsme vždy provedli kalibraci, ovšem i přesto přístroj nemá vysokou přesnost

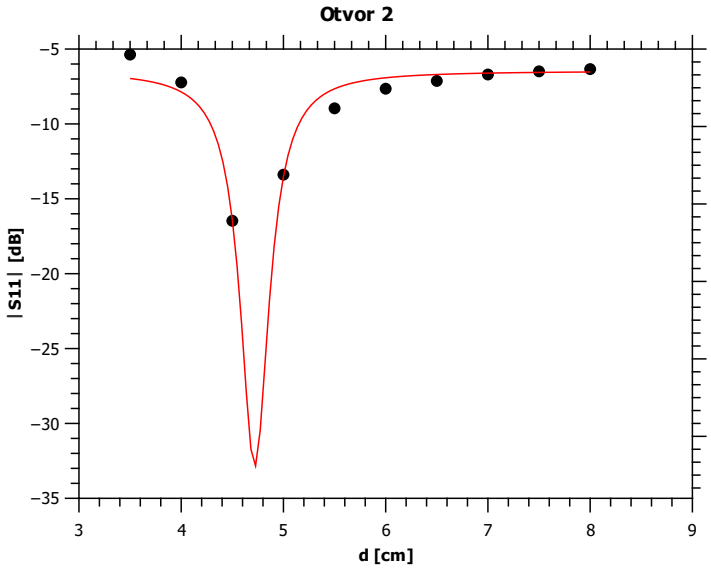
a snadno se rozladí. Nicméně je malý a přenosný, takže díky němu bylo možné zjistit orientační hodnoty délky drátu a polohu napáječe z domova, aniž by bylo potřeba měřit je v laboratoři. Postupovali jsme tak, že jsme pro každou polohu otvoru naměřili několik délek drátu (značíme d) a zaznamenali jejich minimum. Na grafech 3.4 až 3.8 můžeme vidět průběh měření. Lze si povšimnout symetrické tendence naměřené křivky. Byla proto proložena Lorentzovou křivkou a tímto způsobem jsme aproximovali polohu skutečné minima pro každý otvor. Nejlepší výsledky poskytl otvor č.5 (se vzdáleností od podstavy $s = 10{,}5$ cm) a délkou napájecího drátu $d = 5{,}1$ cm.

Číslo otvoru	vzdálenost od podstavy [cm]
1	6,5
2	7,5
3	8,5
4	9,5
5	10,5
6	11,5
7	12,5
8	13,5

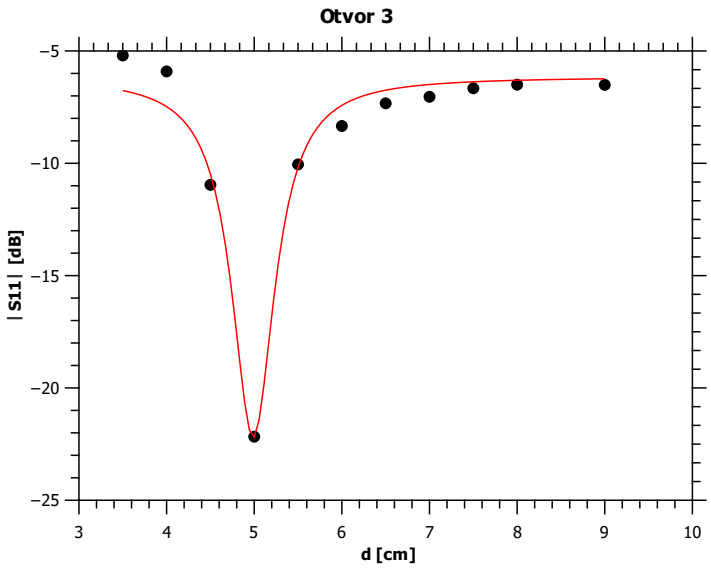
Tabulka 3.1: Vzdálenost otvorů od podstavy plechové nádoby.



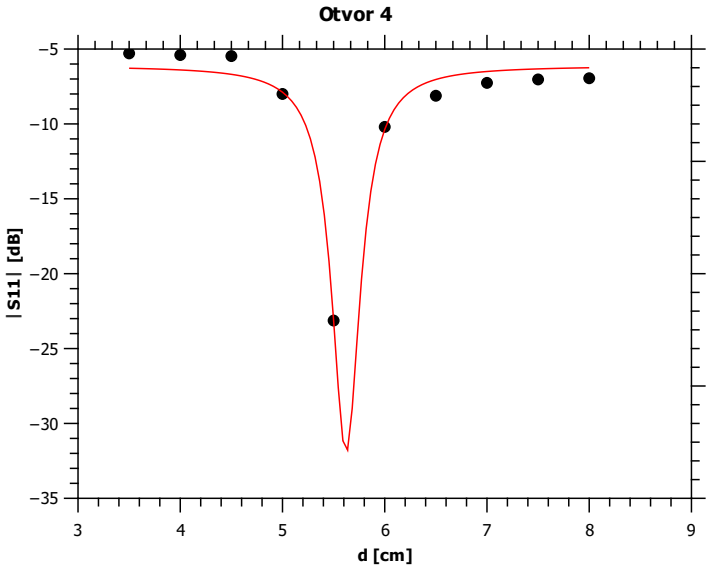
Obrázek 3.4: Otvor 1.



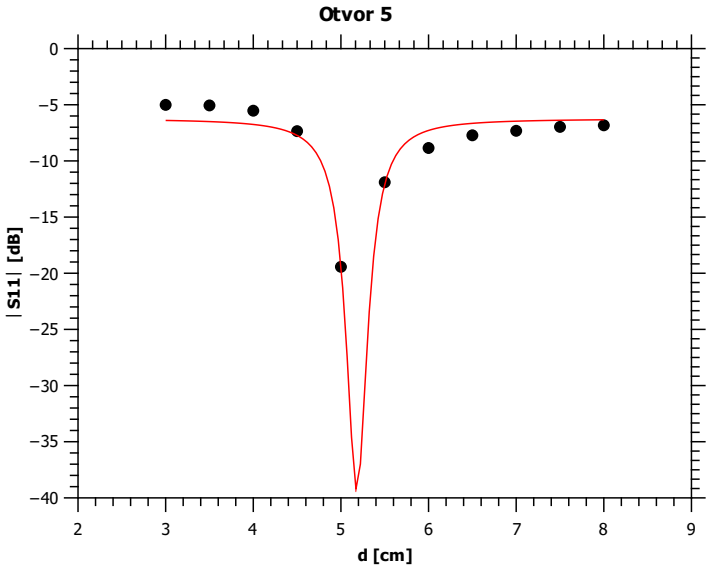
Obrázek 3.5: Otvor 2.



Obrázek 3.6: Otvor 3.

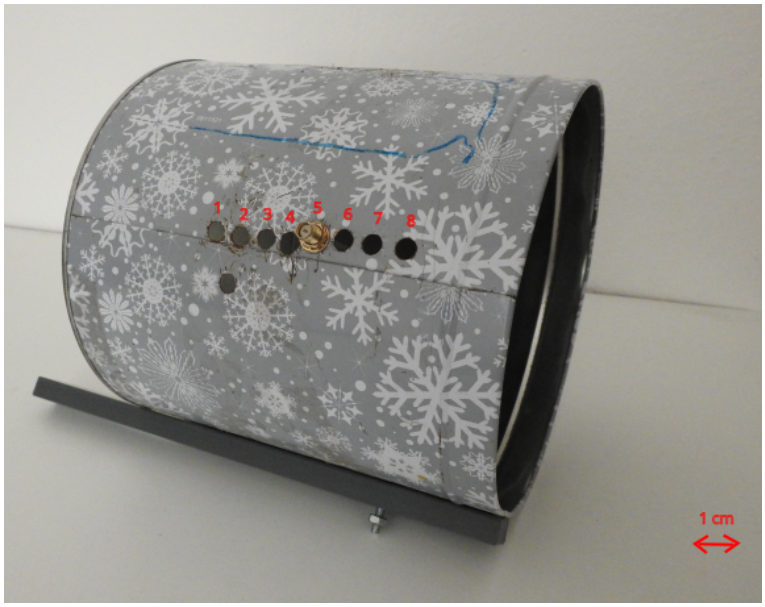


Obrázek 3.7: Otvor 4.

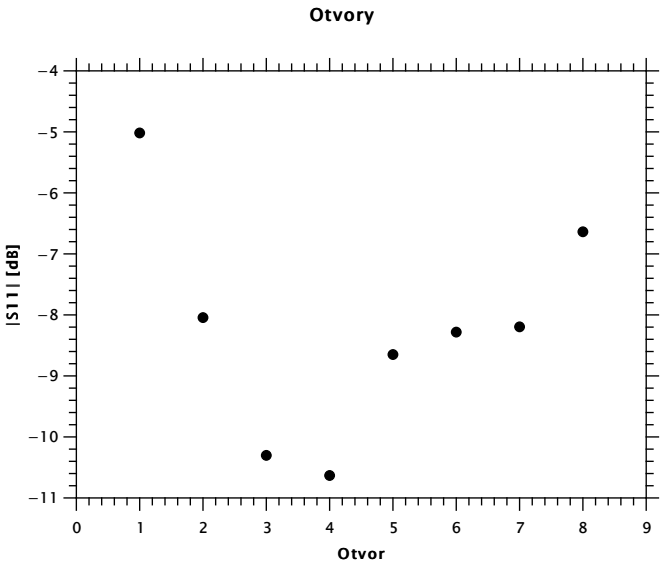


Obrázek 3.8: Otvor 5.

Pro větší přesnost měření byly vyvrtány tři otvory navíc (obr. 3.9) a byl použit analyzátor *Rohde and Schwarz ZVL network analyzer*. Do každého otvoru jsme použili stejně dlouhý drát a opět zapsali minimum parametru S_{11}. Jelikož jsou otvory mnohonásobně menší než vlnová délka λ_v, není pro konfiguraci rozhodující, kolik jich bude vyvrtaných do nádoby, přenos signálu to neovlivní.

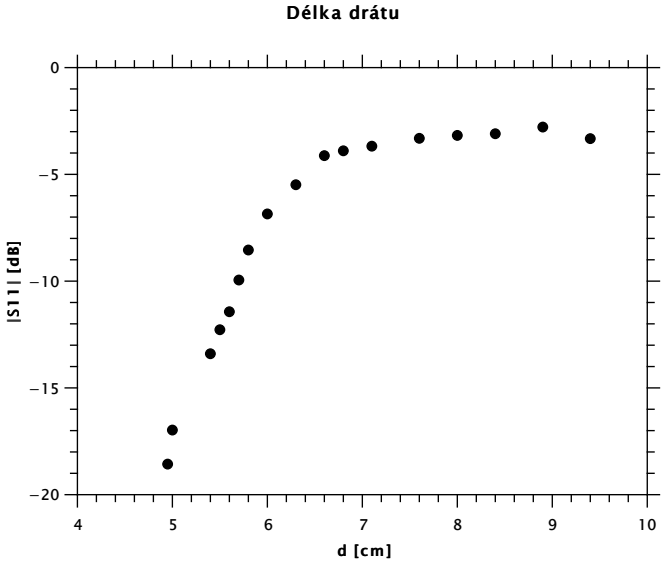


Obrázek 3.9: Detail otvorů na přijímací anténě s měřítkem.



