

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Tadeja Saje

Radioteleskop za vodikovo črto 21 cm

MAGISTRSKO DELO
ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE
ELEKTROTEHNIKA

MENTOR: prof. dr. Matjaž Vidmar

Ajdovščina, 2016

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Matjažu Vidmarju za potrpežljivost, strokovne nasvete in pomoč pri izdelavi magistrskega dela. S svojim izjemnim in neprecenljivim znanjem mi je omogočil izpolnitev dolgoletne želje: razumevanje in postavitve lastnega radioteleskopa.

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod v radioastronomijo	1
1.1	Kratka zgodovina radioastronomije	5
1.2	Vrste sodobnih radioteleskopov	7
1.3	Sevanje vodikove črte	11
2	Načrtovanje radioteleskopa za vodikovo črto	13
2.1	Žarilec	16
2.2	Rezonatorsko sito za 21 cm	18
2.3	Nizkošumni ojačevalnik(LNA)	20
3	Umerjanje teleskopa	25
3.1	Umerjanje krmilnih motorjev antene	25
3.2	Meritve žarilca	25
3.3	Meritve LNA	29
3.4	Merjenje votlinskih pasovnih sit	32
3.5	Meritev šumne temperature sistema	33
3.6	Meritev izkoristka osvetlitve antene	35
4	Opazovanje Vodikove črte	37
4.1	Izpeljava stolpične gostote	43

Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
LNA	low noise amplifier	nizkošumni ojačevalnik
f	frequency	frekvenca
BPF	band pass filter	pasovno prepustno frekvenčno sito
LPF	low pass filter	nizko pasovno prepustno frekvenčno sito
ISM	interstellar medium	medzvezdni medij
N	noise spectral density	spetralna gostota šuma
F	noise temperature	šumno število
D	directivity	smernost
B	bandwidth	pasovna širina
A	area	površina
λ	wave length	valovna dolžina

Povzetek

Naslov: Radioteleskop za vodikovo črto 21 cm

Radio teleskop je naprava za merjenje moči signalov, ki jih oddajo nebesni izvori sevanja v področju radijski valov. Signali, ki jih opazujemo z radioteleskopom so šibki, zato je pomembno razmerje signal/šum. Radio teleskop sestavlja zrcalo, žarilec, LNA, pasovno sito ter naprava za analizo prejetih podatkov (SDR ključek, spektralni analizator). Dobro načrtovan žarilec omogoča, da ni zrcalo preveč ali premalo osvetljeno in da je čim manj sevanja preko roba. Nizkošumni ojačevalnik nam ojača **šibki** koristen signal brez bistvenega poslabšanja razmerja signal/šum. S pasovnim sitom izsejemo koristen signal, ki ga nato s RTL-SDR ključkom ali spektralnim analizatorjem obdelamo.

Ključne besede: radioteleskop, LNA, pasovno prepustno frekvenčno sito, vodikove črte, radijska astronomija, žarilec.

Abstract

Title: Radiotelescope for the 21 cm Hydrogen Spectral Line

This sample document presents an approach to typesetting your BSc thesis using \LaTeX . A proper abstract should contain around 100 words which makes this one way too short. A good abstract contains: (1) a short description of the tackled problem, (2) a short description of your approach to solving the problem, and (3) (the most successful) result or contribution in your thesis.

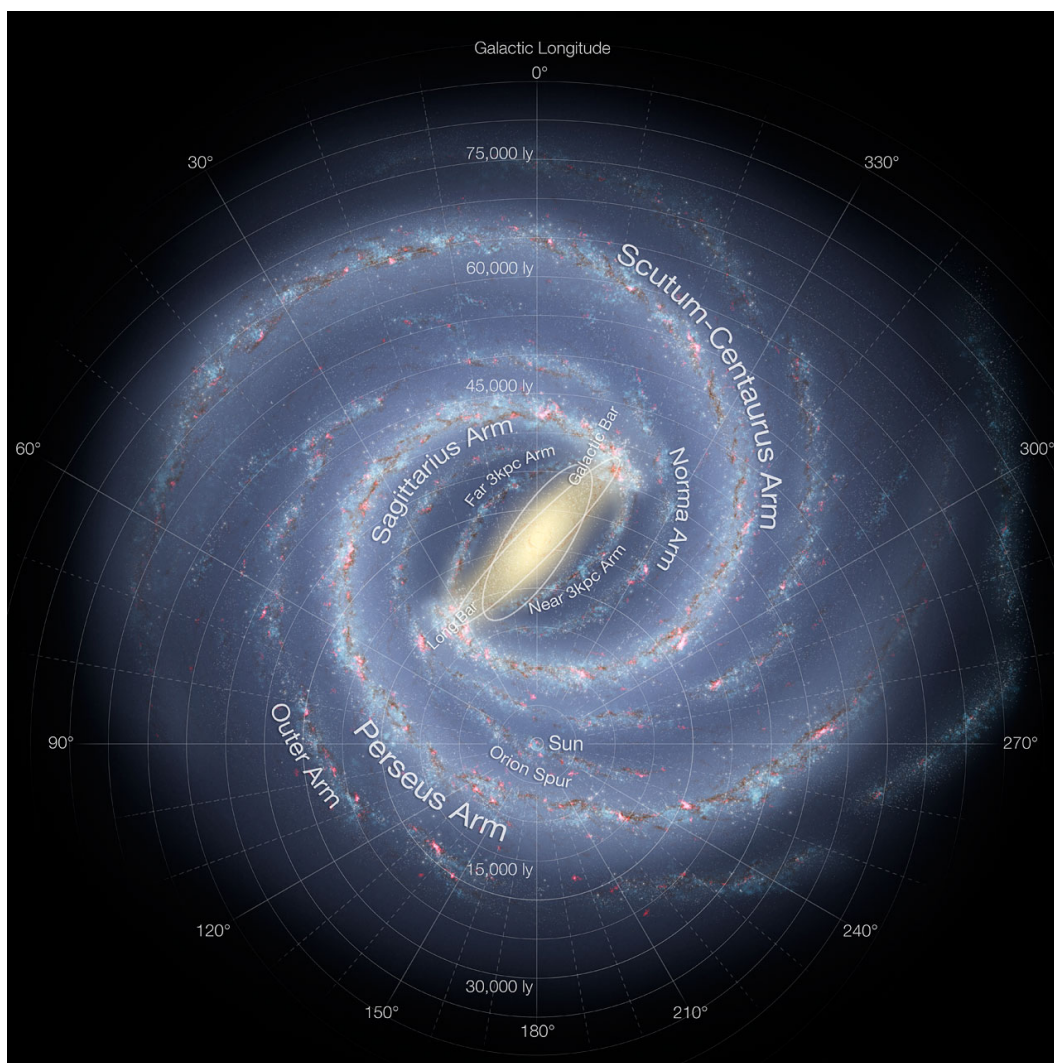
Keywords: radiotelescope, LNA, band-pass filter, hydrogen line, radioastronomy, feed horn.

Poglavje 1

Uvod v radioastronomijo

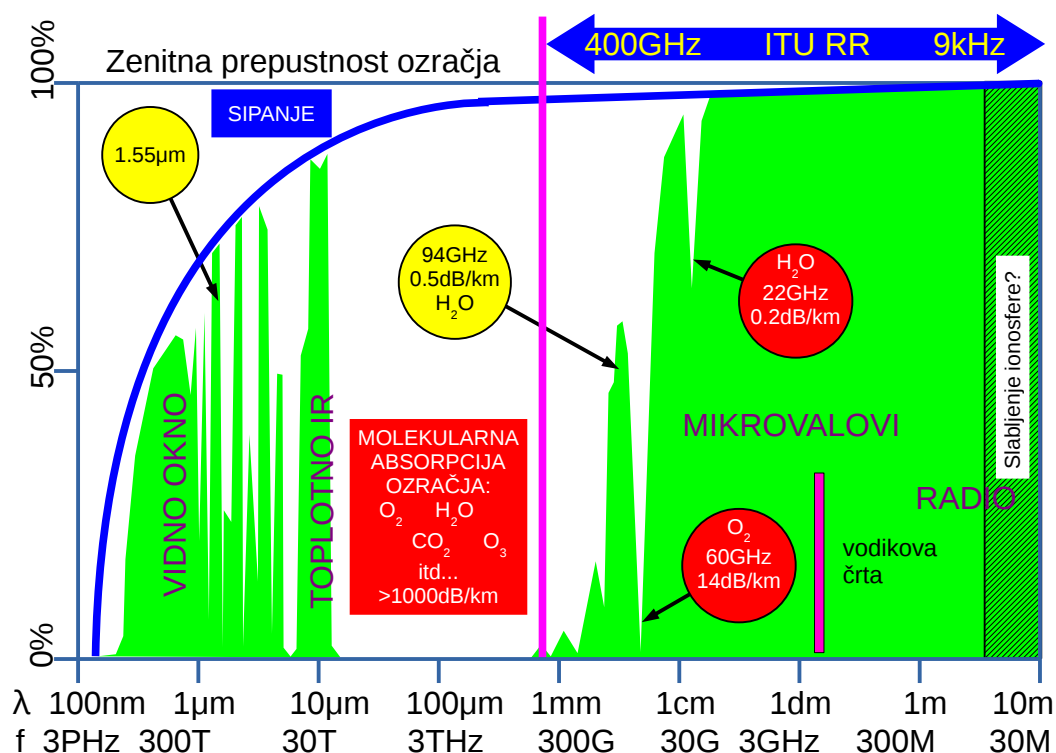
Astronomija je znanost, ki preučuje nebesna telesa. Nebesna telesa se nahajajo na različnih razdaljah v vesolju. Razdalje v vesolju merimo v svetlobnih letih ali parsekih. Svetlobno leto predstavlja dolžino, ki jo svetloba naredi v enem julijanskem letu, v prostoru brez ovir neskončno daleč od gravitacijskih in magnetnih polj. Svetlobno leto je ena približno $9.46 \cdot 10^{15}$ m. Parsek je tako določen kot razdalja med Zemljo in zvezdo, katere paralaksa je enaka 1 ločni sekundi. Parsek je enak $3.08 \cdot 10^{16}$ m oziroma 3.26 svetlobnih let.

Nam najbližja znan zvezda je Proxima Centauri, ki je oddaljena 4.22 svetlobnih let. Naša Galaksija je široka približno 100.000 svetlobnih let. Andromedina galaksija je **premera** 2.360.000 svetlobnih let. Najbolj oddaljene galaksije so oddaljene $13 \cdot 10^9$ svetlobnih let. Naša Galaksija je prikazana na sliki 1.1.[1] [2] [3] [oddaljena](#)



Slika 1.1: NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt: Spiralna struktura Galaksije Rimska cesta

Nebesni izvori sevajo na različnih frekvencah od radijskih valov do gama žarkov. Zaradi različne prepustnosti ozračja za različne frekvence lahko z Zemlje opazujemo nebesne vire le v določenih spektrih. Določene nebesne vire je možno opazovati le s satelitov, ki so nameščeni izven Zemljinega ozračja. Prepustnost Zemljinega ozračja za določene valovne dolžine je prikazana na sliki 1.2.



Slika 1.2: Slabljenje zemljskega ozračja

Na Zemlji postavljamo optične in radijske teleskope. Podatki o teleskopu, ki nas zanimajo, so ločljivost in občuljivost. Ločljivost pomeni, katero podrobnost še lahko vidimo. Občuljivost pove, kakšno najmanjšo moč signala je teleskop možen razpoznati. Ločljivost teleskopa je odvisna od valovne dolžine in površine antene: $\alpha = \sqrt{\frac{4\lambda^2}{\pi A}}$. Občuljivost je odvisna od površine antene, časa opazovanja, pasovne širine našega sprejemnika. Z FFT si lahko privoščimo daljši čas opazovanja, torej lahko povprečimo oz integriramo daljši čas in tako lahko opazujemo šibkejšne nebesne izvore z istimi lastnostmi teleskopa.

stavek ni na mestu

pasu B

Signal opazujemo v frekvenčnem prostoru daljši čas in ga povprečimo. To nam omogoča, da z istimi lastnostmi radioteleskopa opazujemo šibkejšne ne-

preveriti enacbo

besne izvore.

$$(S/B)\left[\frac{W}{m^2Hz}\right] \text{ podatek sevanja nebesnega izvora}$$

$$1Jy = 10^{-26} \frac{W}{m^2Hz}$$

$$\Delta P = (S/B)AB\frac{1}{2} \text{ moč nebesnega izvora,} \quad (1.1)$$

ki jo sprejme antena

$P = Bk_B T_{sistema}$ moč celotnega šuma

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\frac{1}{2} \frac{S}{B} A}{k_b T_{sistema}} \quad (1.2)$$

Temperaturi, ki je enaka celotni moči šuma vseh virov, ki ga dobimo na vhodu sprejemnika, imenujemo šumna temperatura sistema $T_{sistema}$. [15]

$$T_{sistema} = T_{cmb} + \Delta T_{izvora} + T_{atm} + T_{sevanjaprekoroba} + T_{sprejemnika}$$

$$T_{cmb} \approx 2.7K \equiv \text{temperatura sevanja ozadja svanja nebesnega ozadja}$$

$$\Delta T_{izvora} \equiv \text{temperatura nebesnega izvora, ki ga opazujemo}$$

$$T_{atm} \equiv \text{temperatura sevanja atmosfere ozracja}$$

$$T_{sevanjaprekoroba} \equiv \text{temperatura sevanja preko roba} \quad (1.3)$$

Signal, ki ga merimo, je naključen signal. Odstopanje meritve povprečne vrednosti je obratna sorazmerna z številom meritev.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (1.4)$$

Kako šibek signal lahko zaznamo je odvisno od pasovne širine našega sprejemnika in od časa integracije (povprečenja) oziroma časa opazovanja.

