



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FÍSICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA

Renato Nunes Ramalho

# **Impactos de Satélites GNSS no Radiotelescópio BINGO**

Campina Grande, Paraíba, Brasil



Renato Nunes Ramalho

## **Impactos de Satélites GNSS no Radiotelescópio BINGO**

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Luciano Barosi, apresentada à Unidade Acadêmica de Física em complementação aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Professor Dr. Luciano Barosi

Campina Grande, Paraíba, Brasil

R165i Ramalho, Renato Nunes.  
Impactos de satélites GNSS no radiotelescópio BINGO / Renato Nunes Ramalho – Campina Grande, 2024.  
92 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.  
"Orientação: Prof. Dr. Luciano Barosi de Lemos."  
Referências.

1. Sinais Cosmológicos. 2. Radioastronomia. 3. Satélites GNSS. 4. RFI. 5. BINGO. 6. UIAPURU. 7. Influência das Constelações. I. Lemos, Luciano Barosi. II. Título.

CDU 52(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM FISICA

Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

**FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES**

**RENATO NUNES RAMALHO**

Impactos de Satélites GNSS no Radiotelescópio BINGO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em: 08/09/2023

**Luciano Barosi de Lemos**  
Presidente da Comissão e Orientador

**Amílcar Rabelo Queiroz**   
Examinador Interno

**Carlos Alexandre Wuensche de Souza**  
Examinador Externo



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alexandre Wuensche de Souza, Usuário Externo**, em 10/09/2023, às 09:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUCIANO BAROSI DE LEMOS, PROFESSOR 3 GRAU**, em 12/12/2023, às 19:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3777552** e o código CRC **A34ECA17**.

---

**Referência:** Processo nº 23096.069451/2023-40

SEI nº 3777552

# Resumo

Os satélites GNSS são fontes poderosas de RFI que prejudicam as observações radioastronômicas. Com foco no BINGO e em uma de suas ramificações, UIRAPURU, planejamos estimar a influência das constelações GNSS primárias levando o sinal dos satélites e a qualidade dos instrumentos. Comparamos o sinal com os principais foregrounds cosmológicos e mostramos o impacto e em quais casos ainda é possível recuperar os sinais. Este trabalho tem como foco a análise de RFI que perturba a faixa de frequência entre 960 e 1260 MHz no experimento BINGO na detecção de HI. Buscando soluções para reduzir o impacto das transmissões GNSS uma das estratégias consiste no mapeamento das flutuações temporais desses sinais. A compreensão da influência dos sinais de satélite na medição de HI é auxiliada pela análise, um passo importante na compreensão do impacto de sinais de satélite sobre a medição de HI. Os resultados e perspectivas contemplam a caracterização, análise e mitigação de RFI para o BINGO, mapeamento de intensidade HI e impactos nos sinais cosmológicos. Em suma, essa dissertação contribui para uma compreensão aprofundada das RFIs em radiotelescópios, particularmente no contexto do BINGO, fornecendo informações valiosas para o avanço da pesquisa em radioastronomia.

**Palavras-chave:** Sinais cosmológicos. Satélites GNSS. RFI. BINGO. UIRAPURU.

# Abstract

GNSS satellites are potent sources of RFI that impair radioastronomical observations. With a focus on BINGO and one of its branches, UIRAPURU, we plan to estimate the influence of primary GNSS constellations concerning satellite signals and instrument quality. We compare the signal with major cosmological foregrounds, demonstrating the impact and identifying cases in which signal recovery is still feasible. This work concentrates on analyzing RFI that disrupts the frequency range between 960 and 1260 MHz in the BINGO experiment's HI detection. As part of efforts to mitigate GNSS transmission effects, one of the strategies involves mapping temporal fluctuations of these signals. Understanding the influence of satellite signals on HI measurement is aided by analysis, a crucial step in comprehending the satellite signal's impact on HI measurement. The results and prospects encompass characterization, analysis, and RFI mitigation for BINGO, HI intensity mapping, and impacts on cosmological signals. In essence, this dissertation contributes to an in-depth understanding of RFIs in radio telescopes, particularly within the BINGO context, offering valuable insights for advancing radioastronomy research.