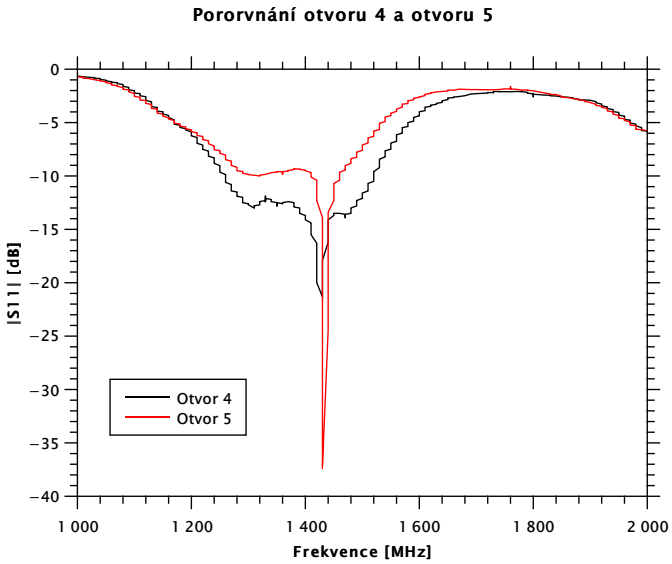
Obrázek 3.10: Otvory.

Při porovnání výsledků z grafu (3.6) jsme schopni určit, že nejideálnější otvor bude ten pátý (s = 10,5 cm). V tomto otvoru jsme poté určili ideální délku vyzařovacího prutu. Z původní délky jsme začali ustřihovat kousky po půl milimetru a pro každou délku byla zapsána hodnota minima parametru S_{11}.



Obrázek 3.11: Délka vyzařovacího prutu.

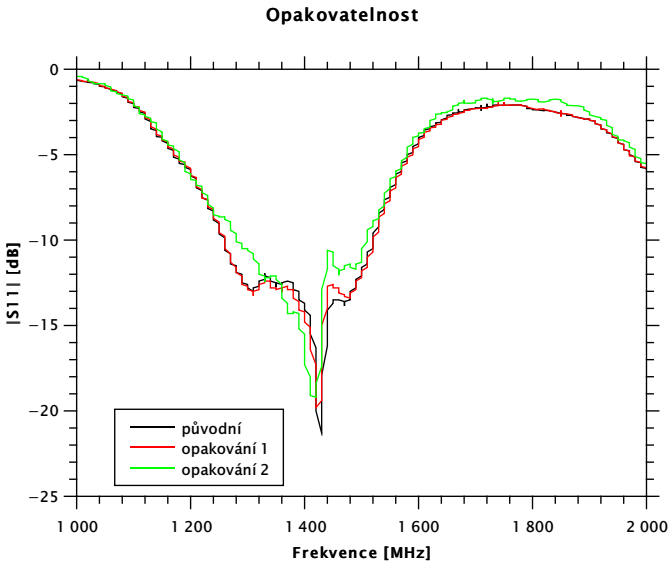
Nejlepší výsledek byl pro d = 4,95 cm. S touto délkou antény jsme zopakovali měření pro otvor 4 a 5, z toho důvodu, že jejich minima se zdály být blízko sobě. V grafu 3.12 můžeme vidět průběh hodnot parametru S_{11} pro různé frekvence na otvoru 4 a na otvoru 5. Z jeho analýzy zjistíme, že pro frekvenci f_{HI} bude opravdu vhodnější otvor číslo 5, jelikož má nejnižší minimum.



Obrázek 3.12: Porovnání otvoru 4 a 5.

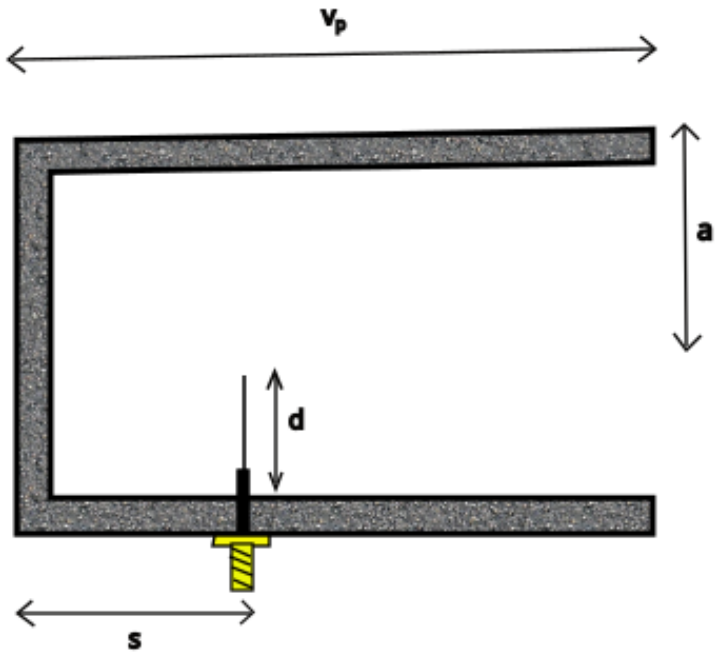
Během měření jsme zjistili, že v místě spoje vyzařovacího prutu s konektorem SMA není dostatečně rigidní spoj, který i přes jeho zpevnění umožňoval drátu stupeň volnosti pohybu. Stejně tak je při manipulaci se soustavou nedotáhnout prvky ve spojích, samotný SMA

konektor, ze kterého vybíhá vyzařovací prut, nedoléhá natěsno na stěnu nádoby, i přesto, že jsme se snažili místo spoje vyrovnat. Obě skutečnosti představují ztrátu signálu, bylo tedy podstatné určit, zda-li je měření opakovatelné a není-li příliš zatížené náhodnou chybou. V grafu (3.13) vidíme, že naměřené křivky se poměrně hezky překrývají, maximální výchylka jsou 3 dB. To je poměrně velká odchylka v kontextu toho, že představuje zhruba polovinu odraženého signálu, ovšem oproti rozsahu stupnice jde o malou chybu.



Obrázek 3.13: Opakovatelnost měření vlnovodové antény.

Plánek rozměrů přijímací antény 1 lze vidět na obr.3.14. Fotografie přijímací antény je na obr. 3.15.



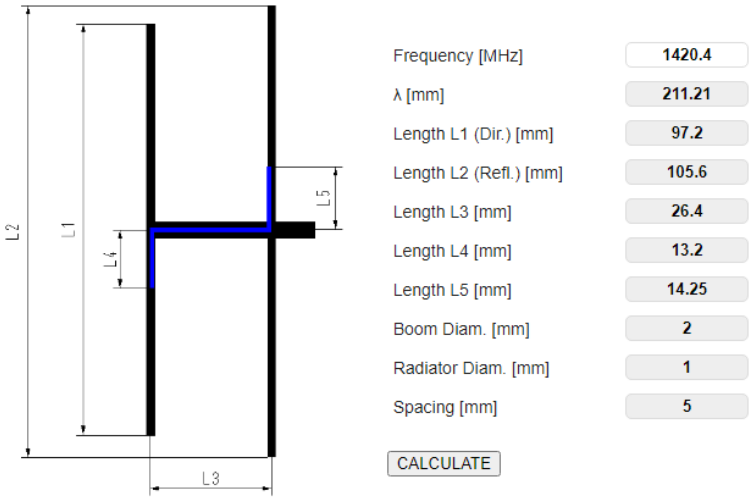
Obrázek 3.14: Rozměry vlnovodové antény.

Obrázek 3.15: Přijímaci anténa společně se zesilovači.

3.4 Přijímací anténa 2

Jako druhou možnost jsme zvolili dvouprvkovou anténu HB9CV (jméno dostala dle kombinace volacího kódu HB9 pro Švýcarsko používaným mezi radioamatéry, jelikož její konstruktér odsud pocházel a dle zkratky CV označující typ této antény, tedy *crossed v-dipole*). Tato anténa byla zkonstruována Rudolfem Baugmaerem v roce 1954 jako al-

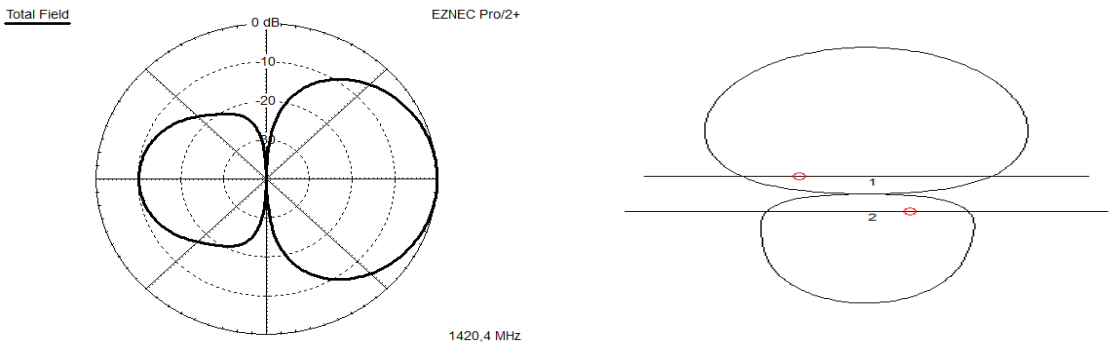
ternativa k tříprvkové Yagiho anténě. Její jednoduchá konstrukce, malé rozměry a vysoká směrovost byly důvodem, proč byla vybrána jako druhá možnost přijímací antény. Anténa se skládá z centrálního prutu a dvou paralelních aktivních prvků. Oba prvky jsou napájeny měděným drátem spojeným s SMA konektorem.



Obrázek 3.16: Teoretický návrh HB9CV naladěný na frekvenci f_{HI}, převzato z [60].

HB9CV má přesně stanovené rozměry závislé na vlnové délce rezonance (viz 3.16). Vzdálenost obou prvků je zhruba $\frac{\lambda}{8}$, což způsobí posunutí fáze o 45°. Dále jsou pak oba prvky buzeny ve fázi 180°, což znamená, že koncové posunutí fáze je o 135°. Díky tomu anténa vyzařuje jednostranně [50], jelikož na její zadní straně se vytvoří destruktivní interference a na její přední straně zase konstruktivní.

V programu *EZNEC* jsme namodelovali vyzařovací charakteristiku HB9CV naladěné na frekvenci f_{HI}. Rozměr antény jsme vypočítali z 3.16. Výsledná charakteristika 3.17a naznačuje jednostranné vyzařování antény. Na obrázku 3.17b je vyobrazena vyzařovací charakteristika vzhledem k symetrii antény. Červeným kruhem je vyznačen přívod napětí na anténu.



(a) Vyzařovací charakteristika HB9CV.

(b) Model HB9CV a její vyzařovací charakteristika.

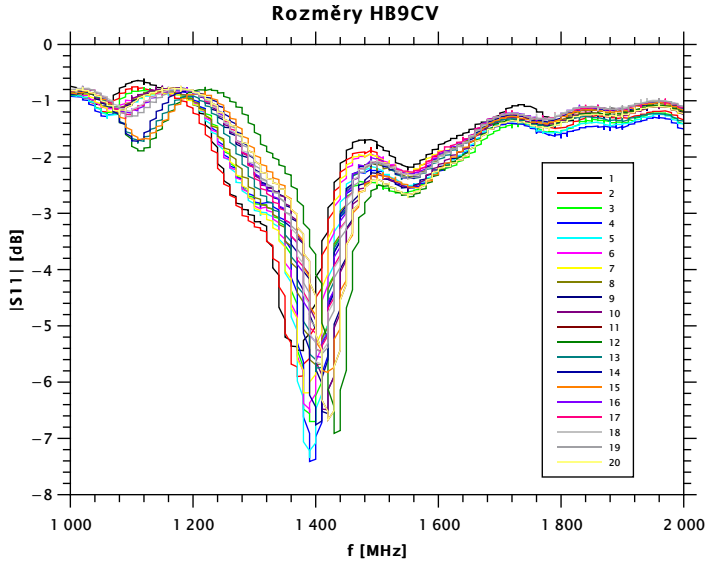
Obrázek 3.17: Modelování HB9CV v programu EZNEC.