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{\sqrt{B\tau}} = \frac{\Delta P}{P} \quad (1.5)$$

Razlike, ki določajo optično in radijsko valovanje so naslednje:

Razlike med optičnim in radijskim valovanjem so naslednje:

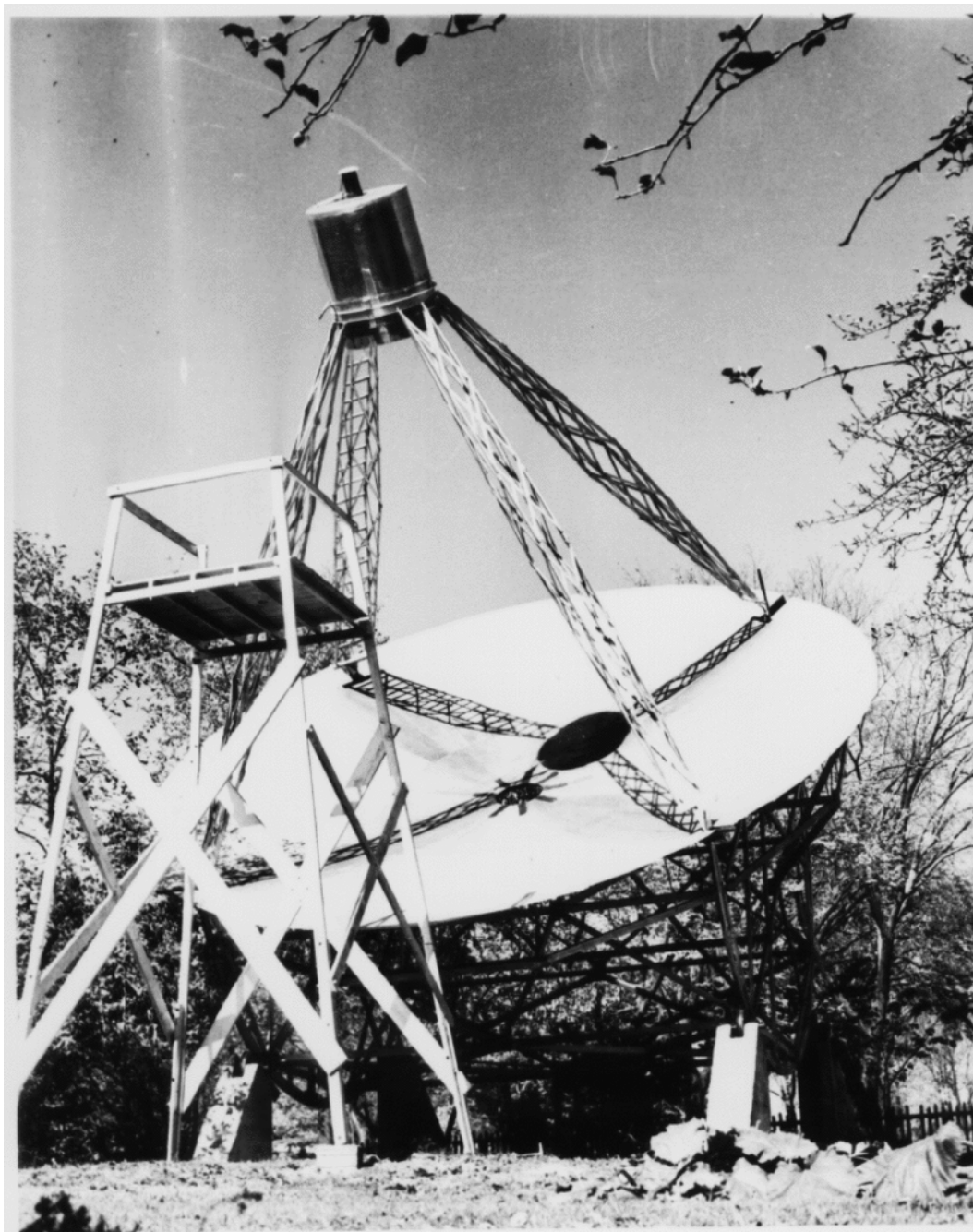
- v vesolju imamo ovire, ki dušijo določena elektromagnetna valovanja, na primer medzvezdni prah duši vidno svetlobo, ne duši radijskih valov

- mehanizmi sevanja nebesnih virov in lastnosti spektrov so zelo različne, imamo:
 - širokopasovne toplotne vire
 - širokopasovne vire, ki ne sevajo toplotno
 - ozkopasovne vire, ki lahko sevajo spontano oziroma stimulirano, na primer vodikova črta 21cm je spontano sevanje, OH maserska črta 19cm je stimulirano sevanje

Ozkopasovni viri omogočajo povsem drugačna opazovanja od širokopasovnih virov. Ozkopasovni viri omogočajo določanje hitrosti iz Dopplerjevega premika, kar s širokopasovnimi viri ni možno.

1.1 Kratka zgodovina radioastronomije

1932 Karl Jansky odkrije sevanje iz vesolja v področju radijskih kratkih valov
1939-1943 Grote Reber izdelava prvi radijski zemljevid neba na 160 in 480 MHz



Slika 1.3: radioteleskop: Grote Reber Wheaton, Illinois, 1937[16]

1945 van der Hulst teoretsko napove ozkopasovno sevanje atomarnega vo-

dika na 1.42GHz

1951 prvo opazovanje sevanja vodikove črte 21cm, posledica opazovanj je odkritje spiralne oblike naše galaksije rimske ceste

1963 prvo opazovanje OH maserske črte 19cm, številne druge črte sledijo, odkritja različnih elementov in molekul v vesolju

1990 z razvojem satelitske televizije postanejo dostopni antene, polprevodniki za LNA, sprejemniki amaterskim radioastronomom

1.2 Vrste sodobnih radioteleskopov

Poznamo različne vrste radioteleskopov:

- ena samo velika antena
- skupine anten
- interfeometri

Pri sprejemanju šuma z radioteleskopom, ki ga oddaja nebesni vir, naletimo na naslednje vprašanja:

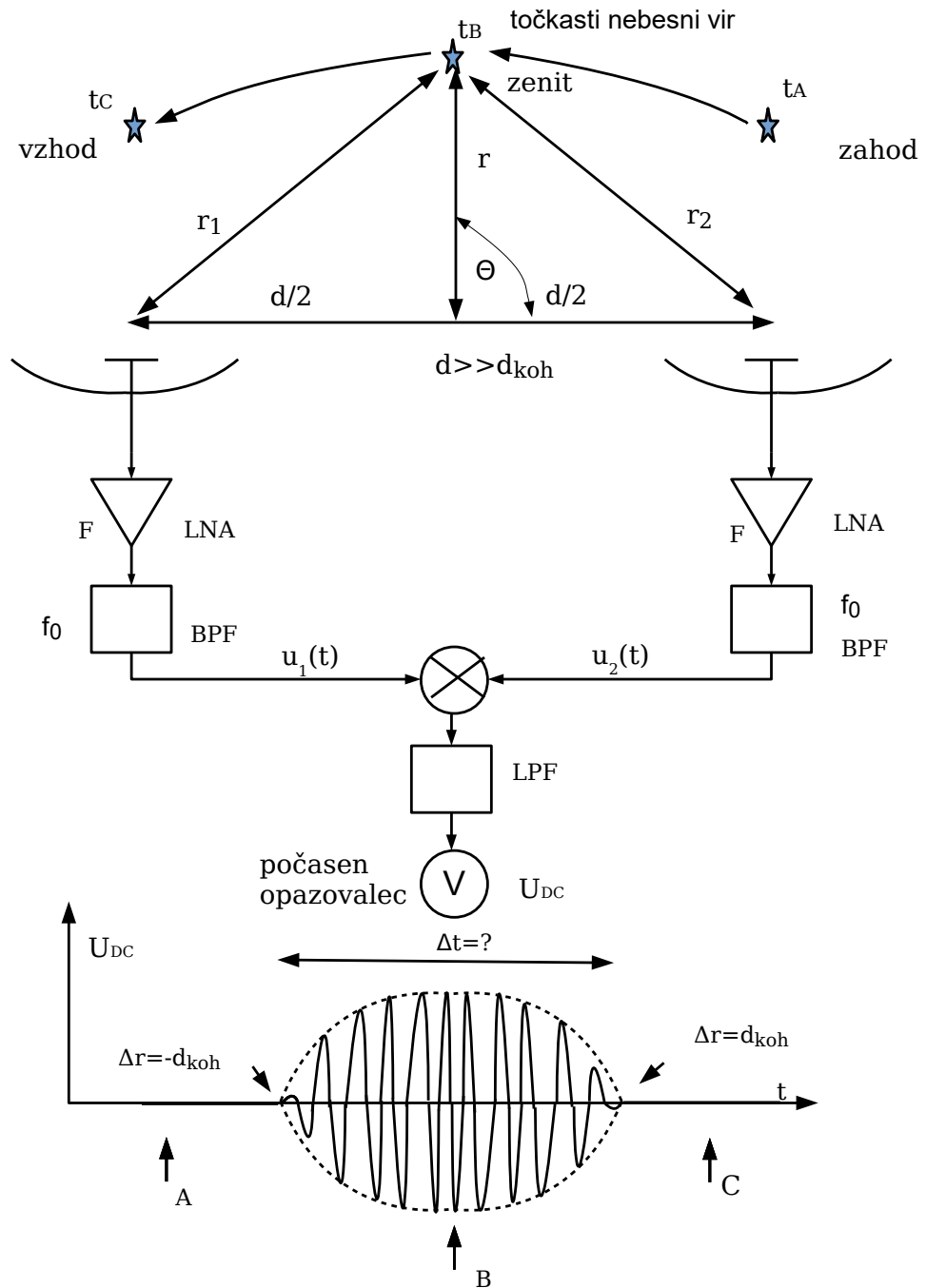
- ne vem, kje je nebesni vir . Omejuje nas efektivna površina antena, oziroma prostorski kot, kar vidi antena
- razmerje signal/motnja je **nizka**, ker je koristen signal zvezde skrit v šumu

Glede na različne zahteve in možnosti izberemo radioteleskop, ki ga zgradimo. Ena sama velika antena ima veliko ločljivost in zbere veliko signala. Podobno zmora skupina anten, ki je na sliki 1.4.



Slika 1.4: Skupina anten ALMA[17]

Z interferometrom lahko določimo točen položaj nebesnega vira. Interferometer prikazuje slika 1.5



Slika 1.5: Širokopasovni interferometer

Za interferometer potrebujemo najmanj dva radioteleskopa. Ločljivost določimo in izpeljemo na naslednji način:

$$\begin{aligned}
 d_{koh} &= \frac{c_0}{B} \quad \textit{koherenčna dolžina} \\
 r_1 - r_2 &= \Delta r(t, d) \quad \textit{časovna spremenljiva razlika faze} \\
 r_1 &\approx r + \frac{d}{2} \cos \theta \\
 r_2 &\approx r - \frac{d}{2} \cos \theta \\
 \theta &\approx \frac{\pi}{2} \\
 \theta &= \frac{\pi}{2} + \alpha \\
 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) &= \sin \alpha \\
 \Delta r &= d \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \approx d\alpha \\
 \textit{točnost} \quad |\Delta r| &< d_{koh} = \frac{c_0}{B} \\
 |\Delta r| &< \frac{c_0}{B} \\
 |d\alpha| &< \frac{c_0}{B} \\
 |\alpha| &< \frac{c_0}{dB} \quad \textit{točnost meritve položaja zvezde v radianih}
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

Ko je vzdolžna koherenčna dolžina večja od razdalje med antenama, to omenjemo ozkopasovni interferometer.

Bolj primerna je izdelava širokopasovnega interferometra, kjere je $d \gg d_{koh}$. Ko je dolžina med antena večja od koherenčne dolzine, tak interferometer imenujemo **široko pasovni** interferometer. [z veliko osnovnico \(large-baseline interferometer\)](#)

$$\begin{aligned}
 B &= 2MHz \quad d = 30km \\
 |\alpha| &= \frac{c_0}{dB} = 0.0016 \quad \textit{radianov}
 \end{aligned}$$

Razdalja do naše zvezde se zaradi vrtenja Zemlja spreminja, zato se tudi časovno spreminja razlika faze signala zvezde, ki ga sprejemata anteni. Medtem, ko pri recimo motilcu anteni sprejemata konstatno razliko faze signala.

Za natančen položaj zvezde potrebujemo tri antene. Razdalja med njimi mora biti veliko večja od vzdolžne kolerenčne dolžine. Točnost meritve nebesnega vira se povečuje z razdalja med antenami in pasovno širino. Interferometer z veliko osnovnico se imenujejo VLBI. Sestavljajo ga radioteleskopi, ki se nahajajo celem svetu.

1.3 Sevanje vodikove črte

Medzvezdni medij (ISM) prežema celotni galaktični sistem: nevtralni medzvezdni plin je praktično prisoten vsepovsod. Struktura tega medija je različna. Na eni strani obstajajo velika področja z zelo nizko gostoto plina, na drugi strani pa obstajajo velika področja z veliko gostoto plina. Medzvezdni medij se neprestano giblje. Notranje gibanja se prekrivajo z gibanje galaksij. Stanje medija se razlikuje od področja do področja, saj je temperatura odvisna od lokalne vhodne energije in hlajenja. Obstajajo področja kjer se nahajajo veliko prahu in različnih molekul ter hladnejši kraji, kjer so nahajajo samo posamezni atomi. Nevtralni vodikovi atomi so prisotni v področjih, kjer je gostota medzvezdnega medija nizka. Zaznati ga je mogoče na valovni dolžini 21cm.

vodikov atom preskoci v nizje

Dva energetska nivoja sta posledica interakcije med spinom elektronom in spinom protona. Ko se vzpostavi nižje energetska stanje, se izseva proton na valovni dolžini 21 cm. V laboratoriju smo izmerili 1.420405751786GHz. Verjetnost da se zgodi spontani prehod je izredno majhna $A_{10} = 2.8688 \cdot 10^{-15}$ oziroma se to zgodi 11.1 milijonov let za povprečen vodikov atom. Moč sevanja posameznega atoma je 5.87433 eV. Dejstvo, da je teh atomov veliko vzdolž linije pogleda pomeni, da izredno lahko vodikove črte izmerimo. Hulst je leta 1944 napovedal, da lahko vodikove črte izmerimo. Leta 1951 je več različnih skupin to tudi izmerilo. Gostoto atomarnega vodika na cm^2 lahko izračunamo iz meritev. Gostoto lahko izračunamo Kaj je T(f)?

$$N = 1.823 \cdot 10^{18} \int_0^\infty \frac{T(f)}{K} \frac{df}{km s^{-1}} atomov cm^{-2} \quad (1.7)$$

Viri navajo, da je gostota atomarnega vodikova od 0.25 do 25 atomov na cm^3 . [11] Širina spektra je manj kot 1MHz Če je radialna hitrost oblaka, kje

se nahaja nevtralni vodik veliko manjša od svetlobne, jo lahko izračunamo na naslednji način(Doplerjev pomik):

$$v_r = c\left(1 - \frac{f}{f_0}\right) \quad (1.8)$$

kjer je $f_0 = 1.4204GHz$.[5] Če je hitrost negativna, se nam vir približuje, če je pozitivna se oddaljuje.