**Keywords:** Cosmological signs. Satellites GNSS. RFI. BINGO. UIRAPURU.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Imagem em cores falsas do sinal de rádio do hidrogênio atômico da galáxia. Créditos: CHAKRABORTY e ROY/NCRATIFR/GMRT. . . . .	15
Figura 2 – Feixe do Uirapuru medido para polarização horizontal. Isso é feito com dados de medições LIT. Foi escolhido um conjunto de dados específico com polarização horizontal. . . . .	22
Figura 3 – Resultados ajustados da flutuação do feixe do Uirapuru no parâmetro FWHM. A linha verde é um ajuste linear. . . . .	23
Figura 4 – Feixe gaussiano cônico ajustado aos dados do Uirapuru. Os resultados apresentam boa concordância no lóbulo principal e nas posições dos lóbulos laterais, embora estes sejam mais altos que os medidos. . . . .	25
Figura 5 – Ganho do Uirapuru em função da frequência. A linha contínua corresponde ao ajuste linear FWHM. . . . .	26
Figura 6 – Feixe gaussiano ajustado ao feixe simulado BINGO. . . . .	27
Figura 7 – Ganho para feixe de bingo. A linha sólida indica um ajuste linear FWHM. Os eixos x e y, indicam a frequência em GHz e o ganho em dB, respectivamente; os pontos representam as medições do ganho do radiotelescópio Uirapuru em diferentes frequências e o eixo y é definido como “G” para denotar a medida do ganho. . . . .	27
Figura 8 – Densidade de potência do sinal do UIRAPURU. A variação indica a duração de uma passagem no feixe do radiotelescópio. . . . .	30
Figura 9 – Densidade de potência para sinais no feixe inferior do BINGO. A buzina do BINGO tem um FWHM pequeno comparado ao Uirapuru, a passagem do satélite é muito rápida. . . . .	31
Figura 10 – Alocações dos satélites GNSS. . . . .	32
Figura 11 – Órbitas e densidade de satélites GNSS por grau quadrado ao longo de 48 horas. A figura mostra que a densidade de satélites próximos ao equador é muito alta, causando grande influência no Feixe Uirapuru. Para a declinação do BINGO, podemos esperar que cada feixe veja um céu diferente. . . . .	35
Figura 12 – Radiotelescópio Uirapuru. . . . .	37
Figura 13 – Informações espectrais vistas pelo UIRAPURU para cada constelação GNSS. Variação do Espectro de Frequência ao Longo do Tempo. . . . .	37
Figura 14 – Zoom na Passagem do Sistema de Navegação por Satélite GALILEO. . . . .	38
Figura 15 – Espectro GNSS total no BINGO para os feixes inferior e superior. Apesar de muito semelhantes, existem algumas diferenças importantes para o sinal recebido pelas cornetas inferior e superior. . . . .	39

Figura 16 – Projeção do Radiotelescópio BINGO. . . . .	40
Figura 17 – Modulação de sinal. . . . .	58
Figura 18 – Densidade de fluxo para cada constelação GNSS vista do solo. . . . .	59
Figura 19 – Tempo de Allan para sinal em UIRAPURU. O sinal é distinto do ruído branco e do ruído 1/f para integrações curtas. Existe uma escala de tempo específica para a qual o sinal GNSS contribui apenas para o ruído branco. . . . .	60
Figura 20 – Tempo de Allan para sinais no feixe inferior do BINGO. O sinal GNSS se assemelha ao ruído branco mesmo em escalas de tempo curtas. . . . .	62
Figura 21 – Densidade de potência para sinais no feixe inferior do BINGO. O feixe do BINGO tem um FWHM pequeno comparado ao Uirapuru, a passagem do satélite é muito rápida. . . . .	64
Figura 22 – Desvio quadrático médio para o sinal de 30 dias para BINGO. Sinais acima de 1100 MHz ficam comprometidos, a buzina superior recebe um sinal menos intenso. Um procedimento de mascaramento que extirpa todo o sinal com um ângulo de visada inferior à 1° mostra uma melhoria significativa. . . . .	65
Figura 23 – Espectros de Potência do Hidrogênio Neutro (HI), GNSS e Ruído de Interferência de Rádio (RFI) em Diferentes Frequências. . . . .	66
Figura 24 – Comparação do Espectro de Potência do Hidrogênio Neutro (HI) com o Ruído de Interferência de Rádio (RFI). . . . .	67
Figura 25 – $C_\ell$ teórico para sinal cosmológico HI obtido através da construção de um traçador personalizado para pyccl. . . . .	76

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Frequência de alocação para os satélites: GPS, GALILEO, GLONASS E BEIDOU. . . . .	32
---	----



# Lista de abreviaturas e siglas

UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UAF	Unidade Acadêmica de Física
PPGF	Programa de Pós-Graduação em Física
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
BINGO	Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutron Gas Observations
RFI	Interferência de Radiofrequência
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
BAO	Oscilações Acústicas Bariônicas
HI	Hidrogênio Neutro
FWHM	Full Width at Half Maximum
LIT	Laboratório de Integração e Testes
ITU	União Internacional de Telecomunicações
SKY	Square Kilometre Array
MEO	Órbitas Terrestre Média
PSD	Densidade Espectral de Potência
PFD	Power Flux Density
OoB	out-of-band
KDE	Kernel Density Estimation
USRP	Universal Software Radio Peripheral
CMB	Cosmic microwave background
RMS	Root Mean Square
TOD	time-ordered-data
LSS	Estrutura de Larga Escala