3.4.1 Rozměry

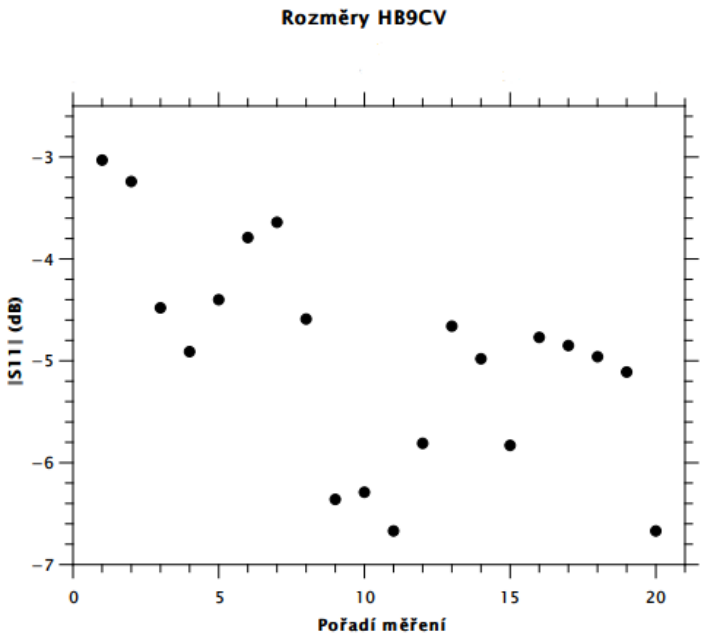
HB9CV jsme sestavili z měděného drátu o průměru 1,5 mm a konektoru SMA. V první fázi jsme rozměry antény zvětšili a postupně zkracovali a prodlužovali, podobně jako u antény č.1, tak, abychom dosáhli optima s parametrem S_{11}. Měřili jsme opět pomocí *Rohde and Schwarz ZVL network analyzer*. Podrobná tabulka parametrů 3.2 ukazuje změny v parametrech a graf 3.18 pak ukazuje změnu parametru S_{11}. Lze si povšimnout velkého rozptylu (kolem 6 dB). Značí to citlivost HB9CV na naladění.

Varianta antény	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
1	97,80	105,00	26,70
2	97,80	105,00	22,71
3	97,80	105,10	22,71
4	97,4	105,10	22,71
5	97,48	105,60	26,70
6	97,48	105,62	26,70
7	97,23	106,58	26,71
8	94,42	106,58	26,71
9	94,42	103,67	26,71
10	94,42	103,28	26,71
11	94,42	102,42	26,71
12	94,42	102,42	22,71
13	94,42	106,51	22,71
14	94,46	104,40	22,71
15	96,61	104,70	22,71
16	93,77	103,30	22,71
17	93,77	103,30	27,39
18	93,77	103,30	26,60
19	93,77	103,30	27,11
20	93,77	103,30	26,75

Tabulka 3.2: Varianty HB9CV.



Obrázek 3.18: Závislost koeficientu odrazu na frekvenci pro různé varianty HB9CV.



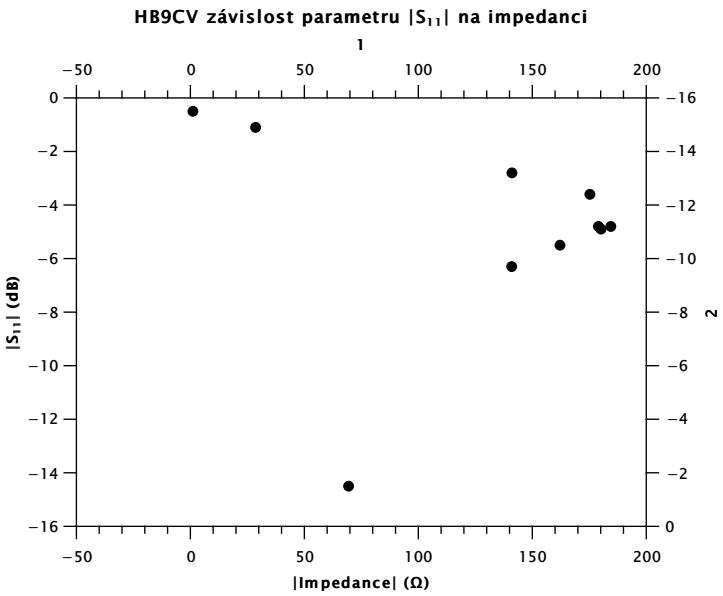
Obrázek 3.19: Porovnání minimálního koeficientu odrazu různých variant HB9CV.

V grafu 3.19 si můžeme všimnout, že hodnoty S_{11} pro f_{HI} jsou velmi podobné pro 11. a 20. variantu. Lze vidět, že se změnou rozměrů se posouvá i hodnota totálního minima S_11. Pro ideálně naladěnou anténu by pozice minima měla být shodná s frekvencí f_{HI}. To se ukázalo u 20. měření, je tedy optimálnější než měření 11.

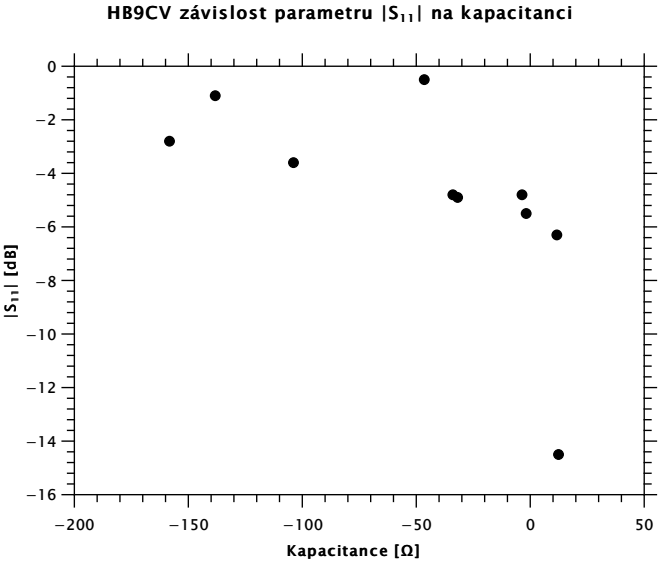
3.4.2 Ladění impedance

Dalším parametrem ladění HB9CV byla její impedance. Při měření impedance jsme zjistili, že je příliš nízká a obsahuje imaginární část ($Z = 61,3\,\Omega$, přičemž $X = -50,6\,\Omega$). Pomocí série kondenzátorů (s kapacitou 1 pF, 1,5 pF, 1,8 pF a 2,2 pF) a cívek jsme se experimentálně pokusili vyladit impedanci tak, aby se co nejvíce přiblížila 50 Ω a odstranit její imaginární část (pro zamezení odrazů na rozhraní). Jelikož je kapacitance záporná, můžeme uvažovat, že se nám v obvodu objevuje parazitní induktivní složka, kterou eliminujeme kapacitní složkou. Dle vtahu 1.12 určíme, že hledaná kapacita je $C = 1,28$ pF. Toto ověříme měřením.

Dle tabulky 3.3 jsme zjistili, že nejideálnější je kombinace HB9CV s kombinací kondenzátorů, jejichž výsledná kapacita je C = 0,6 pF. Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu. Pravděpodobně je to způsobeno nedokonalostmi ve spoji antény a kondenzátorů, což při výměně součástek způsobí neustále nové hodnoty impedance pro anténu. Její naladění je tedy spíše náhodné. Graf 3.21 znázorňuje závislost S_{11} na kapacitanci. V grafu 3.3 lze vidět závislost minimální hodnoty parametru S_{11} na impedanci antény. Očekávaně, nejlepší hodnoty vychází pro impedanci blízkou 50 Ω, pro ostatní hodnoty impedance hodnoty S_{11} klesají. Je nutné přiznat, že nemáme dostatek dat z oblasti okolo Z =50 Ω. Jelikož se kondenzátory vyrábí pouze v určitých hodnotách, nebylo možné dále vyladit anténu. Jelikož nemáme dostatek informací o chování antény v této oblasti, nemůžeme tedy s přesností určit, zda-li naměřený výsledek pro variantu 20 není zatížen náhodnou chybou.



Obrázek 3.20: HB9CV závislost parametru S_{11} na impedanci.



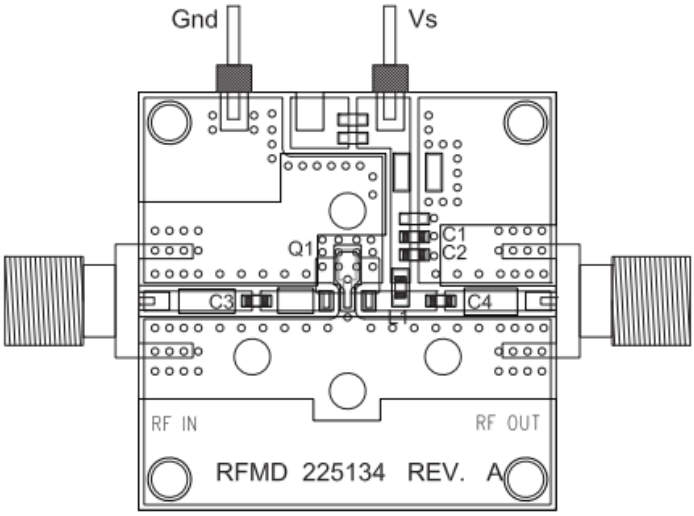
Obrázek 3.21: HB9CV závislost parametru S_{11} na kapacitanci.

Číslo měření	S_{11} [dB]	Z [Ω]	X [Ω]	Použitý prvek
1	-3,6	175,26	-103,87	bez prvku
2	-6,3	140,97	-11,67	kondenzátor, C = 1 pF
3	-5,5	162,15	-1,782	kondenzátor, C = 1,5 pF
4	-4,8	184,45	-3,607	kondenzátor, C = 1,8 pF
5	-4,9	180,14	-31,86	kondenzátor, C = 2,2 pF
6	-4,8	179	-33,95	cívka, dva závity, r = 5,56 mm
7	-0,5	1,112	-46,487	cívka, jeden závit, r = 3,34 mm
8	-1,1	28,625	-138,19	cívka, jeden závit, r = 3,34 mm
9	-2,8	141,08	-158,26	cívka, dva závity, r = 3,34 mm
10	-14,5	69,406	12,41	dva kondenzátory, C = 0,6 pF

Tabulka 3.3: HB9CV ladění impedance

3.5 Zesilovač

K dispozici máme tři širokopásmové zesilovače, dva *SPF5189Z* zesilovače s rozsahem frekvencí (50 – 4000) MHz, udávaný zisk při frekvenci 1700 MHz je 13,8 dB. Šumové číslo při 1700 MHz je udáváno jako 0,75 dB. Jeho schéma je na obrázku 3.22

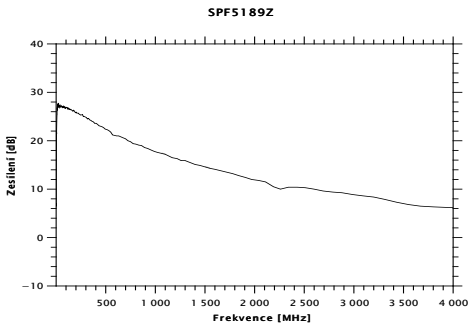


Obrázek 3.22: Schéma SPF5189Z [52].

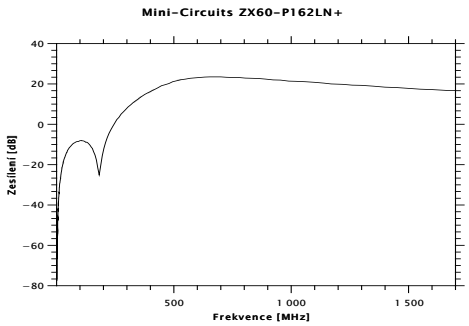
Třetí zesilovač je *Mini-Circuits ZX60-P162LN+* s rozsahem (0,7 –1,6) GHz. Jeho udávaný zisk při $f = 1400$ MHz je 19,81 dB. Šumové číslo při 1400 MHz je udáváno jako 0,7 dB. Jeho schéma je na obrázku 3.23

Obrázek 3.23: Mini-Circuits ZX60-P162LN+, zdroj: Mini-Circuits.