Danes ocenjujejo, da je gostota vesolja brez temne snovi približno en vodikov atom na kubični meter praznega prostora. To pomeni, da je le 12 % vse snovi opazljive. Dodatnih 15 % prispevajo fotoni kozmičnega prasevanja, še 10 % mase pa je v obliki nevtrinov. Temna snov tako predstavlja 63% vse mase v Vesolju.[18]

Najmočnejši zvezni viri sevanja vodikove črte imajo gostoto pretok moči okoli 2000 **Jy**. Na Zemlji lahko pričakujemo signale, ki so za 20dB šibkejši kot je občutljivost GSM telefona, za manjšo anteno($D \equiv 3m$) s pasovno širino **2MHz**($-120dBm$ oz. $10^{-15}W$).

[Merska enota Jy ni nikjer opisano, kaj pomeni.](#)

[Pasovna širina GSM telefona in obicajne vodikove crte je okoli 200kHz](#)

Poglavje 2

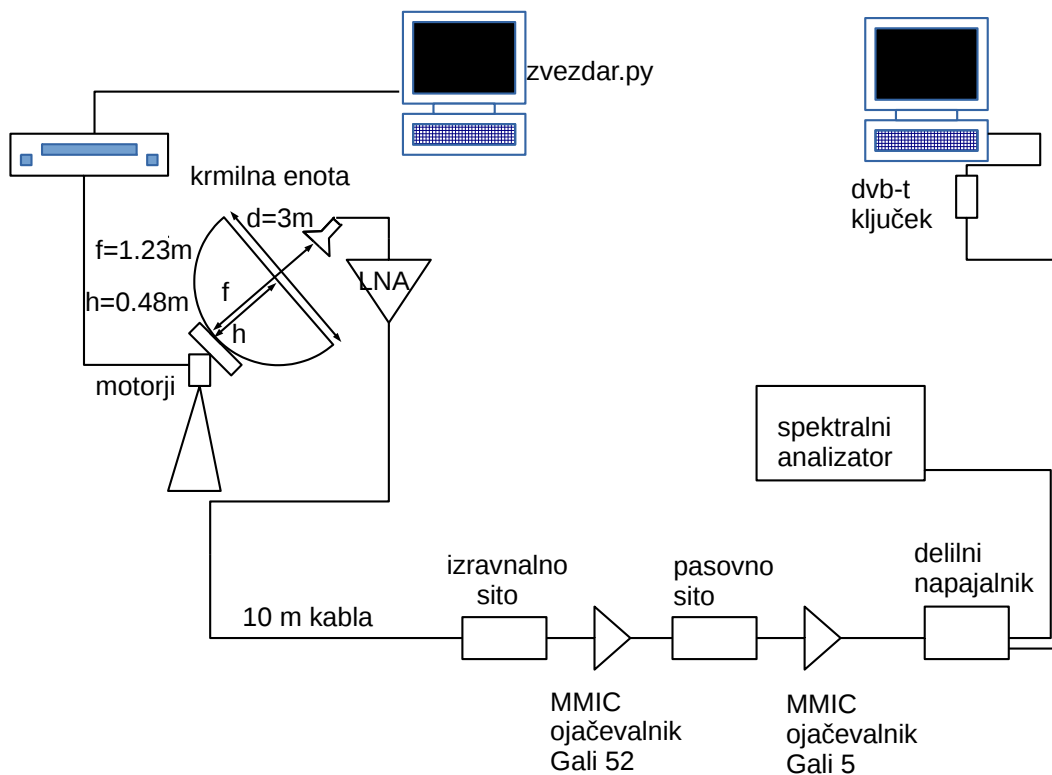
Načrtovanje radioteleskopa za vodikovo črto

V naši nalogi želimo opazovati nebesne izvore radijskega sevanja, ki pomeni šum, vendar pa je za nas koristen signal. Poleg tega določa smerni diagram kaj vidi naša antena. Naša antena vidi tudi okolico, kjer večina predmetov na Zemlji seva s temperaturo okoli 300K. Poleg koristnega signala imamo tudi šum, ki ga dodaja sprejemnik.

Pri meritvi izvora vodikove črte naletimo na zvezne vire, kjer je vir širši od tega, kar vidi naša antena. V tem primeru je **kvaliteta** meritve neodvisna od **sistema**. Boljša antena nam v tem primeru pomeni le boljšo ločljivost. Položaj zveznega vira lahko ocenimo s tem, v katero smer gleda naša antena. Natačnost ocene točnosti smeri določa širina našega smernega diagrama antene.

Najmanjša uporabna antena bi bila parabolično zrcalo s premerom 1m. Pogoji meritve narekujejo radioteleskop z eno samo veliko anteno.

Naš radioteleskop sestavljajo zbiralno zrcalo, motorji za azimut in elevacijo, krmilna enota za motorje z računalnikom, žarilec, LNA, pasovna sita in dodatni ojačevalniki. Signal lahko obdelamo s spektralnim analizator ali DVBT ključkom in z ustrezno programsko opremo na PC računalniku. Slika 2.1 prikazuje blokovni načrt radioteleskopa.



Slika 2.1: Blokovni načrt radioteleskopa

Naše parabolično zrcalo ima naslednje značilnosti:

$$\begin{aligned}
 d &= 309\text{cm} \\
 h &= 48.5\text{cm} \\
 f &= \frac{d^2}{16h} = 123\text{cm} \quad \frac{f}{d} = \frac{123\text{cm}}{309\text{cm}} = 0.398
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Slika 2.2 prikazuje naše parabolično zrcalo, rotator in žarilec .



Slika 2.2: Parabolično zrcalo

Rotator ima možnost sledenja 360 stopinj po azimutu in 90 stopinj po elevaciji. Točnost ponovljivosti položaja je približno 0.5 stopinje. Rotator vrti anteno približno 4 **stopinja** na sekundo po azimutu oziroma 2 stopinji elevaciji.

Krmilna enota krmili rotator. Krmilna enota ima funkcija ORG, ki vrne anteno v izhodični položaj antene. Izhodična lega je azimut 90 stopinj in elevacija 0 stopinj. Krmilna enota ima tudi funkcijo OFFSET, kjer nastavimo, koliko ima naša antena odklik azimuta 90 stopinj, ko sprožimo funkcijo ORG. **Položaj nebesnega izvora je naveden v ekvatorskem koordinatnem sistemu. Sestavljata ga rektascenzija in deklinacija.**

Tukaj manjka opis težav z nelinearno elevacijo rotatorja.

Uporabljamo najmanj tri različne nabore koordinat:
galaktična dolžina in širina,
rektascenzija in deklinacija,
azimut in elevacija za opazovalca na določenem mestu.
Opis različnih koordinatnih sistemov ne bi bil odveč.

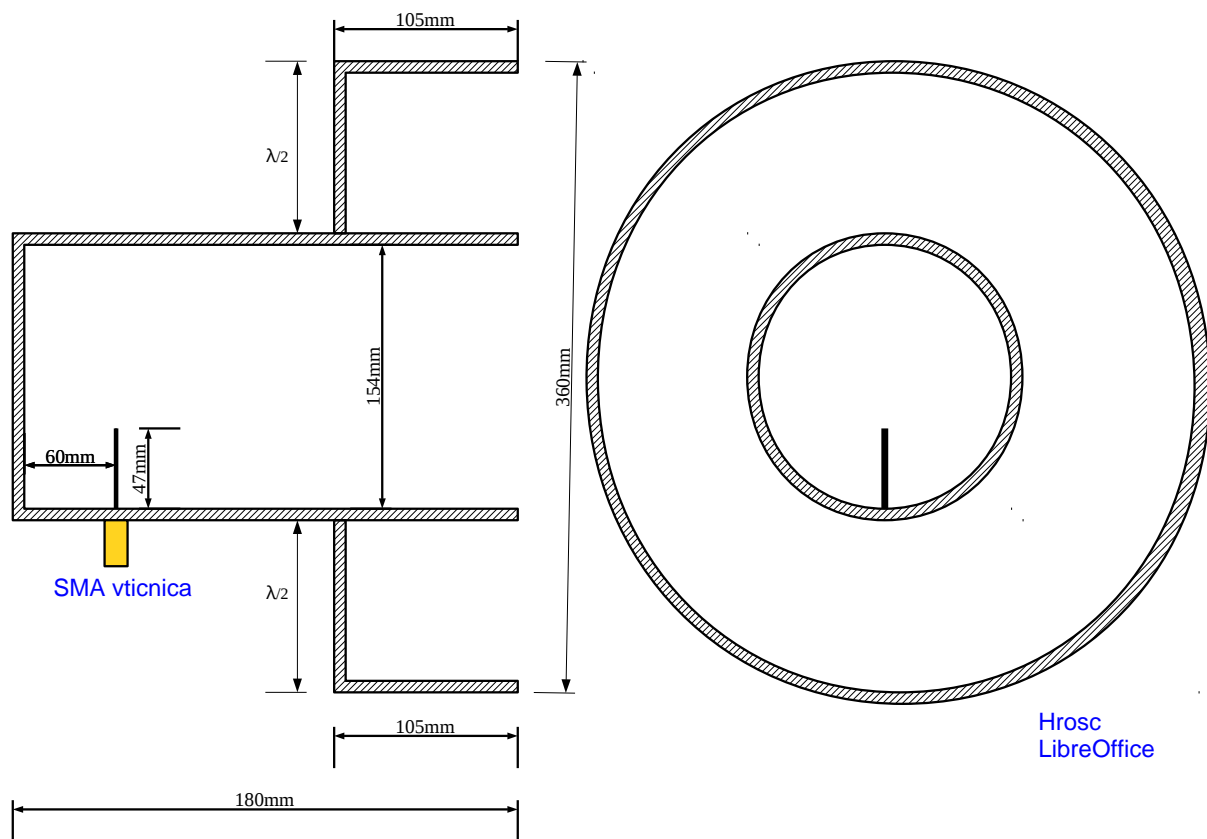
2.1 Žarilec

Žarilec je mala antena, ki osvetljuje parabolično zrcalo.
V ta namen smo uporabili valovodni lijak z ovratnikom VE4MA.

Žarilec je majhen valovod, ki se uporablja za prenos radijskih valov med oddajnikom ali sprejemnikom in paraboličnim zrcalom. Ko sprejemamo signal, je žarilec priključen na oddajnik in pretvarja izmenični tok radijske frekvence v radijske valove. Pri sprejemanju signala se valovanje, ki ga je zbralo zrcalo odbije v žarilec, ki je povezan s sprejemnikom, in pretvori valovanje v izmenični tok.[9]

Žarilec načrtujemo tako, da čimbolj enakomerno osvetli zrcalo, da je impedančno prilagojen oziroma, da se čim manj valovanja odbije. Pri nas je impedančna prilagoditev še posebej pomembna, saj je žarilec povezan z LNA, ki ni brezpogojno stabilen in lahko zaradi impedančne neprilagojenosti naraste šumna temperatura našega sistema. Žarilec naj bo izdelan tako, da senca žarilca ni prevelika.

Žarilec smo izdelali po zgledu VE4MA.[12]. Načrt žarilca je prikazan sliki 2.3



Slika 2.3: Načrt žarilca za 21 cm

prehodu skozi naelektrene delce v magnetnem polju

Sevanje vodikove crte je vecinoma nepolarizirano.

Kakšno polarizacijo žarilca potrebujemo je odvisno, kakšen vir opazujemo. Polarizirano valovanje lahko nastane pri sipanju ali pri različnih sevalnih procesih. Sevanje vodikove črte je na Zemlji lahko različno polarizirano: krožno ali linearno; odvisno skozi kaj je signal potoval. [20] Sevanje atomarnega vodika je spontano, zato je polarizacija naključna. Polarizacija se pojavi, če signal potuje skozi oblak nesimetričnih delcev ali skozi območje z magnetnim poljem. Univerzalne antene, ki bi znala sprejemati poljubno polarizacija, ne obstaja, saj vedno lahko najdemo nanjo pravokotno. [19] Naša polarizacija žarilca je pokončno linearna.

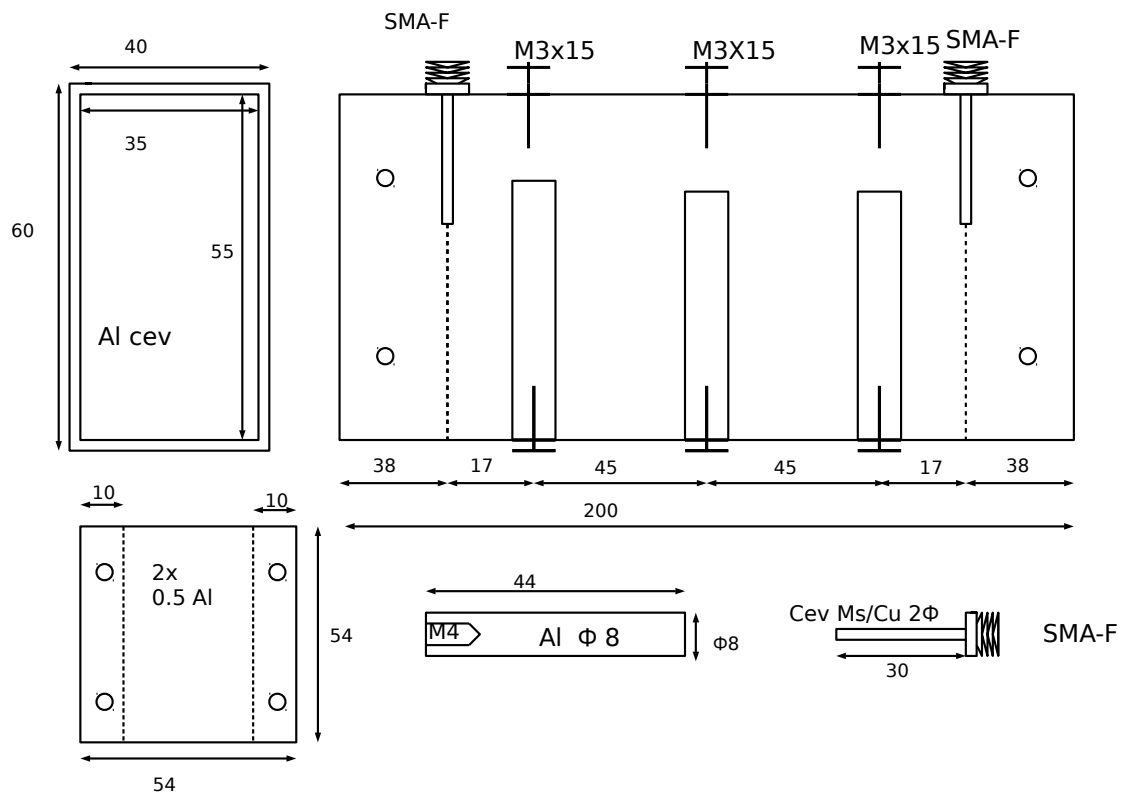
2.2 Rezonatorsko sito za 21 cm

Ozkopasovno sito lahko izdelamo na več načinov:

- frekvenčno sito, ki ga gradimo iz koncentriranih oziroma porazdeljenih reaktivnih gradnikov

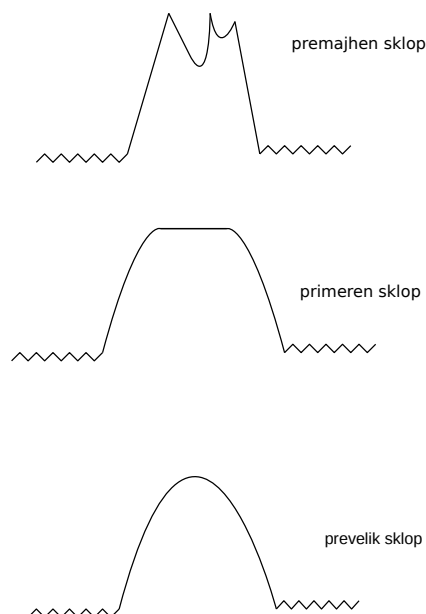
- rezonatorsko sito oz. votlinski rezonator

Rezonatorsko sita imajo ponavadi zelo lepe električne lastnosti: majhno vstavitveno slabljenje, strme boke in visoko slabljenje neželenih signalov. Lepe lastnosti moramo plačati z velikimi izmerami ter obilico zahtevnega mehanskega dela (struženje, rezkanje). [6] Na sliki 3.7 je prikazano rezonatorsko sito za 21 cm, pasovno širine 20 MHz in slabljenja 0.3dB. Osrednja frekvenca našega sita je 1420 MHz.