ADC	Conversor analógico-digital
LNA	Amplificador de baixo ruído
TLE	Two-line element
EIRP	Potência Isotrópica Radiada Efetiva
LoS	Line of Sight
$\Lambda$ CDM	Lambda-Cold Dark Matter
IM	Mapeamento de Intensidade
MAD	Desvio Absoluto Mediano

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Contextualização da importância da Radioastronomia	13
1.2	Apresentação do Radiotelescópio BINGO	16
1.3	Objetivos da dissertação	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
2.1	Radiotelescópios	19
2.2	Interferência de Rádio Frequência (RFI)	21
2.3	Satélites GNSS	28
2.3.1	Potência do sinal dos Satélites	29
2.3.2	Sinais GNSS e suas órbitas	31
2.4	Radiotelescópio Uirapuru	36
2.5	Radiotelescópio BINGO	38
2.5.1	Descrição do BINGO	40
2.5.2	Localização do BINGO e impactos de FRI	41
<b>3</b>	<b>REVISÃO COSMOLÓGICA</b>	<b>43</b>
3.0.1	Dinâmica do Universo: Equação de Friedmann	43
3.0.2	Equação de Boltzmann	45
3.0.2.1	Derivação da Equação de Boltzmann	45
3.0.2.2	A Equação de Boltzmann em um Universo em Expansão	46
3.1	Perturbações Cosmológicas	46
3.2	Energia Escura	47
3.3	Cosmologia não homogênea - CMB	49
3.4	BAO - Oscilações Acústicas Bariônicas	49
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES</b>	<b>53</b>
4.1	O problema do RFI para Radiotelescópios	53
4.2	Simulações da temperatura da antena	54
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E PERSPECTIVAS</b>	<b>59</b>
5.1	Caracterização e Impacto da Interferência GNSS no Experimento do Uirapuru	59
5.2	Análise da Interferência e Mitigação de RFI no Contexto do Bingo	61
5.3	Mapeamento de intensidade HI	63
5.4	Impactos nos sinais cosmológicos	64

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>69</b>
<b>6.1</b>	<b>Síntese dos resultados</b> . . . . .	<b>69</b>
<b>6.2</b>	<b>Implicações e limitações do estudo</b> . . . . .	<b>69</b>
<b>6.3</b>	<b>Sugestões para pesquisas futuras</b> . . . . .	<b>70</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A – HIDROGÊNIO NEUTRO</b> . . . . .	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE B – FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO EM PYTHON</b>	<b>77</b>
<b>B.1</b>	<b>Conjunto de dados</b> . . . . .	<b>77</b>
B.1.1	Beams . . . . .	79
B.1.2	GNSS . . . . .	80
B.1.3	Noise . . . . .	83
B.1.4	Simulations . . . . .	84
B.1.5	SKY . . . . .	85
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>91</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização da importância da Radioastronomia

A radioastronomia é uma ciência que se ocupa da detecção, análise e interpretação de sinais de rádio provenientes do espaço. Através desta técnica, os radioastrônomos conseguem aprender mais sobre a estrutura de Galáxias, a formação das estrelas, bem como a radiação cósmica de fundo. Além disso, a radioastronomia permite, obter informações acerca de objetos tão distantes quanto o Big Bang. Ao usar radiotelescópios de grande diâmetro, é possível detectar sinais de rádio muito fracos, de fontes extremamente distantes, que não poderiam ser detectadas usando telescópios ópticos.

A radioastronomia é um campo de pesquisa relativamente jovem, que se desenvolveu a partir dos primeiros estudos das ondas eletromagnéticas de baixa frequência no final do século XIX. No entanto, o campo evoluiu rapidamente nos últimos anos, com o surgimento de novas técnicas e instrumentos. A área é atualmente um campo de pesquisa altamente diversificado, que abrange desde o estudo das estruturas e propriedades das fontes radioemissoras, até a investigação da história e do futuro do Universo.

As ondas de rádio compõem a radiação de menor energia e frequência do espectro eletromagnético, abrangendo atualmente a faixa de 10 MHz até 1 THz e são instrumentos para o estudo do universo pela Radioastronomia. Dessa maneira, abordamos neste trabalho o campo da astronomia que estuda a radiação eletromagnética emitida pelos objetos celestes que pode ser detectada e analisada pelos telescópios de rádio. Por meio da radiação captada pelos radiotelescópios, é possível estudar objetos como estrelas, planetas, galáxias e nebulosas, bem como a física do universo, a dinâmica das galáxias, a matéria escura, a relatividade geral, buracos negros e a radiação gravitacional. Em suma, o que se sabe sobre o universo interestelar deve-se à radiação eletromagnética.