Údaje od výrobce jsme si ověřili měřením zisku zesilovače napříč frekvenčním spektrem pomocí *Rohde and Schwarz ZVL network analyzer*. Proměřili jsme každý zesilovač a následně i kombinace zesilovačů Mini-Circuits a SPF.



(a) Zesílení SPF5189Z v závislosti na frekvenci.

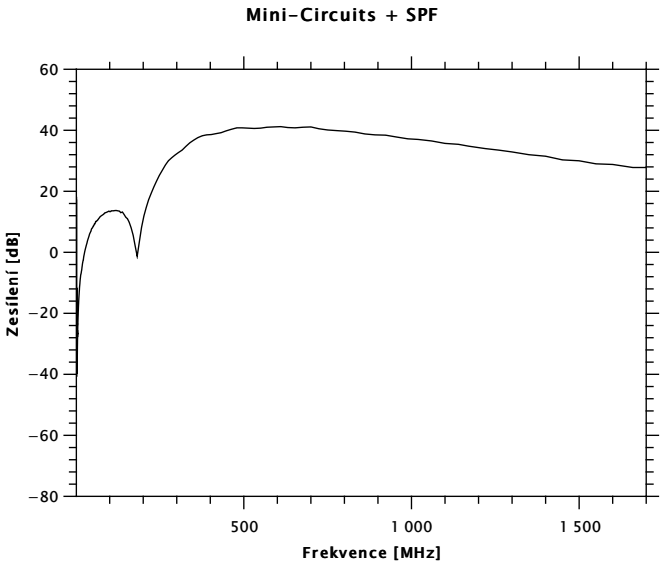


(b) Zesílení Mini-Circuits ZX60-P162LN+ v závislosti na frekvenci.

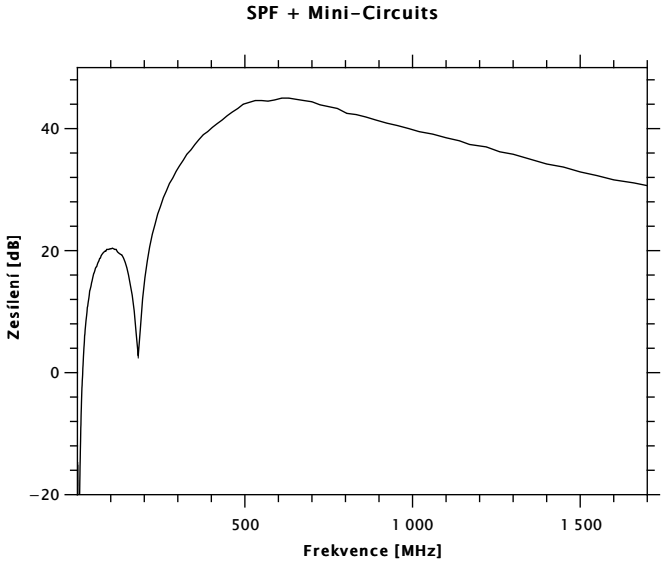
Obrázek 3.24: Směrová charakteristika radioteleskopu, jednotky v [dBFS].

Pro *SPF5189Z* jsme zjistili, že šířka pásma frekvencí, na kterých dobře zesiluje, je dle našeho odhadu (0,6–2000) MHz, tedy menší, než šířka udávaná výrobcem. Pro $f = 1420\,\mathrm{MHz}$ je $G = 15,3\,\mathrm{dB}$ (graf 3.24a). Takové zesílení lze dle dat od výrobce čekat. Poznamenejme také, že u zesilovače *SPF* pozorujeme mírné zvlnění křivky okolo frekvence 1420 MHz. Je to důležitý faktor, který se může projevit ve zkreslení zesíleného signálu.

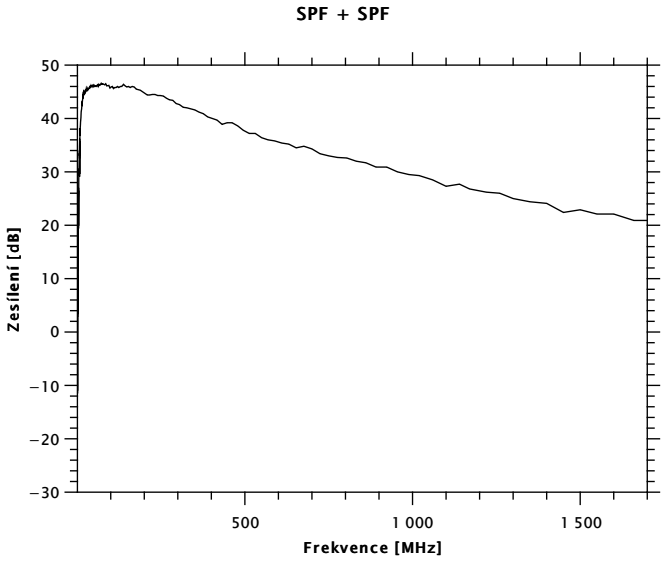
Zesilovač *Mini-Circuits ZX60-P162LN+* má odhadem šířku pásma stejnou, jaká byla udána. Pro $f = 1420\,\mathrm{MHz}$ je zesílení $G = 18,4\,\mathrm{dB}$ (graf 3.25b). Toto je menší zesílení, než jaké uvádí výrobce. Zesilovač *Mini-Circuits* je parametrově lepším zesilovačem.



Obrázek 3.25: Zesílení Mini-Circuits + SPF v závislosti na frekvenci.



Obrázek 3.26: Zesílení SPF + Mini-Circuits v závislosti na frekvenci.



Obrázek 3.27: Zesílení SPF + SPF v závislosti na frekvenci.

Při porovnání kaskády zesilovačů, nejlépe vychází systém *SPF + Mini-Circuits*. Na frekvenci $f = 1420\,\mathrm{MHz}$ dávají zesílení $G = 34,2\,\mathrm{dB}$. Podobně vychází stejný systém, ve kterém jsme prohodili pořadí zesilovačů, $G = 31,5\,\mathrm{dB}$. Očekávaně, nejmenší zisk přináší kaskáda dvou zesilovačů *SPF*, $G = 23,5\,\mathrm{dB}$. Je nutné věnovat pozornost tomu, že vysokofrekvenční obvody jsou náchylné na jakékoliv nedokonalosti. Pro měření byl použit profesionální zkalibrovaný síťový analyzátor, chybu ovšem můžeme nejpravděpodobněji hledat ve spojích mezi zesilovačem a vstupem/výstupem analyzátoru. Jelikož jsme neměli potřebný nástroj k úplnému dotažení spojů a konstrukce zesilovačů omezovala přístup k

těmto spojům, je pravděpodobné, že došlo ke ztrátě signálu, přičemž tato ztráta nebyla konzistentní (pokaždé byl spoj dotažený jinak). Přesné hodnoty proto musíme brát orientačně, nicméně poměry zisků a charakteristiky by měly být zachovány. Funkci zesilovačů v rámci konfigurace s anténou jsme ověřili tak, že jsme zesilovače připojili k anténě, kterou jsme následně připojili k počítači a pomocí *SDR#* jsme sledovali, jak se mění intenzita peaku vygenerovaného signálu o frekvenci f_{HI}.

Zesilovač	Signál [dBFS]	Šum [dBFS]	S/N [dB]
bez zesilovače	-33,5	-81,7	47,8
SPF5189Z	-8,8	-74,0	65,2
dva SPF5189Z	-1,1	-54,6	53,3
Mini-Circuits	-4,7	-71,0	67,4
Mini-Circuits a SPF5189Z	-3,9	-53,2	50,1

Tabulka 3.4: Zesilovače v kombinaci s anténou.

Zesilovač značky Mini-Circuits je dražším a parametry lepším zesilovačem, nicméně v tab 3.4 není moc úspěšný. Použijeme-li vztah (2.15), pro kaskádu zesilovačů by jasně mělo vyjít menší šumové číslo (tzn. vyšší poměr S/N) pro kombinaci Mini-Circuits a SPF5189Z, ovšem paradoxně vychází lepší pro dva zesilovače SPF5189Z. Kombinace dvou zesilovačů odpovídá dle tab 3.4 horší hodnotě poměru S/N než anténa bez zesilovače. Je možné, že za větší šum může *SPF*, který v oblasti f_{HI} zesiluje nestabilně. Na základě analýzy provedené až po měření neutrálního vodíku jsme stanovili, že nejvhodnější by bylo dle získaných dat použít zesilovač jen jeden.

3.6 Přijímač SDR

Na měření používáme *NooElec NESDR SMArt* přijímač. Je to SDR s chipsetem Realtek RTL2832U. Ten byl původně zamýšlený pro DVB-T, ale ukázalo se, že funguje jako ideální demodulátor pro SDR přijímače a v dnešní době je jedním z nejrozšířenějších chipsetů. U radioamatérů je natolik oblíbený, že je mu věnovaný celý internetový web [48], který je plný článků a tipů o jeho praktickém využití. *NooElec NESDR SMArt* má frekvenční pásmo (100 kHz – 1,75 GHz). Jedna z jeho vyzdvihovaných vlastností by pak měla být stabilita bez závislosti na menších teplotních rozdílech. V praxi jsme se přesvědčili, že SDR je přece jen na teplotu náchylné, jelikož hodnoty intenzity přijatého signálu nebyly během delšího měření stabilní.

3.7 Porovnání přijímacích antén

Před sestavením aparatury je nutné rozhodnout, jakou anténu použít. Při porovnání S_{11} parametrů vychází podstatně lépe vlnovodová anténa, neboť její minimum v f_{HI} je -19 dB (graf 3.12), zatímco pro HB9CV je to -14 dB (graf 3.3).

Kontrolně jsme porovnali i rozdíly v příjmu signálu. K dispozici jsme měli pět různých antén, přijímací anténu 1 (a1), HB9CV (a5), větší širokopásmovou anténu (a2), menší

širokopásmovou anténu (a3) a širokopásmovou anténu vyšší kvality *Aaronia Ag hyperlog 60100*. Proměřovali jsme dvojice antén. Vysokofrekvenčního zdroje *RFExplorer Handheld RF Signal Generator* jsme napojili na jednu a druhou jsme přes SDR zapojili do počítače a pomocí programu *Airspy SDR#* jsme sledovali intenzitu signálu na frekvenci f_{HI} (pozn. SDR# měří intenzitu signálu v dBFS, což je jednotka definovaná jako dekadický logaritmus poměru přijatého signálu ku maximálnímu možnému změřitelnému signálu). Výsledkem je tabulka 3.5, která srovnává všech pět antén proměřených vůči sobě.

	a1	a2	a3	a4	a5
a1	-	-27,7	-22,7	-21,2	-27,3
a2	-27,7	-	-30,6	-29,4	-31,1
a3	-22,7	30,2	-	-26,5	-27,8
a4	-21,2	-29,4	-26,5	-	-28,0
a5	-27,3	-31,1	-27,8	-28,0	-

Tabulka 3.5: Porovnání antén, údaje v [dBFS].

Tabulka nejen, že srovnává vytvořené antény, ale porovnává je i se širokopásmovými anténami. Ve výsledku dopadla nejlépe anténa, která přijímá (a vysílá) signál na frekvenci f_{HI} nejlépe. Toto je očekávané zjištění, jelikož byla právě na tuto frekvenci naladěna (oproti širokopásmovým anténám, které sice přijímají signál na širokém rozsahu frekvencí, ale na úkor zisku, který je očividně menší, než u úzkopásmové antény). Anténa HB9CV byla naopak nejhorší. HB9CV nenaplnila coby směrová anténa očekávání. Její zisk je oproti předpokladu z původního článku [50] o dost nižší. V závěru, HB9CV má výhodu ve svých malých rozměrech (což znamená menší plochu, která blokuje přijímaný signál), ovšem oproti vlnovodové anténě hůř přijímá signál, má větší nároky na přesnost při výrobě a při používání je náchylnější na rozladění. V aparatuře tedy použijeme vlnovodovou anténu.