Slika 2.4: Načrt pasovnega sita za 21cm

Sito sestavljajo trije rezonatorji, to so tri alumijaste palčke premera 8mm. Dolžina palčk 44 mm. Pri izbiri dolžine palčk so upoštevali, da čim krajše so palčke, manjša je induktivnost in kapacitivnost, tem večja je rezonančna frekvenca. Vhodni in izhodni sklop sta izvedena s pomočjo paličastih antenic, ki imata na koncu SMA vtičnic. Z dolžino antenic nastavimo elektromagnetni sklop in prilagodimo impedanco. Primeri premajhnega in prevelikega sklopa so predstavljeni na sliki 2.5



Slika 2.5: Odziv sita in vhodni/izhodni sklop

Pravilen sklop omogoča raven prepustni pas željene širine, ki ga dobimo z uglasenjem vseh treh rezonatorjev. Rezonarje uglasujemo s pomočjo treh vijakov. Z spreminjanjem vijakov spreminjamo kapacitivnost, saj vijaki pomenijo kondenzator na koncu rezonatorja. Vsi notranji deli sita morajo biti čim čisti in gladki, da nam ne pokvarijo rezonančne frekvence. kvalitete rezonatorjev

Kvaliteta električnega rezonatorja je okoli 3000.[6] Izmerjeno slabljenje sita je zelo majhno 0.3dB. Pasovna širina našega sita je okoli 20MHz, če bo želeli ožje, bomo morali imeti daljšo cev. Izmerjeni odziv sita je prikazan na sbkejsi sklop, torej izbrati večjo razdaljo med rezonatorji v cevi

2.3 Nizkošumni ojačevalnik(LNA)

HEMTi izdelani na osnovi GaAs

Sodobni polprevodniki kot so GaAs tranzistorji omogočajo šumno število pod 1dB v L področju in hkrati 15dB ojačanja. Nizkošumni ojačevalnik je sumno temperaturo sprejemnika pod 70K

ojačevalnik, ki ojača šibke signale brez bistvenega poslabšanje razmerja signal šum. Ojačevalnik poveča moč signal in šuma na vhodu. LNA načrtujemo tako, da dodamo čimmanj dodatnega šuma. Za vsako opazovanje z radijskim teleskopom je pomembno razmerje signal šum. Šum sestavljata dva izvora: to je šum, ki ga prejme antena T_A , ki in v katerem je prisoten naš koristen signal in dodatni šum sprejemnika T_S , ki ga dodajo elektronski elementi. Šumna temperatura našega nizkošumnega ojačevalka je za nas pomemben podatek. Namesto šumne temperature lahko uporabljamo tudi šumno število F . [7]

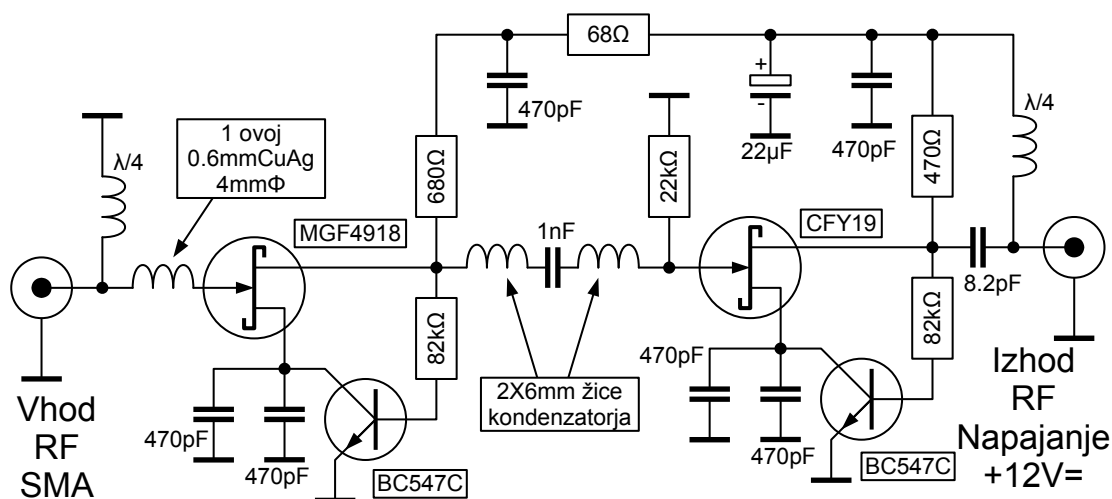
Nizkošumni ojačevalnik vgradimo v škatlico s pokrovom iz medeninaste pločevine, da izgube kablov ne motijo.

$$F_{dB} = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{T_S}{T_0} \right) \quad T_0 = 290K \quad (2.2)$$

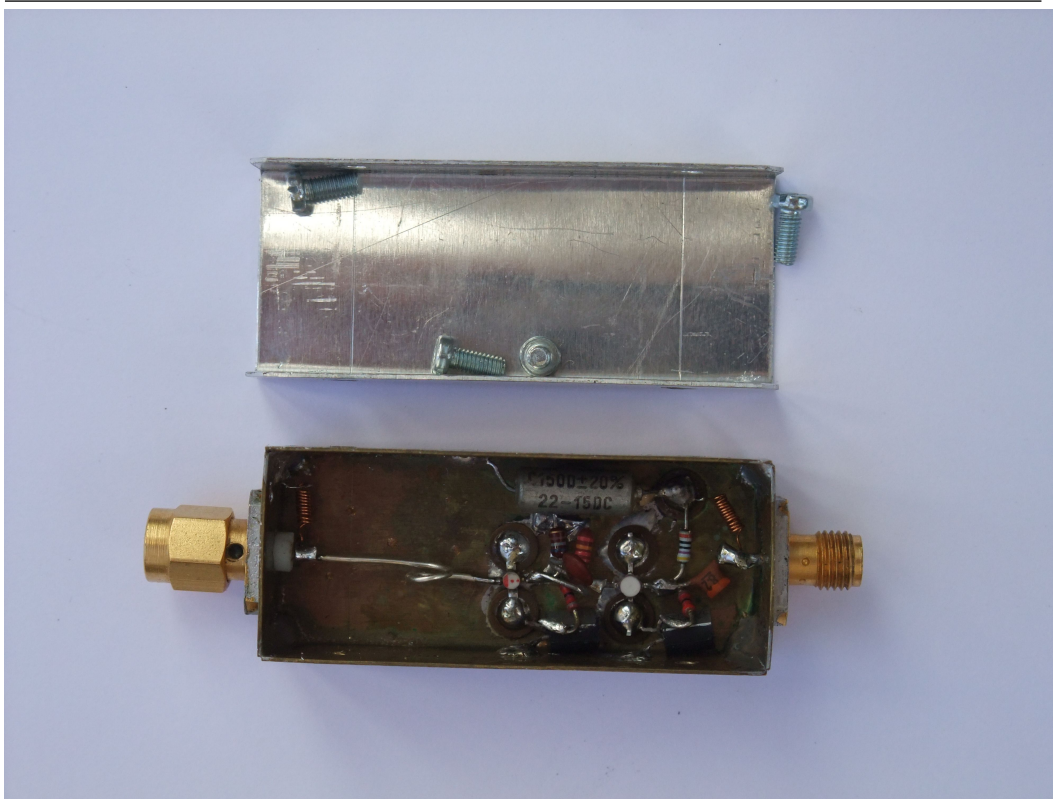
Nizkošumni ojačevalnik smo naredili po načrtu S53MV.[13]. LNA izdelamo v zračni konstrukciji. Za večji Z_k je zračna konstrukcija najboljša izbira. V primeru, da zelimo nižji Z_k pa izberemo laminat

Razpoložljivi HEMTi in GaAsFETi so nacrtovani za delovanje v frekvenčnem pasu 12GHz pri $Z_k=50\Omega$.

Na dosti nizji frekvenci 1.4GHz so njihove optimalne impedance višje. Za visok Z_k izberemo zračno konstrukcijo.



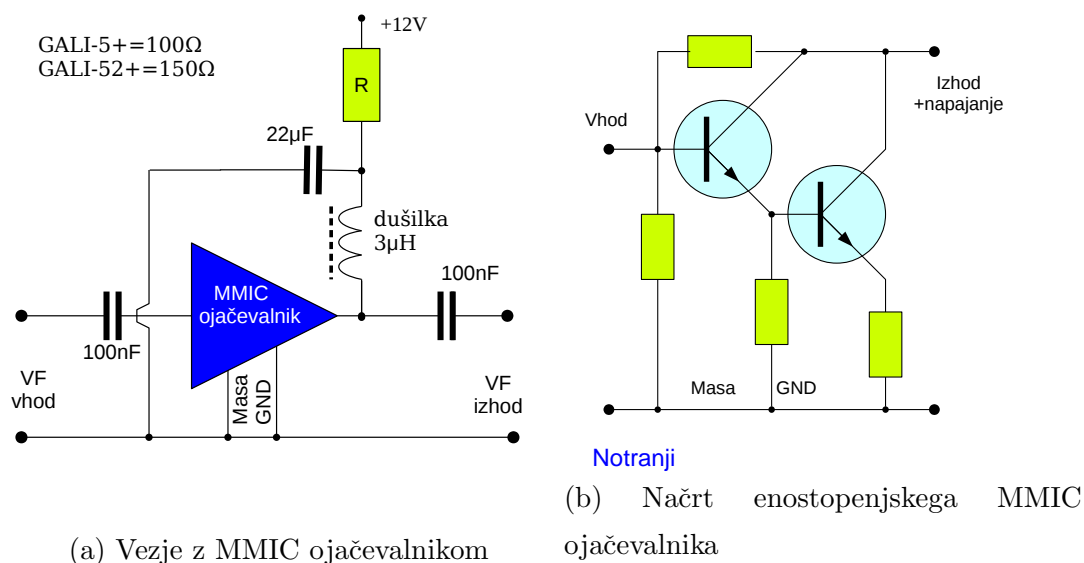
Slika 2.6: LNA v L frekvenčnem področju.



Slika 2.7: Konstrukcija LNA

2.3.1 Dodatni ojačevalniki

Dodatni ojačevalniki, ki smo jih uporabili pri gradnji teleskopa so MMIC gradniki. MMIC To sta MMIC ojačevalnik GALI-52+ in GALI-5. Zaradi univerzalnosti imajo slabše šumno število in **ne nihajo**. **so brezpogojno stabilni** Vezje z MMIC ojačevalnikom in njegov načrt, ki ga uporabimo pri gradnji teleskopa, je na prikazan sliki ??



Slika 2.8: MMIC ojačevalnik

2.3.2 Spektralni analizator

DSA815

Za sprejemanje signala smo uporabili spektralni analizator Rigol. Frekvenčni pas smo nastavili na 2 MHz. Video sito je bilo nastavljeno na 10 Hz(VBW). Ločljivost je 10 kHz(RBW). Razmerje $\frac{RBW}{VBW}$ pomeni faktor povprečenja, kar je $N=1000$. Za \sqrt{N} se zniža prikaz šuma na spektralnem analizatorju.

2.3.3 Programska oprema za obdelavo signala

Učinkovitost FFT algoritma je boljša z programsko opremo za obdelavo na računalniku kot na spektralnem analizatorju. **Spektralni analizator računa vsako točko meritve posebej, programska oprema vse točke meritve sočasno. Za naš primer je programska oprema 200 krat hitrejša.**

Spektralni analizator je panoramski sprejemnik, ki meri vsako točko spektra posebej. FFT meri vse točke spektra hkrati. V gornjem primeru merimo spekter v 200 točkah, za kar potrebuje spektralni analizator 20 sekund, FFT za enakovredno meritev pa 0.1 sekunde.

2.3.4 DVBT ključek

Pri zajemu signala smo uporabljali tudi RTL2832U ključek. A/D pretvornik ključka je 8-bitni. Pri našem delu bi bil uporaben že ključek, kjer bi bil A/D

pretvornik 4-biten, saj je razpon jakosti signalov v radioastronomiji je do 10 dB. Najvišja frekvenca vzorčenja, ki jo ključek zmore, je 2 MHz.

[Pri uporabi DVB-T ključka naredi FFT in povprečenje program v osebem računalniku.](#)

Poglavje 3

Umerjanje teleskopa

Brez umerjanje teleskopa ni mogoče sledenje nebesnim virom, izračun Doplerjevega pomika.

3.1 Umerjanje krmilnih motorjev antene

Za usmeritev zrcala na položaj nebesnega telesa, ki ga želimo opazovati moramo umeriti krmilne motorje. Prenos z motorjev je za azimut linearen, medtem ko za elevacijo je nelinearen.

Elevacijo umerimo s kotomerom. Na vsakih nekaj stopinj elevacije, ki jih naredimo s pomočjo krmilne enote in rotatorja naredi zrcalo, izmerimo dejansko elevacijo s kotometrom.