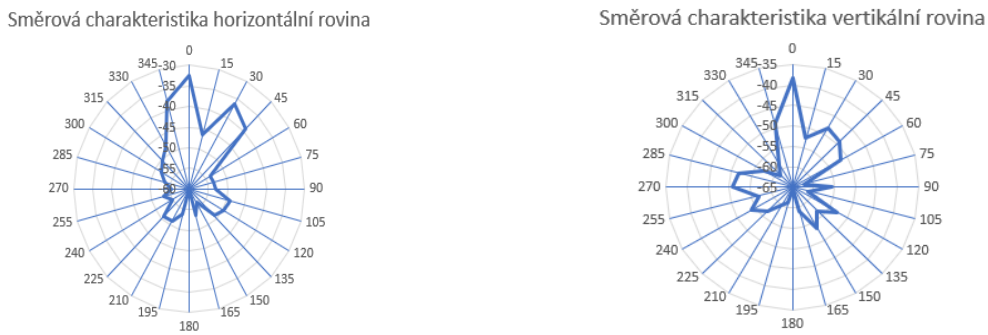
3.8 Sestavení aparatury

Po sestavení aparatury jsme se pokusili zjistit její změřitelné parametry. Začali jsme směrovou charakteristikou. Vysílač jsme umístili na otočnou podložku cca 1,5 m nad zemí, pod kterou byla umístěna podložka s úhloměrem. Na 20 m vzdálené místo jsme postavili anténu, ke které jsme připojili vysokofrekvenční zdroj *RFExplorer Handheld RF Signal Generator*, který vygeneroval frekvenci o kmitočtu f_{HI}. K PC jsme připojili sestavu a pomocí programu *Airspy SDR#* jsme sledovali intenzitu peaku na dané frekvenci. Parabolickou anténu jsme v horizontální rovině z polohy $\Phi = 0\,^\circ$ po $15\,^\circ$otáčeli po směru hodinových ručiček a zaznamenávali si intenzitu přijatého signálu. Totéž jsme provedli pro vertikální rovinu. Výsledkem byl graf 3.28. Grafy se očividně liší od modelových (obrázek 3.29, orientační směrová charakteristika antény z válcového vlnovodu). Hlavní lalok je posunutý oproti pozici $\Phi = 0°$. V obou rovinách se také objevují nechtěné výrazné boční laloky. Měření vyzařovací charakteristiky je velmi náročné na přesnost a ideálně by se mělo dělat v neodrazové místnosti. Jelikož taková místnost nebyla k dispozici, prováděli jsme měření venku na zahradě, kde se signál odrážel a interferoval s rušením. Toto značně výslednou

podobu zkreslilo. Vyšlo navíc najevo, že by při měření prospělo postupovat po menších úhlových intervalech. I přes tato úskalí se nám podařilo zachytit poměrně dobrou směrovost. Z grafů lze odečíst alespoň orientační hodnotu vyzařovacího úhlu v každé rovině:

$$\theta_1 = 10,49 \tag{3.3}$$

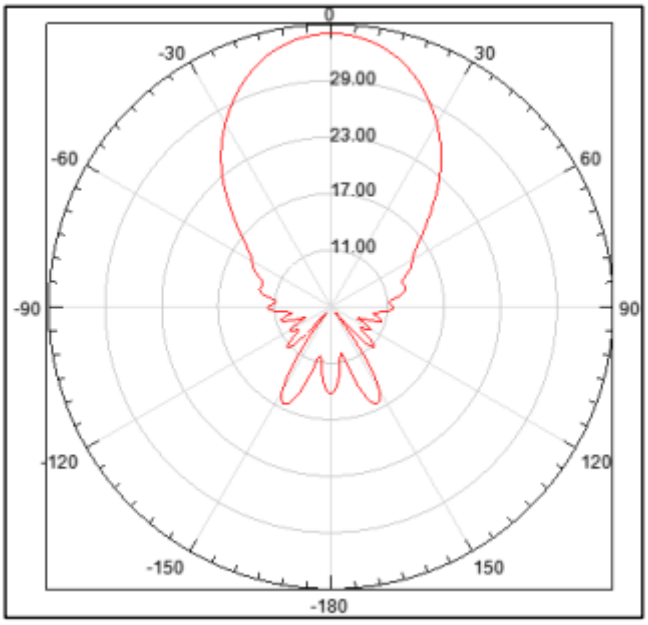
$$\theta_2 = 8,59 \tag{3.4}$$



(a) Směrová charakteristika horizontální rovině

(b) Směrová charakteristika ve vertikální rovině

Obrázek 3.28: Směrová charakteristika radioteleskopu, jednotky v [dBFS].



Obrázek 3.29: Orientační podoba vyzařovací charakteristiky vlnovodové antény podobné té naší spočítaná v [47].

Známe-li vyzařovací úhly, můžeme vypočítat činitel směrovosti dle rovnice (1.54)

$$D_{\max} = 457,8117 \tag{3.5}$$

a dále také zisk z rovnice (1.55) a (1.56)

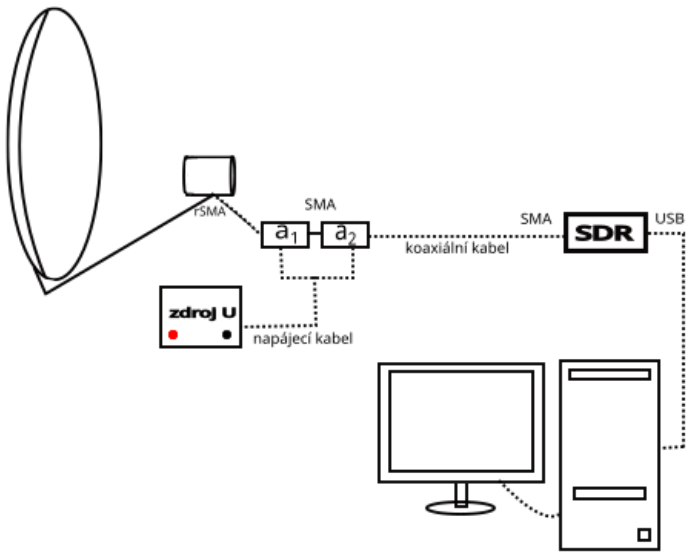
$$G_{\text{abs}} = 26,607\,\text{dB} \tag{3.6}$$

$$G_{\text{rel}} = 24,458\,\text{dB}_{\text{d}}. \tag{3.7}$$

Výsledné parametry mají velmi slibné výsledky, nicméně je nutné uvážit to, že jejich hodnota je dost zkreslená díky nepřesným údajům z grafu 3.28. Pokud by reálná hodnota zisku dosahovala 20 dB, byla by ideální.

Pro upevnění parabolické antény bylo potřeba vyrobit stojan. Zvolili jsme jednoduchou dřevěnou konstrukci s křížovou základnou, vyrobenou doma z kousků palet. Ideální radioastronomické konstrukce jsou motorizované a otočné v horizontálním směru o 360°, ve vertikálním o 90°. Pro naše účely postačil vertikální stupeň volnosti v rozmezí 45°, který byl zajištěn držákem antény dodaným již z výroby.

Schéma výsledné aparatury najdeme na obrázku 3.30 a fotografii aparatury na obrázku 3.31. Skládá se z parabolické antény, vlnovodové přijímací antény, kaskády zesilovačů Mini-Circuits (a_1) a SPF5189Z (a_2) napájené 4 V zdrojem *Tesla BK 127*, propojovacích koaxiálních kabelů a přechodek (výhradně mezi zesilovači, které končí výstupem SMA female), dále pak u napájecího konektoru přijímače, který je typu rSMA, což znamená, že má opačný typ výstupu než normální SMA. Tento spoj je vyřešen rSMA to SMA přechodem, který ovšem potenciálně vnáší do soustavy další faktor nejistoty. Sestava končí RTL-SDR přijímačem zapojeným přes USB vstup do počítače. Schéma zapojení můžeme vidět na obr. 3.30. Fotografie aparatury se nachází na obrázku 3.31.



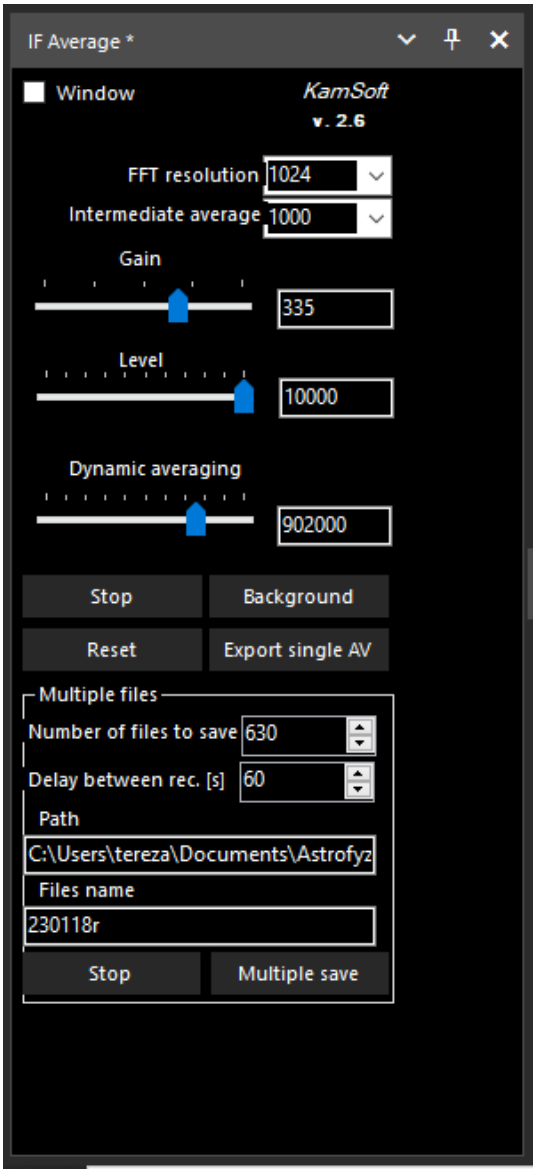
Obrázek 3.30: Schéma zapojení aparatury radioteleskopu.

Obrázek 3.31: Fotografie zapojení aparatury.

3.9 Měření galaktického vodíku

Měření samotné čáry H probíhalo tak, že jsme aparaturu umístili na autorčině zahradě (N 49,1718, E 16,5780), zapojili do počítače, zesilovače zapojili na laboratorní zdroj *Tesla BK 127*, který dodával napětí 4 V. V počítači jsme spustili program *Airpsy SDR#*, nastavili v něm zdroj na RTL-SDR a vycentrovali jsme na frekvenci 1420,4 MHz. Jelikož SDR# umožňuje zobrazovat data pouze v reálném čase, je nutné zapnout plugin *IF Average*, který průměruje intenzitu (s nastavitelnou dobou průměrování) a následně ji společně s korespondující frekvencí zapisuje do .txt souboru. Z obrázku 3.32 můžeme vidět nastavení, které průměruje signál každou minutu (tato hodnota lze nastavit konfigurací funkcí *FFT resolution*, *Intermediate average* a *Dynamic averaging*). Funkce *Gain* a *Level* slouží pouze ke škálování grafického zobrazení závisloti intenzity na frekvenci, kterou plugin nabízí. Důležitá funkce je *Save multiple files*, která umožňuje ukládat zadané množství souborů se zadaným časovým rozestupem, což do jisté míry zautomatizuje měření. Integrační dobu jsme nastavili na dvě minuty.

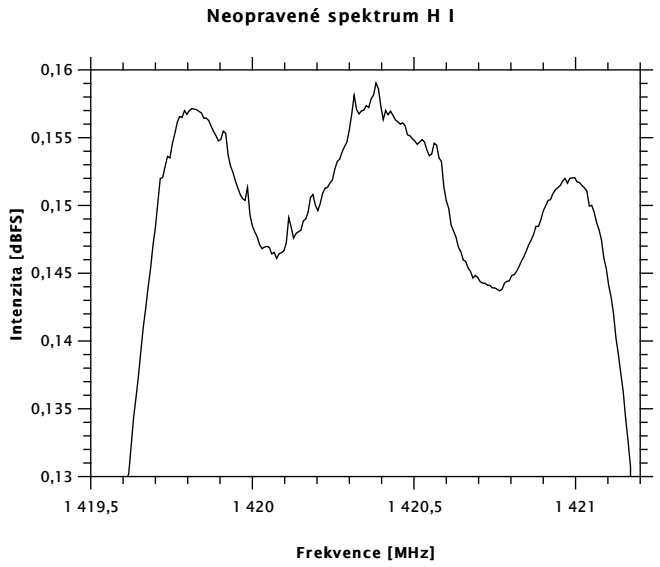
K plánovanému mapování Galaxie využijeme rotaci Země, což umožňuje průchod Mléčné dráhy přes zorné pole radioteleskopu. Po nastavení SDR# jsme otevřeli *Stellarium*, našli na něm, v rozmezí jakých výškových úhlů můžeme Mléčnou dráhu očekávat, namířili parabolickou anténu a spustili dlouhodobé měření. V naměřených datech jsme nalezli jak přechod Mléčné dráhy zorným polem radioteleskopu, tak data bez něj. Bylo nutné zpětně dle *Stellaria* určit, kdy k přechodu došlo.



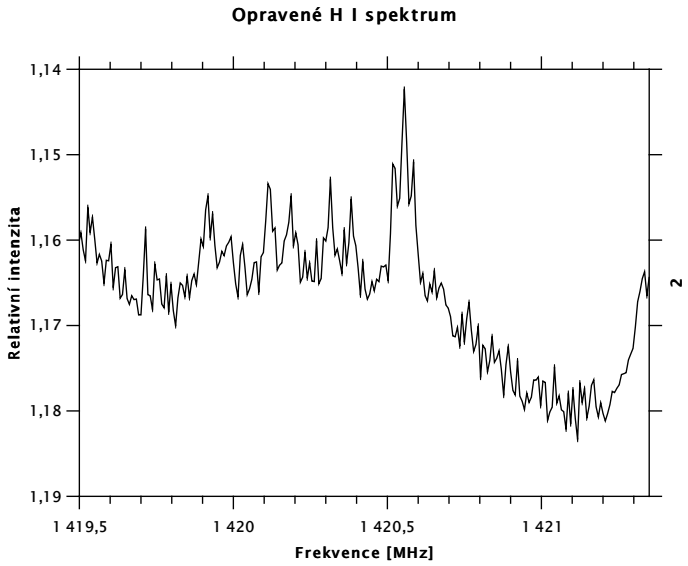
Obrázek 3.32: Nastavení pluginu IF Average.

Naměřené data bylo nutné zpracovat v programu *Excel*, jelikož byla nezkalibrovaná a projevovala se v nich nedokonalost přijímače (což způsobilo vlny ve spektru, viz. graf 3.33). Korekce byla provedena podělením dat s H I čárou daty pouze s pozadím (z doby, kdy Mléčná dráha není v zorném poli antény). To nám poskytlo dostatečně rovné spektrum (3.34). Všimněme si, že rozdíl intenzit zachyceného signálu neutrálního vodíku a šumu je velmi malý. Ideálně by měl být rozdíl větší pro lepší zobrazení profilu spektrální čáry. Čáru H I se nám podařilo zachytit v grafu 3.36. Pozorovací čas je cca jedna hodina, po tomto intervalu zmizí galaktické H I ze zorného pole radioteleskopu (to odpovídá tomu, že úhlová rychlost rotace Země je cca 15°/hod a úhlovou šířku Mléčné dráhy odhadujeme na 10°– 30°). V okolí frekvence 1420,4 MHz si lze všimnout vícero výraznějších peaků. Vodíkové mračna jsou v ramenech Galaxie složená z více částí, každá část má svoji vlastní radiální rychlost (na obrázku 3.35 můžeme vidět, že při pohledu na Mléčnou dráhu ve

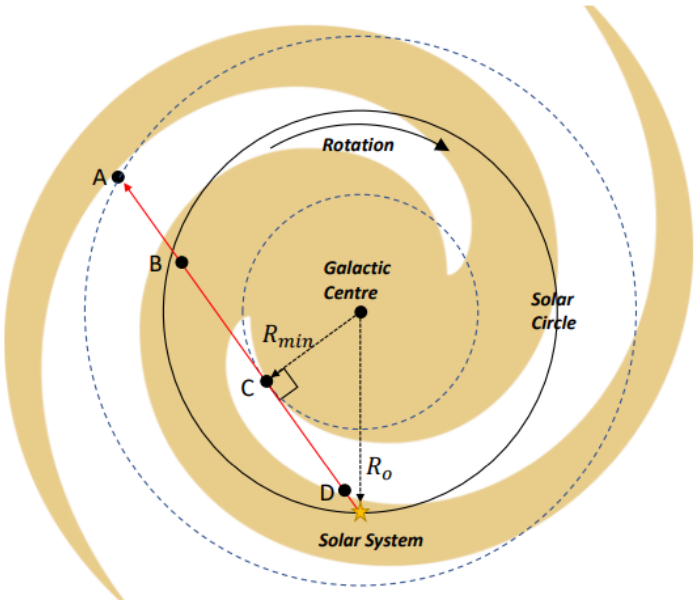
skutečnosti vidíme vícero částí spirálních ramen). V důsledku působení Dopplerova jevu tedy pozorujeme posunutí frekvence na vyšší frekvenci (blue shift) nebo na nižší frekvenci (red shift). Toto má za příčinu rozkouskování peaků v grafu 3.36. Každý peak odpovídá jinému mračnu.



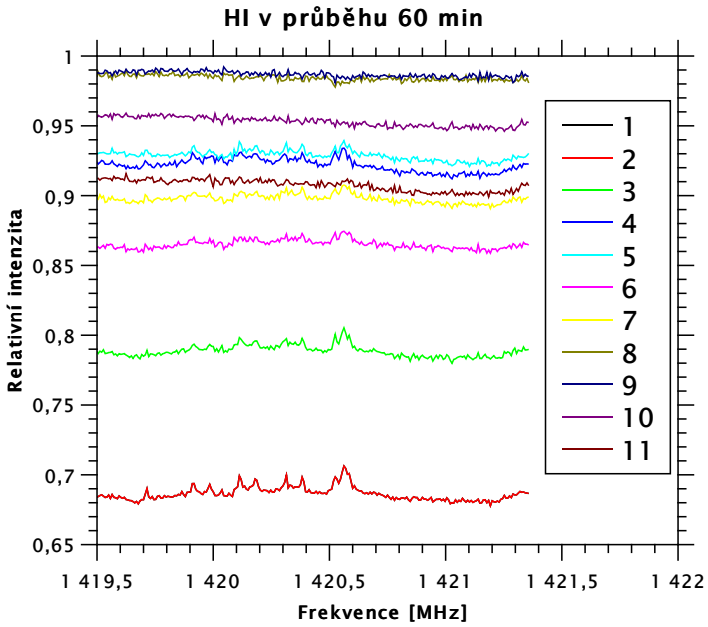
Obrázek 3.33: Neopravené spektrum.



Obrázek 3.34: Opravené spektrum.

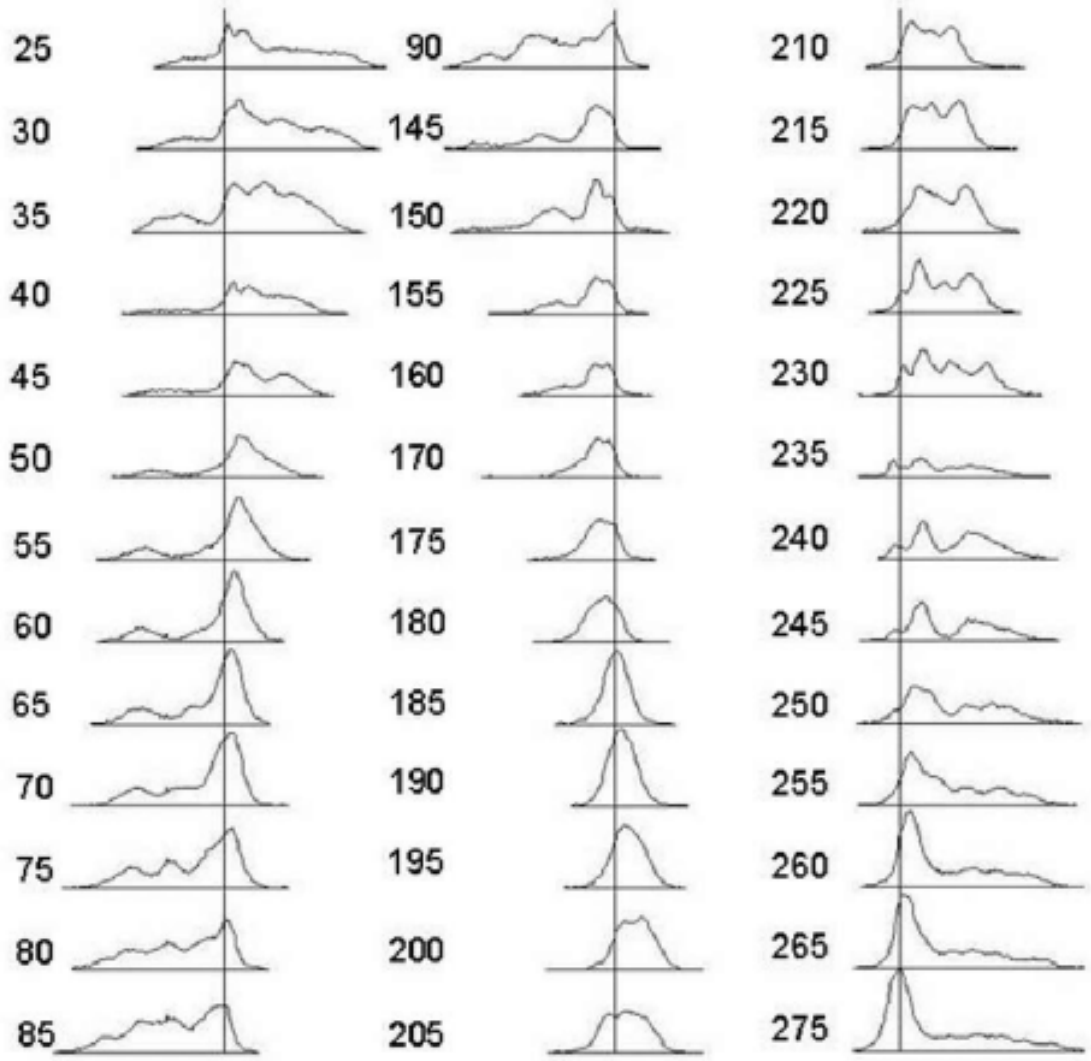


Obrázek 3.35: Rotace Galaxie, zdroj: PhysicsOpenLab.



Obrázek 3.36: Časový vývoj čára H I v průběhu zhruba jedné hodiny s integračním rozestupem 5 min.