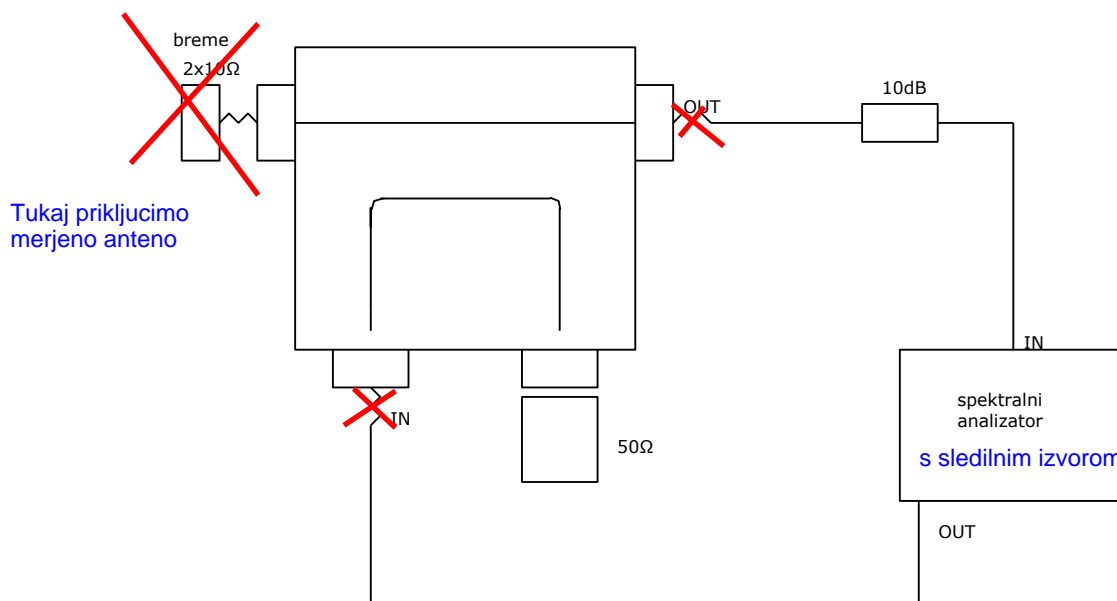
Dejansko pravilnost položaja antene preizkusimo s optičnem sledenjem Soncu. Sledenje izvedemo s pomočjo krmilne enote, ki jo nadzorujemo s pomočjo skripte. [v Pythonu, ki se izvaja na osebnem racunalniku.](#)

3.2 Meritve žarilca

3.2.1 Meritev impedančne neprilagojenosti

Najprej izmerimo točnost meritve odbojnosti žarilca. Vezava meritve je prikazana na sliki. Točnost naše meritve je $-30dB$ Impedančna neprilagojenost

pri prehodu iz koaksialnega kabla v valovod, na odprtini valovodnega lijaka in zaradi odboja radijskih valov od zrcala. nastane zaradi odboja priklopa z žarilca na koaksilani kabel, odboja na koncu žarilca in na odboja valov od zrcala. Prilagoditev žarilca smo najprej zmerili na prostem. Postavitev meritve je prikazana na sliki 3.1.

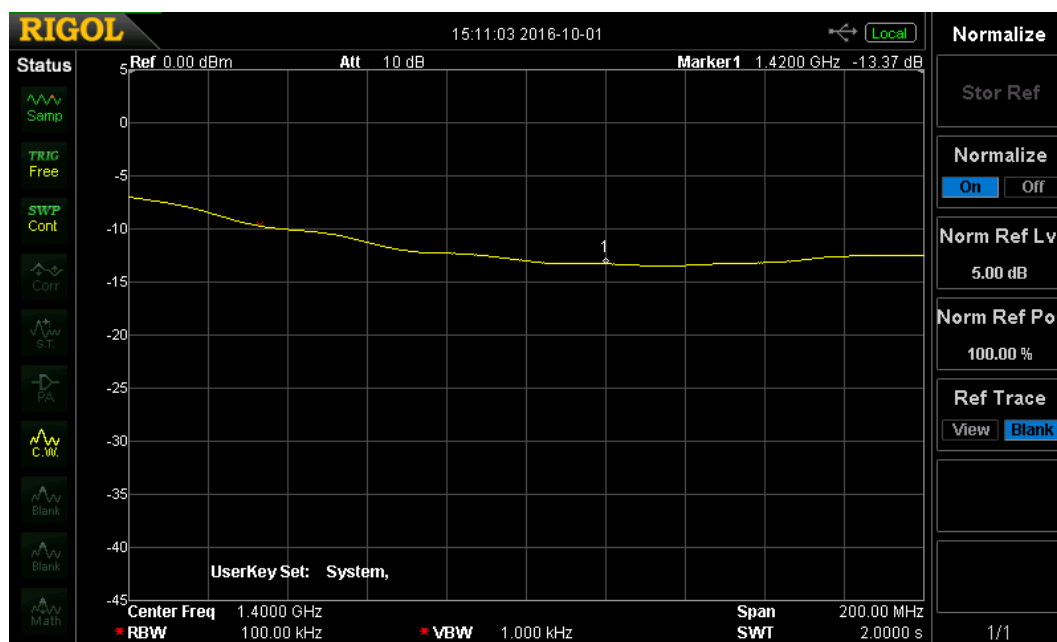


Slika 3.1: Postavitev meritve odbojnosti "žarilca"

Meritev prikazuje slika 3.2. Razmerje odbitega in napredujočega vala je za frekvenco 1.42Ghz je -13.4dB. Če pa imamo žarilec nameščen pred zrcalo, se pojavi še odboj od zrcala in izmerimo drugačno impedančno prilagoditev. Valovanje, ki se je odbilo od zrcala, izniči del neprilagojenega valovanje, zato se impedančna prilagoditev, ki jo izmerimo, izboljša glede na meritev na prostem. Razmerje odbitega in napredujočega vala je za frekvenco 1.42Ghz je -17.8dB. Pri nekoliko nižji frekvenci je to razmerje nižje, tam se odbiti val od zrcala in neprilagojen val odštejeta, pri višji frekvenci se pa vala seštejeta, kar pomeni, da je slabšo prilagoditev. Meritev prikazuje slika 3.3.

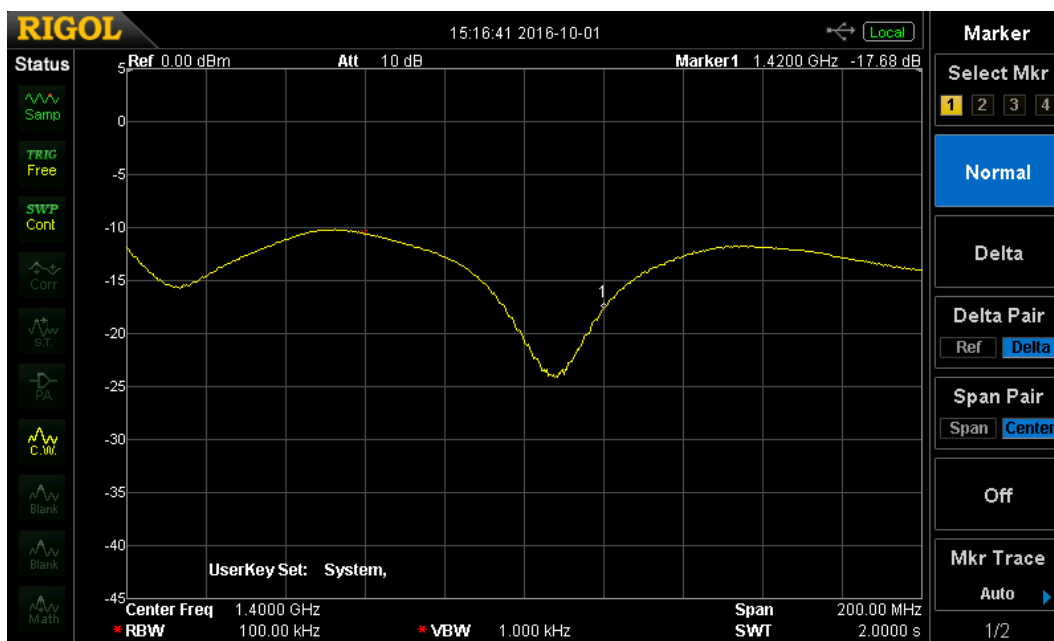
Opisan pojav se da frekvenčno prestaviti s premikanjem žarilca, ampak

Žarilec mora biti postavljen v gorišče. Če ni v gorišču, se pojavi kvadratna napaka faze, zato žarilca se moremo poljubno premikati, čeprav bi lahko imeli boljše impedančno prilagoditev. Kvadratna napaka faze spremeni obliko smernega diagrama in dobitek antene.



Slika bi morala biti prej v besedilu!

Slika 3.2: Meritev prilagojenosti žarilca na prostem



Slika 3.3: Meritev prilagojenosti žarilca pritrjenega na zrcalo

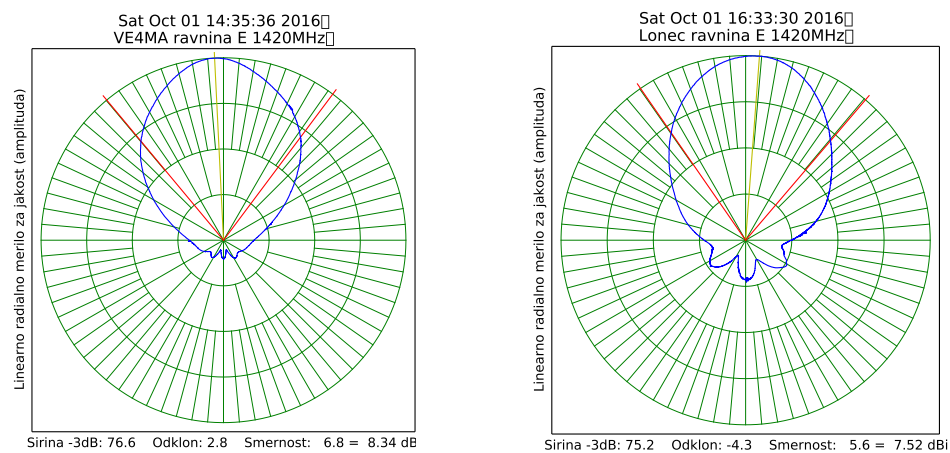
3.2.2 Meritev smernege diagrama žarilca

Smerni diagram je definiran kot $E(\theta, \phi)$. Sevalni diagram je predstavitev relativne moči polja oddajne antene v odvisnosti od kota. Meritev postavimo tako, da se oddajna antena od sprejemnika nahaja v Fraunhoferjevem področju. Razdalja mora biti večja od r_{min}

$$r > r_{min} = \frac{2d^2}{\lambda} \quad (3.1)$$

Smernost ($D \equiv directivity$) antene je definirana kot razmerje med gostoto sevane moči v željeni smeri in celotno sevano močjo vseh smereh. Da je rezultat neimenovano število, ga je treba pomnožiti še s polnim prostorskim kotom.[14].

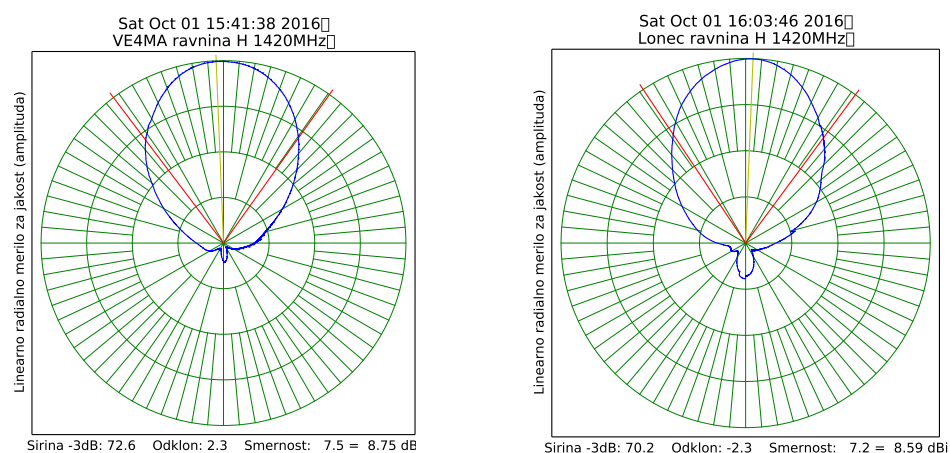
Izmerili smerni diagram žarilca z obodom po načrtu VE4MA in žarilec brez obroča. [ovratnika.](#)



(a) Žarilec z obodom

(b) Žarilec brez oboda

Slika 3.4: Meritev smernega diagrama v E ravnini pri 1420 Mhz



(a) Žarilec z obodom

(b) Žarilec brez oboda

3.3 Meritve LNA

Slika 3.5: Meritev smernega diagrama v H ravnini pri 1420 Mhz

Meritve so pokazale, da ima smerni diagram žarilec brez oboda **več** stranskih snopov kot žarilec z obodom. Stranski snopi povzročijo slabši izkoristek

osvetlitve. To smo izmerili tudi pri meritvi šuma Zemlje. V primeru, ko je žarilec na zrcalu lonec, ki ga prikazuje slika 3.6b smo izmerili 5dB. Meritev z žarilecem z obodom, ki ga prikazuje slika 3.6a nam da 7dB.



(a) Žarilec z obodom



(b) Žarilec brez oboda

Šumno število LNA smo izmerili z merilnikom šumne temperature **HP**.

HP8970 opremljen s sumno glavo HP346A z nizkim ENR okoli 5dB za meritve vrhunskih LNA.

Tabela 3.1: Meritev šumnega števila in ojačanja LNA

Merilnik		LNA rdeči HEMT	
f [MHz]	F_M [dB]	G_S [dB]	F_S [dB]
100	-0.0	10.90	7.78
200	-0.05	16.82	3.38
300	-0.07	21.57	2.16
400	-0.08	22.03	1.63
500	-0.04	23.82	1.34
600	-0.05	24.06	1.13
700	-0.10	23.70	0.97
800	-0.09	24.85	0.84
900	-0.15	24.84	0.76
1000	-0.15	25.45	0.66
1100	-0.15	26.70	0.49
1200	-0.27	28	0.40
1300	-0.17	28.60	0.40
1400	-0.11	28.38	0.45
1500	-0.37	28.61	0.48
1500	-0.16	27.55	0.53

Lahko je kaksna neuporabna frekvenca manj za LNA in kaksna uporabna vec za GALI?