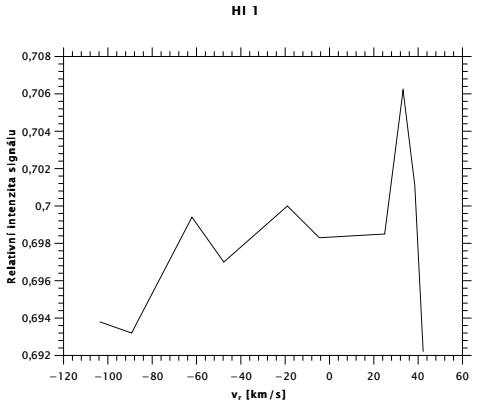
Při studiu grafu 3.36 je patrné, že relativní intenzita a prahová hodnota šumu (*floor*) se s časem skokově mění. Pravděpodobně je to způsobeno teplotní nestabilitou SDR přijímače. Z tohoto důvodu je téměř nemožné porovnávat dvě různé série dat mezi sebou. Tento jev lze omezit pomocí kalibrace Planckovým zářičem (vyhřívaným odporem), ale tato metoda je technicky náročná.



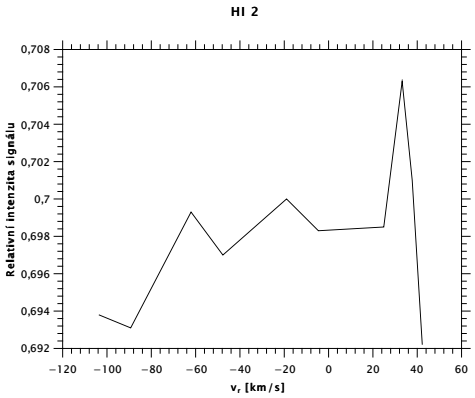
Obrázek 3.37: Referenční naměřené profily H I čáry pro různé galaktické šířky [33].

Profily spektrální čáry lze dohledat v literatuře, např. v [33]. Podoba profilu spektrální čáry se mění v závislosti na galaktických souřadnicích pozorovaného mraku. Evidentně je vždy přítomný jeden nejintenzivnější peak a zbytek signálu se kolem něj rozprostře v závislosti na radiální rychlosti dané části mračna (obr. 3.37). Radiální rychlosti mračen očekáváme v intervalu ± 150 km/s, největší intenzitu peaku v rozmezí ± 10 km/s [64]. V naměřených datech jsme v každém jednotlivém spektru identifikovali co nejvíce peaků H I. Vybírali jsme ty, které měly největší rozdíl mezi prahovou hodnotou šumu a jejich vlastním signálem. Z měření se zdá, že tyto peaky tvoří tři hlavní skupiny. Jak již bylo řečeno, jejich identifikace byla obtížná, jelikož občas splývaly s hladinou šumu. Ke každému identifikovanému peaku jsme našli odpovídající frekvenci a intenzitu. Frekvenci jsme použili ve vztahu (2.12), ze kterého jsme získali radiální rychlost v_r. Radiální rychlosti a jejich intenzity jsme vynesli do grafu. V grafickém znázornění si všimněme pravé části grafu 3.41. Tato křivka znázorňuje použití Dopplerova posunu na frekvenční spekrum, ve kterém je pouze šum. Oproti předchozím grafům je tedy zřejmé, že naše výsledky nejsou

náhodné fluktuace šumu. Při porovnání v_r v profilu H I čáry (grafy 3.38, 3.39, 3.40, 3.41) můžeme najít jisté podobnosti s profilem naměřeným. Např. profil H I 6 (obr. 3.40) a profil č. 60 z obr.3.37. Patrný problém je v tom, že nemáme dostatečně rozlišitelná data, abychom složili kvalitní profil čáry H I a mohli je přesněji porovnávat s referenčním obrázkem.

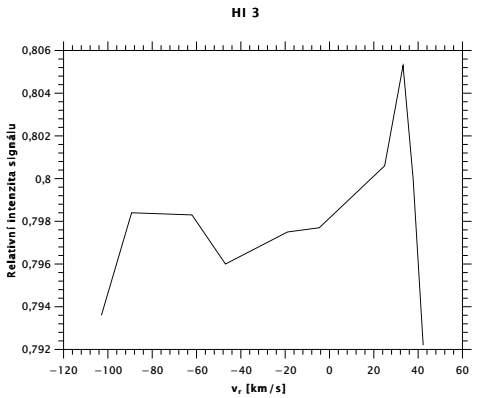


(a) Řada 1

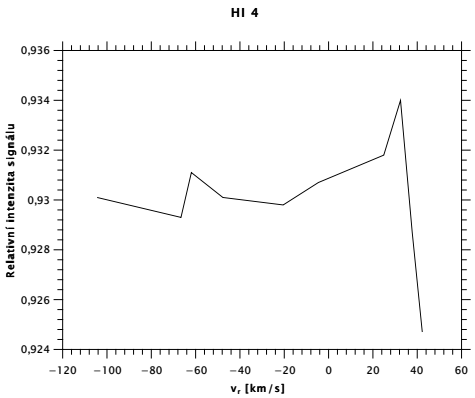


(b) Řada 2

Obrázek 3.38: Rozložení radiálních rychlostí v profilu H I spektrální čáry.

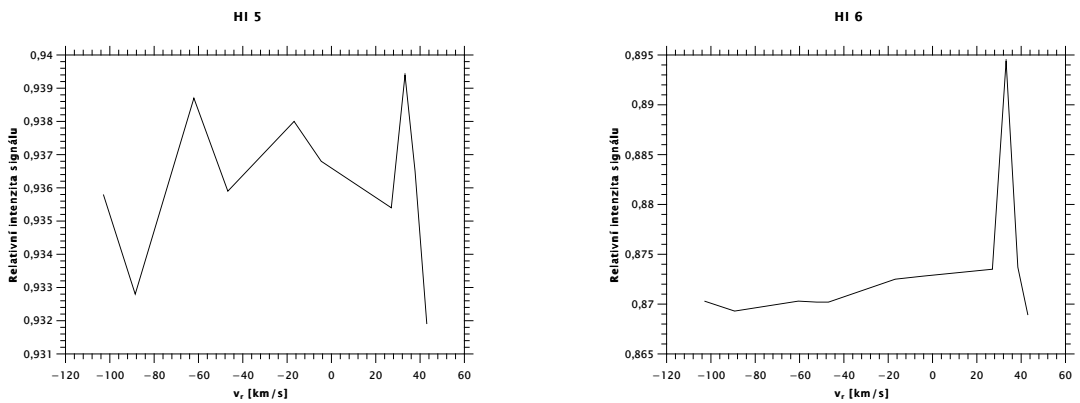


(a) Řada 3



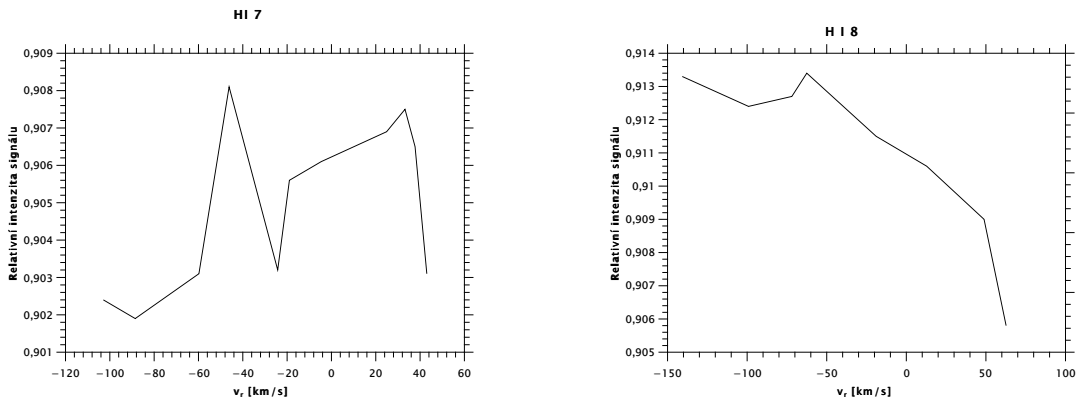
(b) Řada 4

Obrázek 3.39: Rozložení radiálních rychlostí v profilu H I spektrální čáry.



(a) Řada 5 (b) Řada 6

Obrázek 3.40: Rozložení radiálních rychlostí v profilu H I spektrální čáry.



(a) Řada 7 (b) Řada 8

Obrázek 3.41: Rozložení radiálních rychlostí v profilu H I spektrální čáry.

Ačkoliv se nám podařilo zachytit signál neutrálního vodíku a s pomocí Dopplerovského posunu graficky znázornit jeho spektrální čáry, nelze dělat hlubší analýzu. Základním omezením je slabá intenzita signálu a špatné vyladění poměru S/N. V průběhu sestavovaní aparatury jsme zaznamenali několik možných příčin ztráty signálu; z rozladění přijímací antény (kvůli vychýlení vyzařovacího prutu z optimální pozice) a z nedostatečně utažených spojů (mezi konektory SMA). Nedostatečná teplotní kompenzace zesilovače a SDR přijímače může ovlivnit celkový šum (a tím efektivně snížit poměr S/N). Další omezení také tkví v použití malé parabolické antény, jelikož má malou sběrnou plochu. Můžeme si všimnout, že i u ostatních pokusů s parabolou s menším průměrem než 1 m nelze očekávat příliš kvalitních dat [63]. Problému malé sběrné plochy lze předejít úzkopásmovým filtrem, který zvýší poměr signálu a šumu a zlepší kvalitu signálu [49] [65]. Navíc je možné, že přijímací anténa nebyla přesně v ohnisku paraboly a ozařovala jen její část, což mohlo vést k výraznému poklesu signálu.

Pro kvalitnější výsledky by bylo potřeba použít anténu s větší sběrnou plochou, nebo minimálně vyrobit úzkopásmový filtr na potlačení šumu. Bylo by také vhodné lépe proměřit pozici ohniska paraboly. Optimalizovat bychom mohli i dobu průměrování dat. Doba nesmí být moc dlouhá, jelikož by rozmazala časový profil čáry H I, mohli bychom si dovolit ji prodloužit v řádu několika minut, což by ještě více zlepšilo poměr signálu a šumu.

Kapitola 4

Závěr

V bakalářské práci jsme se zabývali návrhem, sestavením a otestováním radioteleskopu pro příjem signálu neutrálního vodíku z naší Galaxie.

Podstatnou část práce jsme věnovali sestavení přijímací antény. Díky znalosti vlastností elektromagnetického pole vlnovodů a antén jsme sestavili přijímací antény dvě, jednu z cylindrického vlnovodu, druhou dvouprvkovou typu HB9CV. Sledovali jsme, že se změnou geometrických parametrů obou antén se rychle mění jejich schopnost přijímat signál. Díky teorii jsme vybrali správnou nádobu pro vlnovodovou anténu a měřením jsme našli optimální pozici napájecího drátu a jeho délku. Optimum bylo mírně jiné, než jaké udávala teorie. Anténa projevila poměrně dobré výsledky (minimum absolutní hodnoty parametru S_{11}, tedy poměr signálu odraženého a dodávaného, se nám podařilo stáhnout na -19 dB). Jediná nevýhoda této antény byl vyzařovací prut, který nedržel stabilní polohu v nádobě a jeho odchýlení od optimální polohy se projevilo na charakteristice příjmu signálu. Jako variantu k vlnovodové anténě jsme zvolili HB9CV, která se zdála nenáročná na konstrukci. Po jejím zkonstruování z měděného drátu dle vypočtených rozměrů jsme opět dolaďovali minimum $|S_{11}|$ pomocí změny rozměrů a ladění impedance. Jako ideální impedance se potvrdila ta, která se blížila 50 Ω, optimální rozměry antény se mírně lišily od teoretických výpočtů. Zjistili jsme, že HB9CV naladěná na f_{HI} je velmi citlivá na jemné změny a její impedance je podstatně ovlivněna i zdánlivě nezajímavými prvky antény jako je např. délka nožiček kompenzačního kondenzátoru. Z tohoto důvodu bylo její naladění obtížné a minimum $|S_{11}|$ kleslo pouze na -14 dB. S přihlédnutím na jednoduché rozladění a horší přijímání signálu HB9CV jsme se nakonec rozhodli pro anténu z cylindrického vlnovodu, i přesto, že má větší rozměry a stíní tak efektivní plochu pro příjem signálu na parabole.