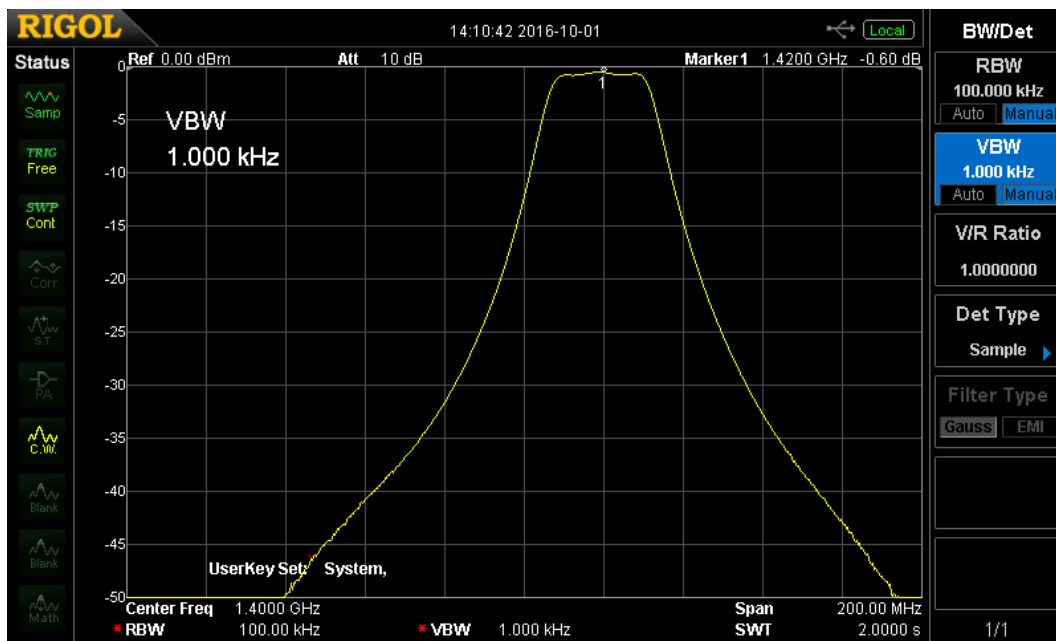
Meritve dodatni MMIC ojačevalnikov so naslednje:

Tabela 3.2: Meritev šumnega števila in ojačanja MMIC ojačevalnika

Merilnik		GALI-5+		GALI-52+	
f [MHz]	F_M [dB]	G_S [dB]	F_S [dB]	G_S [dB]	F_S [dB]
1400	8.41	19.13	4.10	19.333	2.82

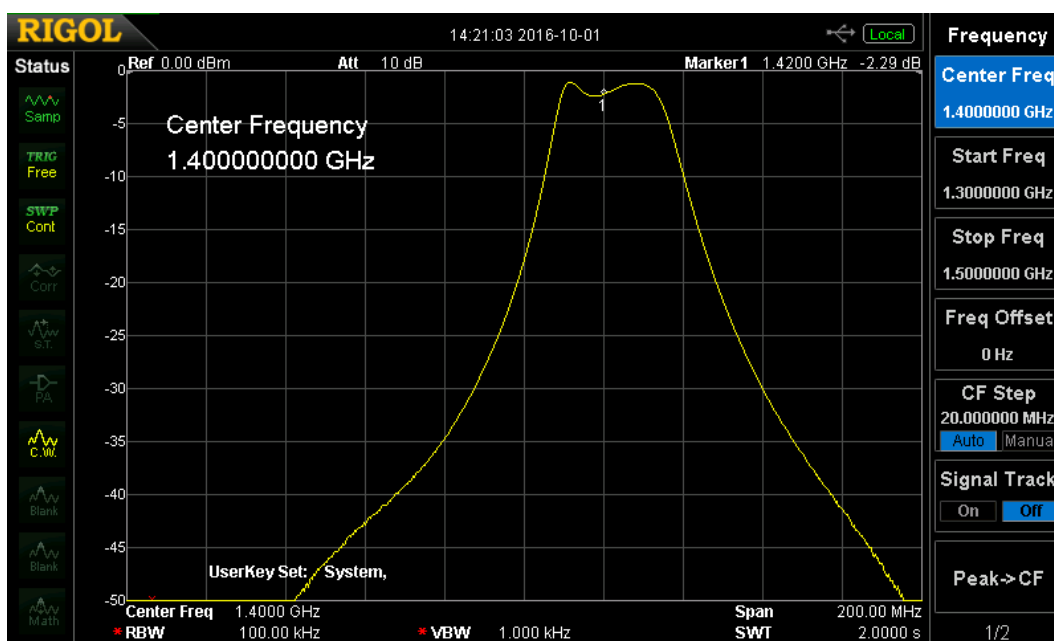
3.4 Merjenje votlinskih pasovnih sit

Prepustni pas našega sita je 20MHz. Vsavitveno slabljenje je 03.dB Odziv pasovnega sita je prikazan na sliki 3.7



Slika 3.7: Odziv pasovnega sita

Pri vezavi z ostalimi električnimi gradniki teleskopa se zaradi odbojev odziv sita poslabša. To skušamo popraviti z izravnalnim sitom. Odziv izravnalnega sita je prikazan na sliki 3.8



Slika 3.8: Odziv izravnalnega sita

3.5 Meritev šumne temperature sistema

3.5.1 Sevanje črnega telesa

Vodikove črte nam ne dajejo sevanje toplotnega izvora ampak je tlivka za področje mikrovalov, ker je njegovo sevanje spostano. Naravni šumi, kar sevanje vodikove črte je, so zelo šibki signali in so nekoherentni oddajniki. Za razumevanje kaj naša anteni vidi, si je potrebno pogledat zakone sevanja črnega telesa. Za izračun koliko sevanja ujame naša antena, rabimo izračune za zakone sevanja naravnega šuma, ki so jih zapisali fiziki. Sevanje je sorazmerno z absorpcijo. Najbolj seva črno telo, zrcalo ne seva ampak vse valovanje odbije. Črno telo vsebuje upore, ki se nahajajo na temperaturi različno od nič in to seva. To zapišemo z izrazom spektralna svetlost. Spektralna svetlost je delček moči, ki se izseva v del frekvenčnega prostora, ki ga izseva del ploskve

telesa v del prostorskega kota.

$$B_f = \frac{dP}{df dA d\Omega} \quad (3.2)$$

Zakon za sevanje za vsa frekna območja se glasi Planckov zakon sevanja črnega telesa.

$$B_f = \frac{2hf^3}{c_0} \frac{1}{e^{\frac{fh}{k_B T}} - 1} \quad (3.3)$$

kjer so konstante definirane:

$$h = 6.625 * 10^{-34} Js \quad \text{Planckova konstanta} \quad (3.4)$$

$$k_B = 1.38 * 10^{-23} \frac{J}{K} \quad \text{Boltzmannova konstanta} \quad (3.5)$$

$$c_0 = 3 * 10^8 \frac{m}{s} \quad (3.6)$$

Za nas pomemben Rayleigh-Jeansov približek, ki velja pri nizkih frekvencah. Ta velja kot je $hf \ll k_B T$.

$$B_f = \frac{2k_B T f^2}{c_0^2} \quad (3.7)$$

Izračun sprejete šumne moči v anteni. Antena sprejemamo le na eni polarizaciji: [Manjka risba, kje poteka navedeni integral, sicer je nesmiseln.](#)

$$P_N = \frac{1}{2} \int B_f \Delta f d\Omega dA' \quad (3.8)$$

Antena vidi predmete na različnih temperaturah. Šumna antene je tisto, kar antena vidi s svojim smernim diagramom. Definicija šumne temperature T_A breizgubne antene.

$$T_A = \frac{\int_{4\pi} T(\phi, \theta) |F(\phi, \theta)|^2 d\Omega}{\int_{4\pi} |F(\phi, \theta)|^2 d\Omega} \quad P_N = \Delta f k_B T_A \quad (3.9)$$

Telesa različno sevajo, odvisno od temperature, zato bo spektralna svetlobnost funkcija temperature.

$$\text{Rayleigh - Jeans} : B_f(\phi, \theta) = \frac{2k_B}{\lambda^2} T(\phi, \theta) \quad (3.10)$$

3.5.2 Izpeljava in ocena šumne temperature sprejemnega sistema

$$P_N = B \cdot k_B \cdot T$$

. Moč šuma P_N je premo sorazmeren pasovni širini B , Boltzmanovi konstanti. Izpeljava in ocena šumne temperature celotnega sprejemnega sistema in temperaturi na kateri se telo nahaja.[21] Šum nas omejuje in nam določa najnižjo moč signala, ki smo jo sposobni določiti s prejemnim sistemom in je naša referenčna vrednost.

Šumna temperatura sistema določa kvaliteto sprejemnega sistema. Vsak gradnik in antena dodajo svoj prispevek šumne temperature.

Izmerili smo, da meritev hladnega neba, ki ima 10K, dodatnega šuma antene in šum našega sprejemnika da 70, kar je naša referenčna vrednost. To imenujemo šumna temperatura sistema $T_S = T_1 = T_{S1} + T_{nebo}$. T_{nebo} znaša 10K, če ni v tej smeri nobenih dodatnih virov. Tudi sama antena je šumi, če izkoristek ni ena. Če anteno obrnimo v gozd dobimo dodatnih 7dB ($T_2 = T_{S1} + T_{gozd}$). Temperatura gozda, ki jo vidi naša antena, znaša približno 290K.

Ocenjujemo, da
 $T_1 = T_{S1} + T_{nebo}$

$$10 \log \frac{T_2}{T_1} = 7dB$$

$$T_2 = T_1 \cdot 10^{\frac{7}{10}} \quad \text{Iz tega izračunamo neznano temperaturo } T_{S1}.$$

$$T_{S1} + T_{gozd} = 5 \cdot (T_{nebo} + T_{S1}) \quad T_{gozd} \approx 290K \quad T_{nebo} \approx 10K \quad (3.11)$$

$$T_{S1} = T_{antena} + T_{LNA}$$

$$T_{S1} = 60K \quad T_S = T_{antena} + T_{LNA} + T_{nebo} \quad T_{LNA} = 30K$$

$$T_{antena} = 30K \quad T_S = T_{REF} = 70K$$

3.6 Meritev izkoristka osvetlitve antene

Izmerili smo, da meritev hladnega neba, ki ima 10K, dodatnega šuma antene in šum našega sprejemnika da 70, kar je naša referenčna vrednost. Temperatura

$$T_{ref} = T_{neba} + T_{S1}$$

gozda, ki jo vidi naša antena, znaša približno 290K. Ko zrcalo usmerimo v sonce, se nam signal poveča za 13.dB(T_3). Na spletni strani observatorija San Vito dei Normanni v Italiji je objavljeno, da je tisti dan aktivnost Sonca 69 SFU(solar fluks units) pri frekvenci 1415MHz. Enota spektralne gostote moči SFU je $10^{-22} \frac{W}{m^2 Hz} = 10^4 Jy$.

$$10 \log \frac{T_2}{T_1} = 7dB$$

$$T_2 = T_1 \cdot 10^{\frac{7}{10}}$$

$$T_{S1} + T_{gozd} = 5 \cdot (T_{nebo} + T_{S1}) \quad T_{gozd} \approx 290K \quad T_{nebo} \approx 10K$$

$$T_{S1} = T_{antena} + T_{LNA}$$

$$T_{S1} = 60K \quad T_S = T_{antena} + T_{LNA} + T_{nebo} \quad T_{LNA} = 30K$$

$$T_{antena} = 30K \quad T_S = T_{REF} = 70K$$

$$N_0 = k_B \cdot T_{REF} = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \cdot 70K = 96.6 \cdot 10^{-23} J$$

$N_0 \equiv$ spektralna gostota šuma našega sistema

$$13.5dB = 10^{\frac{13.5}{10}} = 22.39$$

$$N_{0sonce} = T_3 \cdot k_B = N_0 \cdot 10^{\frac{13.5}{10}} = 2162 \cdot 10^{-23} J = 2161 \cdot 10^{-23} \frac{W}{Hz}$$

$N_{0sonce} \equiv$ spektralna gostota šuma sonca – izmerjen

$$N_{sonce} = N_{0sonce} - N_0 = 2.066 \cdot 10^{-20} \frac{W}{Hz}$$

$$F = 69SFU = 69 \cdot 10^{-22} \frac{W}{m^2 Hz}$$

$$N_{sonce} = F \cdot \frac{A_{eff}}{2} \quad \frac{1}{2} - \text{merimo na eni polarizaciji}$$

$$A_{eff} = \frac{2N_{sonce}}{F} = \frac{2 \cdot 206.6 \cdot 10^{-22} \frac{W}{Hz}}{69 \cdot 10^{-22} \frac{W}{m^2 Hz}} = 5.988m^2$$

Izmere našega zrcala so naslednje:

$$r = d/2 = 155cm$$

$$A_2 = \pi r^2 = 7,548m^2$$

$$\eta_0 = \frac{A_{eff}}{A_2} = 0.793$$

Izkoristek našega zrcala je 79.3%.

(3.12)

(3.13)

Poglavje 4

Opazovanje Vodikove črte

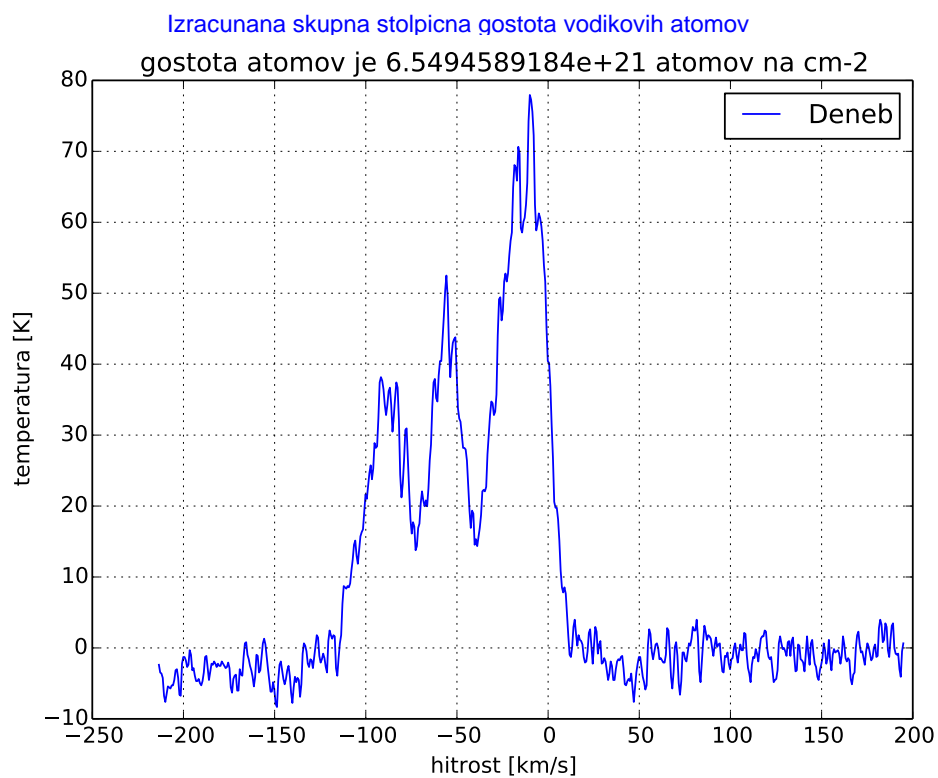
Pri meritvi izvora vodikove črte naletimo na zvezne vire, kjer je vir širši od tega, kar vidi naša antena. V tem primeru je **kvaliteta** meritve neodvisna od sistema. Boljša antena nam v tem primeru pomeni le boljšo ločljivost. Položaj širokopasovnega vira lahko ocenimo s tem, v katero smer gleda naša antena. Natačnost ocene točnosti smeri določa širina našega smernega diagrama zrcala. [se ponavlja isto besedilo](#)

Signal, ki ga sprejemamo je šibek. Moč signala, ki ga želimo opazovati, je približno 20dB manj(120dBm), ko je občutljivost GSM telefona za pasovno širino **100kHz**.

Na slikah 4.2 4.4 4.6 so prikazane meritve vodikove črte, ki smo jih posneli s spektralnim analizatorjem.

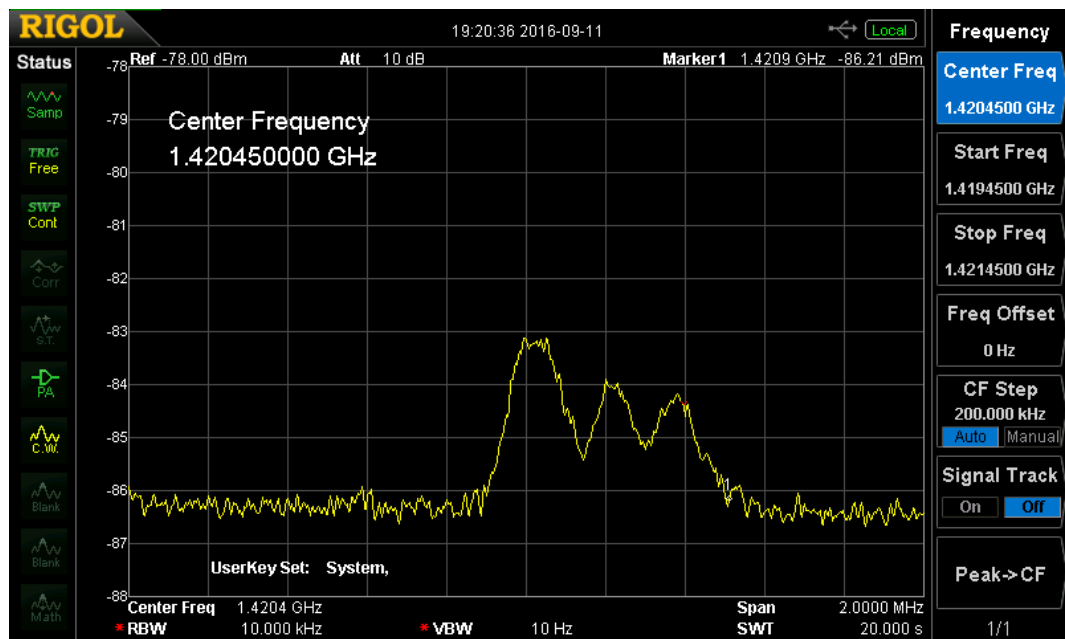
Negativna hitrost na grafih pomeni, da se vir oddaljuje glede na nas, pozitivna hitrost pa da se približuje.

Gostota delcev, ki jih izračunamo iz meritev, pomeni koliko delcev je v oblaku, ki ga vidi antena, vzdolž pogleda.

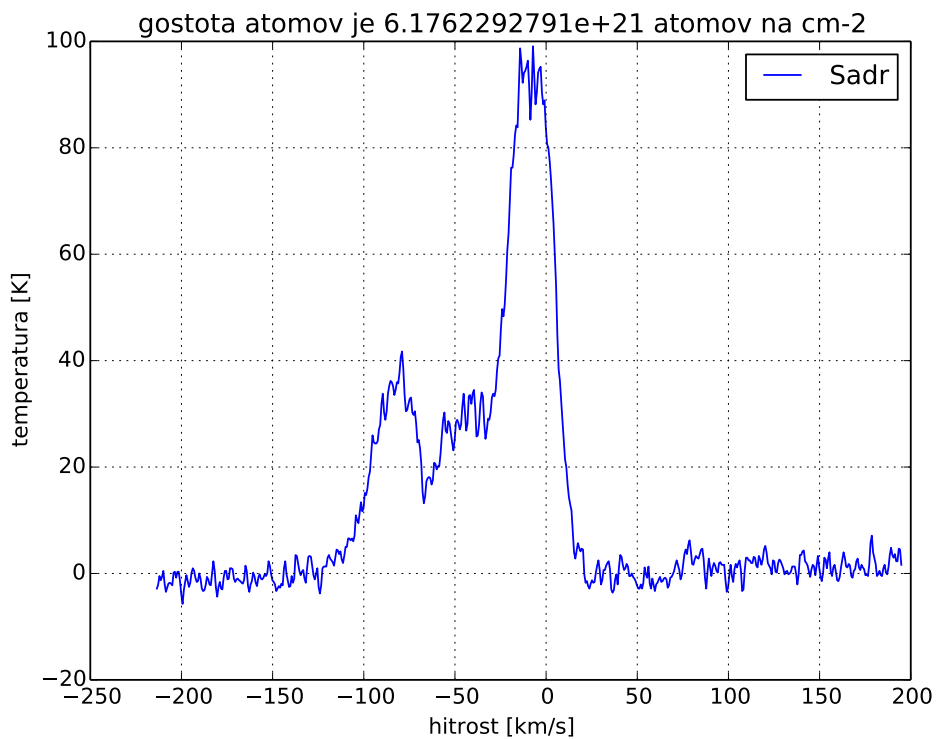


Slika 4.1: **Meritev vodikove črte** v smeri Deneba

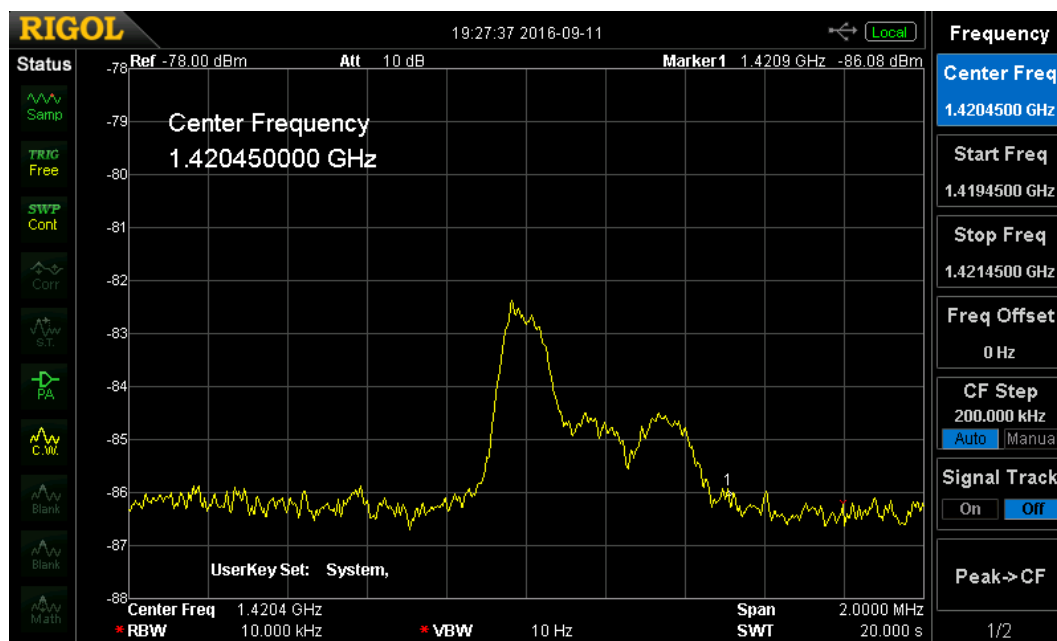
Izračunana Sumna temperatura sevanja vodikovih atomov kot funkcija hitrosti v smeri Deneba



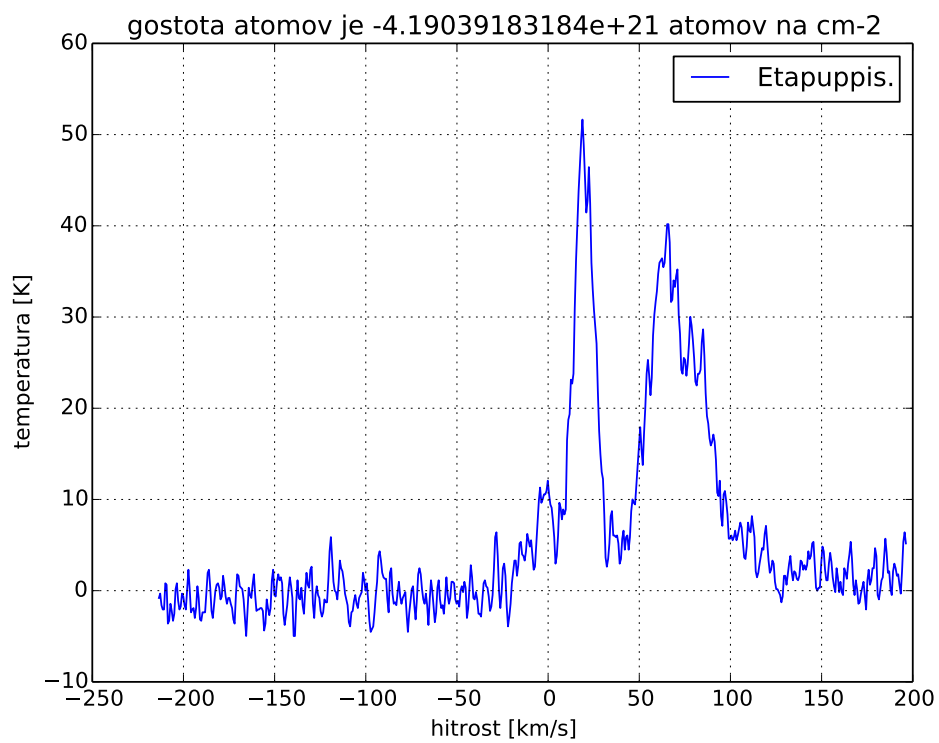
Slika 4.2: Meritev **vodikove črte** v smeri Deneba
frekvenčnega spektra



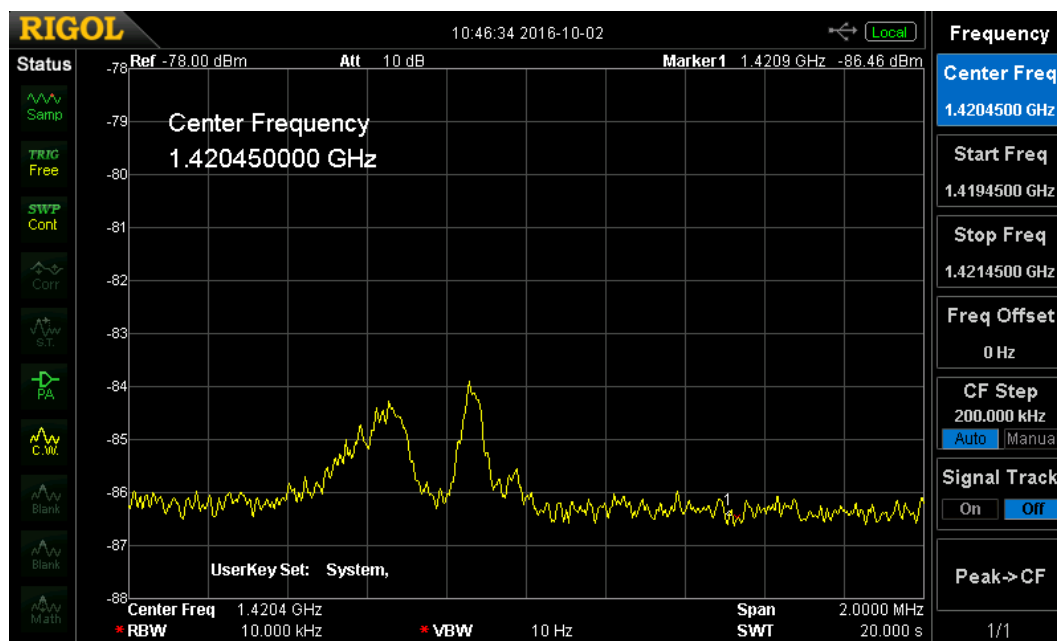
Slika 4.3: Meritev vodikove črte v smeri Sadra



Slika 4.4: Meritev vodikove črte v smeri Sadra



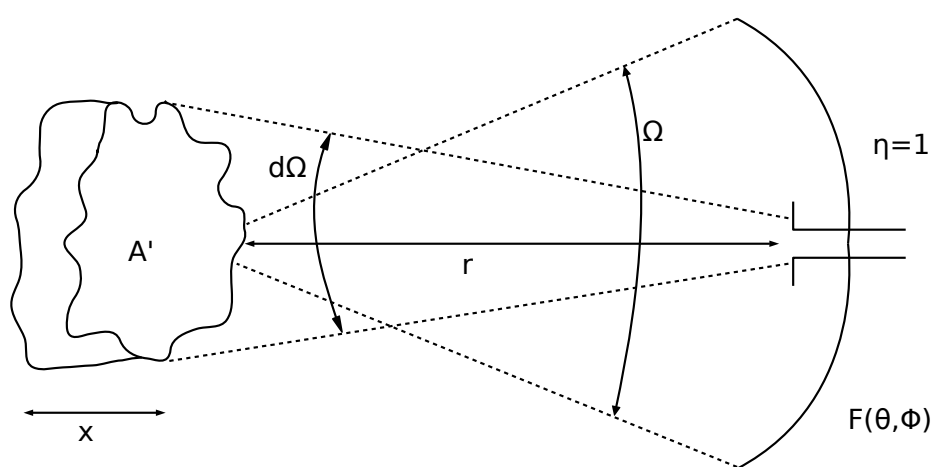
Slika 4.5: Meritev vodikove črte v smeri Etapuppis



Slika 4.6: Meritev vodikove črte v smeri Etappuppis

4.1 Izpeljava stolpične gostote

Stolpična gostota na pove koliko je delcev na m^2 vzdolž smeri, ki jo opazujemo.