K sestavení kaskády zesilovačů jsme použili zesilovače *SPF5189Z* a *Mini-Circuits ZX60-P162LN+*. Při proměření jejich parametrů jsme zjistili, že se mírně liší od parametrů udávaných výrobcem. Jako příčinu této nesrovnalosti jsme stanovili odraz signálu na rozhraní SMA přechodů, které nemusely být dobře dotáhlé a způsobily ztrátu signálu. Zjistili jsme také, že zesilovač *SPF5189Z* má v okolí f_{HI} nepravidelnosti, což je další faktor, který zasahoval do zesílení signálu. Dále jsme zjistili, že i SDR přijímač vnášel nejistotu do měření, jelikož byl citlivý na teplotu.

Po sestavení kompletní aparatury jsme naměřili její vyzařovací charakteristiku. Její měření bylo náročné na správné provedení, proto jsme také dostali jen orientační výsledky. Vyzařovací diagram vykazoval určitou shodu (např. směrovost, menší zadní laloky) s

teoretickou předpovědí z literatury. Za pomocí směrové charakteristiky jsme vypočítali i orientační hodnotu zisku antény.

Při zpracování dat z měření spektrální čáry H I jsme museli udělat korekci dat, zejména korekci pozadí. Po provedení této korekce jsme zpozorovali několik širších peaků okolo oblasti f_{HI}. Nicméně tyto peaky byly poměrně slabé a nevykazovaly typický profil spektrální čáry H I. Naměřené peaky byly těsně nad hranicí šumu a poměr S/N byl velmi malý, přesto se nám ale podařilo z naměřených dat vypočítat radiální rychlosti z Dopplerovského posuvu, přesnost však nebyla dostačující k vytvoření přesvědčivé mapy Galaxie.

Cíl bakalářské práce jsme splnili, signál neutrálního vodíku se podařilo naměřit, ovšem ne dostatečně kvalitně na to, abychom byli schopni ho použít na pokročilé analýzy. Pro následující měření by bylo vhodné zvýšit poměr signálu a šumu, nejlépe úzkopásmovým filtrem, zvětšit sběrnou plochu antény a zvýšit integrační dobu průměrování signálu.

Seznam použité literatury

[1] Ferrière, K. M., *The interstellar environment of our galaxy*, Reviews of Modern Physics, vol. 73, no. 4, 1031–1066, 2001
https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0106359.pdf

[2] van de Hulst, H. C., *Observations of the interstellar hydrogen line of wave length 21 cm made at Kootwijk, Netherlands*, The Astronomical Journal, vol. 56, pp. 144–144, 1951

[3] Oort, J. H., *Measures of the 21-cm line emitted by interstellar hydrogen*, Vistas in Astronomy, vol. 1, no. 1, pp. 607–616, 1955

[4] Wiese, W. L. and Fuhr, J. R., *Accurate Atomic Transition Probabilities for Hydrogen, Helium, and Lithium*, Journal of Physical and Chemical Reference Data, vol. 38, no. 3, pp. 565–720, 2009.

[5] Meeus, J., *Astronomical algorithms* Richmond, Va.: Willmann-Bell. pp. 102–103.

[6] Westerhout, G., *A Summary of Our Knowledge of the Neutral Hydrogen in Galaxies*, in Problems of Extra-Galactic Research, 1962, vol. 15, p. 70

[7] Tirpák, A., *Elektronika veľmi vysokých frekvencií*, Bratislava: Univerzita Komenského, 2001

[8] https://www.nasa.gov/feature/how-dark-matter-could-be-measured-in-the-solar-system

[9] Sizun, H., *Radio wave propagation for telecommunication applications*, Berlin: springer, 2005

[10] Oort, J. H., *Radio Astronomy - A Window on the Universe*, American Scientist, vol. 48, pp. 160–178, 1960

[11] Hartmann, D. and Butler Burton, W., *Atlas of Galactic Neutral Hydrogen*, 2012

[12] Moorman C., *Spin Flip Transition of Hydrogen in Astrophysics*, Physics Department, Drexel University, 2010

[13] Burton, W. B., *The Large-Scale Distribution of Neutral Hydrogen in the Galaxy*, in Galactic and Extra-Galactic Radio Astronomy, 1974, p. 127

[14] Marconi, G., *A Note on the Effect of Daylight upon the Propagation of Electromagnetic Impulses over Long Distances*, Proceedings of the Royal Society of London Series I, vol. 70, pp. 344–347, 1902.

[15] Jansky, K. G., *Radio Waves from Outside the Solar System*, Nature, vol. 132, no. 3323, p. 66, 1933.

[16] Reber, G., *Cosmic Static*, The Astrophysical Journal, vol. 91, pp. 621–624, 1940

[17] Vidarsson, A. M., *Distribution and motion of hydrogen gas in the Milky Way galaxy*, Faculty of Physical Sciences, University of Iceland, 2014

[18] van de Hulst, H. C., *Observations of the interstellar hydrogen line of wave length 21 cm made at Kootwijk, Netherlands*, The Astronomical Journal, vol. 56, pp. 144–144, 1951

[19] Kalberla, P. M. W. and Kerp, J., *The Hi Distribution of the Milky Way*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 47, no. 1, pp. 27–61, 2009

[20] Minniti, D., *The Formation of the Milky Way*, in VI Reunion Anual Sociedad Chilena de Astronomia (SOCHIAS), 2007, p. 35

[21] Orfanidis, S. J., *Electromagnetic Waves and Antennas*, Rutgers University, 2016

[22] Kanekar, N. and Briggs, F. H., *21-cm absorption studies with the Square Kilometer Array*, New Astronomy Reviews, vol. 48, no. 11–12, pp. 1259–1270, 2004

[23] Briggs, F. H., *Neutral Hydrogen in the Universe*, in The New Cosmology, 2005, pp. 147–164

[24] Hinterleitner, F., *Skriptum: Elektrodynamika a teorie relativity*, Masarykova Univerzita, Přírodovědecká fakulta, Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

[25] Tysl, V., Růžička, V., *Teoretické základy mikrovlnné techniky*, SNTL, 1989

[26] Hellwig, H., Vessot, R. F. C., Levine, M. W., Zitzewitz, P. W., Allan, D. W., and Glaze, D. J., *Measurement of the Unperturbed Hydrogen Hyperfine Transition Frequency*, IEEE Transactions on Instrumentation Measurement, vol. 19, no. 4, pp. 200–209, 1970

[27] Hiebel, M., *Fundamentals of Vector Network Analysis*, Rohde&Schwarz, 2008

[28] Penzias, A. A. and Wilson, R. W., *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.*, The Astrophysical Journal, vol. 142, pp. 419–421, 1965

[29] Mazánek, M.,Pechač P., *Šíření elektromagnetických vln a antény* Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004

[30] Oswalt, T. D. and Gilmore, G., *Planets, Stars and Stellar Systems: Volume 5: Galactic Structure and Stellar Populations*, 2013

[31] Ewen, H. I. and Purcell, E. M., *Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: Radiation from Galactic Hydrogen at 1,420 Mc./sec*, Nature, vol. 168, no. 4270, p. 356, 1951

[32] Burke, B. F., Graham, and Wilkinson, P. N., *An introduction to radio astronomy*, 4th edition, 2019

[33] Damanik, Sa., Utomo, D., Hidayat, T., *Observations of Milky Way at 21 cm Wavelength at the Bosscha Observatory*, 29-31, 2010

[34] Bell, S. J. and Hewish, A., *Angular Size and Flux Density of the Small Source in the Crab Nebula at 81.5 Mc/s*, Nature, vol. 213, no. 5082, pp. 1214–1216, 1967

[35] Kvasil, B., *Theoretické základy techniky centimetrových vln*, SNTL, 1957

[36] Gugliuzza, F., Bruno, A., Ardizzone, E., Pirrone, *An Effective Satellite Remote Sensing Tool Combining Hardware and Software Solutions. Communications in Computer and Information Science*, 2019, 1074. 151-175

[37] Raida, Z., Hanus S., *Vysokofrekvenční technika a antény*, FEKT VUT Brno, 2002

[38] Lang, K. R., *Essential Astrophysics*, 2013

[39] Marr, J., M., Snell, R., L., Kurtz, S., E., *Fundamentals of Radio Astronomy: Observation methods*, 2015

[40] Wilson, T. L., Rohlfs, K., and Hüttemeister, S., *Tools of Radio Astronomy*, 2013

[41] https://www.spaceacademy.net.au/spacelab/projects/hlineobs/hlineobs.htm

[42] Diermaier, M., Jepsen, C., Kolbinger, B. et al., *In-beam measurement of the hydrogen hyperfine splitting and prospects for antihydrogen spectroscopy*, Nat Commun 8, 15749, 2017

[43] https://www.aldebaran.cz/tabulky/tb_spektrum.php

[44] http://ok1ike.c-a-v.com/soubory/pulka.htm

[45] https://www.researchgate.net/figure/The-Milky-Way-observed-at-radio-infrared-and-optical_fig1_280773587 [accessed 11 May, 2023],

[46] http://www.rc-eagleeye.cz/rc-eagleeye/5-Theory-Trocha-teorie/22-Zisk-a-smerova-charakteristika

[47] Guerrero C., Agapito J., *Antennas of Circular Waveguides*, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 10, No. 8, 2019

[48] https://www.rtl-sdr.com/

[49] https://www.rtl-sdr.com/cheap-and-easy-hydrogen-line-radio-astronomy-with-a-rtl-sdr-wifi-parabolic-grid-dish-lna-and-sdrsharp/

[50] https://www.ok2kkw.com/hb9cv/hb9cv_1969.htm

[51] Moazzenzadeh, M. and Firouzjaee, J. T., *Searching for the hydrogen 21 cm line in cosmos*, arXiv e-prints, 2021

[52] https://eu.mouser.com/datasheet/2/412/pf5189z_data_sheet-1500580.pdf

[53] https://eu.mouser.com/datasheet/2/1030/ZX60-P162LN_2b-1701706.pdf

[54] https://www.antenna-theory.com/antennas/reflectors/dish.php

[55] Shaw, A. K., *Probing early Universe through redshifted 21-cm signal: Modeling and observational challenges*, ¡i¿Journal of Astrophysics and Astronomy¡/i¿, vol. 44, no. 1, 2023

[56] https://www.spaceacademy.net.au/env/spwx/raiono.htm

[57] BniLam, N., Joosens, D., Steckel, J., Weyn, M., *Low Cost AoA Unit for IoT Applications*, 2019

[58] Woodgate, G., K., *Elementary Atomic Structure*, Oxford University Press, 1999

[59] R. Noe, *Consistent Optical and Electrical Noise Figure*, in Journal of Lightwave Technology, 2022

[60] https://www.changpuak.ch/electronics/HB9CV.php

[61] https://www.rtl-sdr.com/observing-21cm-hydrogen-line-linrad-rtl-sdr/

[62] http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/Razno/Diplome/Radioteleskop/clanek/radioteleskop.pdf

[63] http://parac.eu/projectmk3.htm

[64] Vallée, J. P., *A guided map to the spiral arms in the galactic disk of the Milky Way*, The Astronomical Review, vol. 13, no. 3–4, pp. 113–146, 2017

[65] https://physicsopenlab.org/2020/09/08/milky-way-structure-detected-with-the-21-cm-neutral-hydrogen-emission/