Slika 4.7: Izpeljava stolpične gostote

$N \equiv \text{gostotata}[m^{-3}]$

$NA'x \equiv \text{število delcev}$

$A_{eff} \equiv \text{efektivna površina antene}$

$F(\theta, \phi \equiv \text{amplitudni smerni diagram}$

$D(\theta, \phi) \equiv \text{smernost}$ Kaj je Tau?

$$A_{eff}(\theta, \phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} D(\theta, \phi)$$

$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi |F(\theta, \phi)|^2}{\int_{4\pi} |F(\theta, \phi)|^2 d\Omega}$$

$$A_{eff}(\theta, \phi) = \lambda^2 \frac{|F(\theta, \phi)|^2}{\int_{4\pi} |F(\theta, \phi)|^2 d\Omega} \quad (4.1)$$

$$dP_0 = \frac{NA'xhf}{\tau}$$

$$A' = r^2 d\Omega$$

$$dP_S = \frac{1}{2} \frac{dP_0}{4\pi} \Omega = \frac{dP_0}{4\pi} \frac{A_{eff}(\theta, \phi)}{r^2}$$

$$dP_S = \frac{1}{2} \frac{N x h f}{\tau} \frac{d\Omega}{4\pi} A_{eff} = \frac{1}{2} \frac{NA'xhf}{\tau} \frac{d\Omega}{4\pi} \lambda^2 \frac{|F(\theta, \phi)|^2}{\int_{4\pi} |F(\theta, \phi)|^2 d\Omega}$$

$$P_s = \int_{4\pi} dP_S = \frac{1}{2} \frac{N x h f}{\tau} \frac{\lambda^2}{4\pi} = \Delta f k_B T$$

$$Nx = \frac{8\pi k_B \tau}{h f \lambda^2} T \Delta f = \frac{8\pi k_B \tau}{h c_0 \lambda} T \Delta f \quad [m^{-2}]$$

Podatki za izračun so naslednji:

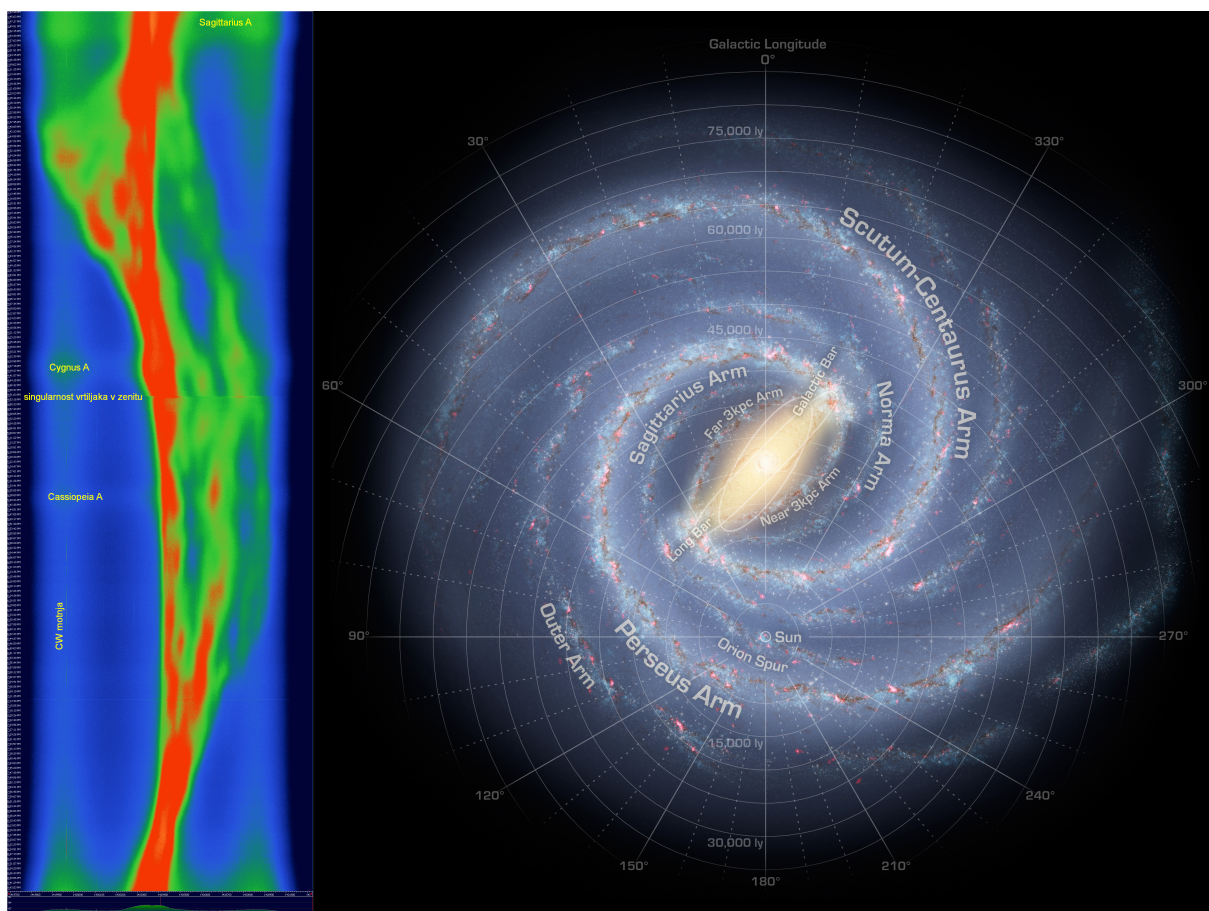
$$\begin{aligned}
 h &= 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \\
 k_B &= 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \\
 c_0 &= 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\
 f &= 1420.405751786 \text{ MHz} \\
 \lambda &= 21.106 \text{ cm} \\
 \tau_{\frac{1}{2}} &= 3.4 \cdot 10^{14} \text{ s} \\
 \tau &= 5 \cdot 10^{14} \text{ s} \\
 T &\approx 100 \text{ K} \\
 \Delta f &\approx 100 \text{ kHz} \\
 \Delta v &= c_0 \frac{\Delta f}{f} \approx 21 \frac{\text{km}}{\text{s}} \\
 N_x &= \frac{8\pi k_B \tau}{h f \lambda^2} T \Delta f = \frac{8\pi k_B \tau}{h c_0 \lambda} T \Delta \quad N_x = 3.82 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Podatki za izračun po formuli NRAO [8]:

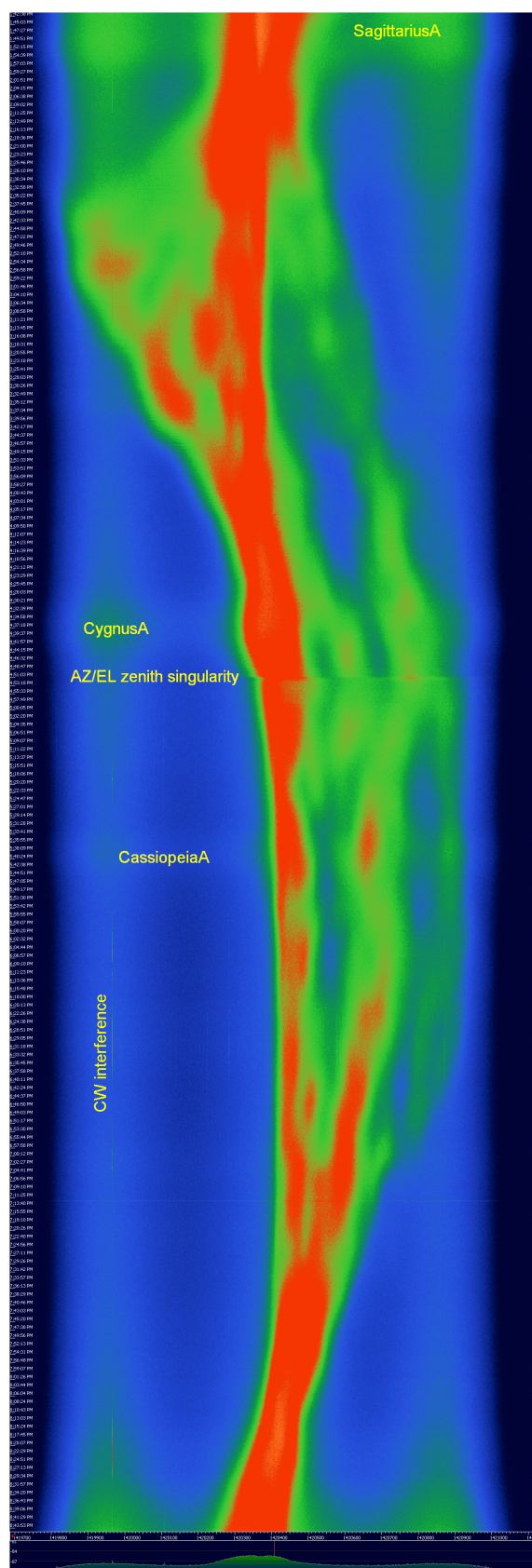
$$N_x [\text{cm}^{-2}] = 1.82 \cdot 10^{18} T [\text{K}] \Delta v \left[\frac{\text{km}}{\text{s}} \right] = 4.15 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-2} \tag{4.3}$$

4.1.1 Meritve spektra vodikove črte v ravnini galaksije

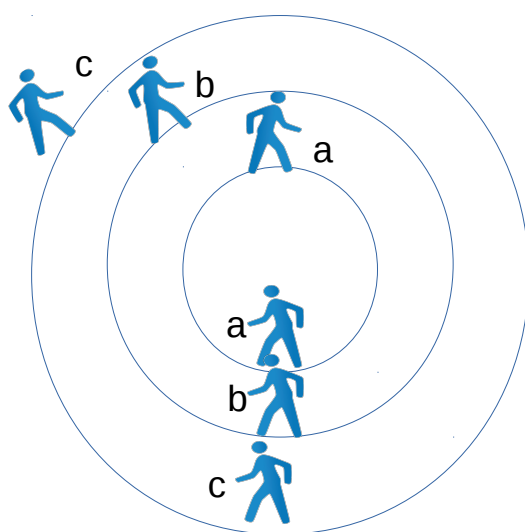
Meritve spektra vodikove črte v ravnini smo naredili s programom **HDSR**. Snemanje vodikove črte začnemo na **0 stopinj** galaktične ravnine v območju **tik pred** Sagitariusa A. Meritev nadaljujemo po galakstičnega ekvatorja, kjer pri galaktični dolžini 76.1 stopinj naletimo na širokopasovni vir Cygnus A. Pri galaktični dolžini 111.7 stopinj naletimo na ostanek supernove Cassiopeia A. Pri meritvi opazimo razližne kotne hitrosti galaksije. Del galaksije v območju Sagittariusa A je od nas oddaljuje, pri meritvi v območju Cassiopeia A se pa nam približuje. Pri meritvi vidimo tri krake galaksije. Iz tega sledi, da je naša galaksija spiralne oblike.



Slika 4.8: Spekter vodikove črte v galaktični ravnini



Slika 4.9: Spekter vodikove črte v galaktični ravnini



Slika 4.10: Spekter vodikove črte v galaktični ravnini

Literatura

- [1] Svetlobno leto. Dostopno na https://sl.wikipedia.org/wiki/Svetlobno_leto
- [2] Parsek. Dostopno na <https://sl.wikipedia.org/wiki/Parsek>
- [3] List of the most distant astronomical objects. Dostopno na https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_the_most_distant_astronomical_objects
- [4] Radiometers <http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/Radiometers.html>
- [5] Professor Dr. K. Rohlfs, Dr. T. L. Wilson, "Tools of Radio Astronomy", Springer, 2004.
- [6] Matjaž Vidmar, S53MV, "Rezonatorsko sito za 23cm". Dostopno na: <http://lea.hamradio.si/~s53mv/archive/a360.pdf>
- [7] Matjaž Vidmar, "Visokofrekvenčna tehnika" <http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/vt.pdf>
- [8] The HI 21 cm Line. Dostopno na: <http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/HILine.html>
- [9] Feed horn. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Feed_horn

- [10] Matjaž Vidmar, “Antene in razširjenje valov 9”.<http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/ar.zap.pdf>
- [11] U.Klein, J. Kerp, “Physics of the interstellar medium”. Dostopno na <https://astro.uni-bonn.de/~uklein/teaching/ISM/InterstellarMedium.pdf>
- [12] Paul Wade W1GHZ, “Feeds for Parabolic Dish Antennas”. Dostopno na <http://www.qsl.net/n1bwt/chap6-3.pdf>
- [13] Matjaž vidmar S53MV, “Dvostopenjski predojačevalnik za L področje”. Dostopno na <http://lea.hamradio.si/~s53mv/archive/a136.pdf>
- [14] Matjaž Vidmar “Laboratorijske vaje sevanje in razširjenje valov”. Dostopno na http://antena.fe.uni-lj.si/studij/srv/navodila/opis_vajaSRV_03.pdf
- [15] Radiometer. Dostopno <http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/Radiometers.html>
- [16] Reber Radio Telescope in Wheaton, Illinois, 1937 Dostopno na: http://www.nrao.edu/whatisra/hist_reber.shtml
- [17] ALMA: A new giant radio telescope for European astronomers https://horizon-magazine.eu/media/alma-new-giant-radio-telescope-european-astronomers_en.html
- [18] Temna snov https://sl.wikipedia.org/wiki/Temna_snov
- [19] Matjaž vidmar S53MV, “Sestavljanje krožne polarizacije” <http://lea.hamradio.si/~s53mv/archive/a167.pdf>
- [20] N. Fabas 1, A. Lèbre, and D. Gillet “Shock-induced polarized hydrogen emission lines in the Mira star o Ceti” Dostopno: <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2011/11/aa17748-11.pdf>

-
- [21] :Sebastijan Mrak:Satelitski sprejemnik za spremljanje svetilniškega signala satelita Alphasat v frekvenčnem pasu Q (Ka) <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=81859&lang=slv>
- [22] Martin Čopič, Marjan Hribar "Laser", Presek Dostopno na <http://www.presek.si/9/559-Copic-Hribar.pdf>