O desenvolvimento tecnológico vem permitindo que radiotelescópios estudem emissões térmicas e não térmicas do universo. A radioastronomia, por sua vez, revelou um novo panorama ao estudo do universo e vem desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento da espécie humana. “Atualmente, a radioastronomia é uma ciência que depende de instrumentos complexos para coletar os dados, incluindo as propriedades instrumentais, vantagens e limitações” [1]. As observações, coleta de dados, desenvolvimento de aparelhos e todo o processo não são feitos de maneira individual ou em pequenos grupos; o compartilhamento de informações e a rede colaborativa fazem a radioastronomia evoluir bastante.

Para discorrer sobre os princípios desta ciência, é notável mencionar o engenheiro

de rádio Karl Jansky. Antes da detecção realizada por Jansky em 1931, outros estudiosos tentaram realizar experimentos de interferência de rádio, porém, falharam devido a falta de sensibilidade do equipamento usado na época [2]. Foi com o trabalho de Jansky, ao usar antenas direcionais para analisar interferência em fontes de rádio, que a Radioastronomia iniciou sua era. O engenheiro construiu o primeiro radiotelescópio do mundo e conseguiu captar ondas de rádio da Via-Láctea, embora com a intenção de investigar a interferência nas comunicações de rádio.

A maioria dos astrônomos da época não compreendeu a relevância do evento executado por Jansky. “A suposição mais promissora na época era que a radiação encontrada por Jansky obedecia à lei de radiação de corpo negro de Plank, portanto seria mais forte em comprimentos de onda mais curtos” [3]. Suas observações tiveram maior impacto com a comunidade científica uma década depois, quando retomadas por Grote Reber ao utilizar as ondas de rádio no levantamento do céu com o primeiro radiotelescópio refletor (com uma antena refletora parabólica de 4,75 m de raio), com aferições bem-sucedidas em 1,87 m (160 MHz). Seu trabalho foi o primeiro da área a ser publicado.

O pleno significado das observações pioneiras de Jansky e, posteriormente Grote Reber, se tornaram ainda mais aparentes com as grandes descobertas nas décadas de 50 e 60 da linha de hidrogênio de  $\lambda = 21$  cm, provindas de concentrações densas e frias de gases, a evolução de fontes de rádio distantes, quasares, pulsares, o fundo cósmico de micro-ondas e correspondendo a uma transição entre dois estados fundamentais do elétron ou da orientação do dipolo magnético. As observações da linha de hidrogênio ainda são de grande relevância na radioastronomia. Entre os primeiros avanços mais notáveis da década de 50, estão o mapeamento da estrutura da Via-Láctea e a detecção de galáxias distantes como Cygnus A e a nebulosa de Caranguejo. Este último é o primeiro corpo celeste, além do sol, identificado por ondas de rádio, mostrando, na época, que a radioastronomia poderia liderar observações de um universo distante [3].

A radioastronomia permite que pesquisadores busquem respostas para questões que vão desde a origem do universo. Esta área de pesquisa também pode ajudar a descobrir novas fontes de energia e a estudar os efeitos das radiações sobre os seres vivos. O campo continua a se expandir, a medida que novas tecnologias são desenvolvidas para rastrear fontes de rádio ainda mais distantes. Os avanços na radioastronomia contribuem para que os cientistas entendam melhor o universo no qual vivemos e, assim, tornar o futuro mais brilhante.

A Figura 1 apresenta uma imagem média de três canais de frequência centrados na galáxia de fundo SDSS J082665630 no canal de pico em  $620.0683\text{MHz}$  ( $z\Psi.2907$ ), onde a emissão de Hidrogênio neutro cosmológico (HI) da galáxia é mais forte. É um exemplo da emissão de 21 cm do HI, cuja emissão é um fenômeno astrofísico fundamental, permitindo aos astrônomos estudarem a distribuição e a dinâmica do HI em galáxias. Esse tipo de

informação é essencial para entender a formação e evolução das galáxias ao longo do tempo cósmico.

As linhas de contorno são mostradas em níveis  $[4, 4, 4.25, 4.5e5] \times \sigma$ , onde  $\sigma 10^8 [\mu] \text{Jy beam}^{-1}$  é o ruído RMS do mapa médio das frequências [4]. A imagem também mostra a média de três canais próximos centrados na frequência de pico, fornecendo uma visão mais ampla do ambiente ao redor da galáxia em questão e a parte central da imagem, representada pelo círculo vermelho, refere-se a região onde a emissão de HI é detectada com uma significância estatística de  $5\sigma$ .

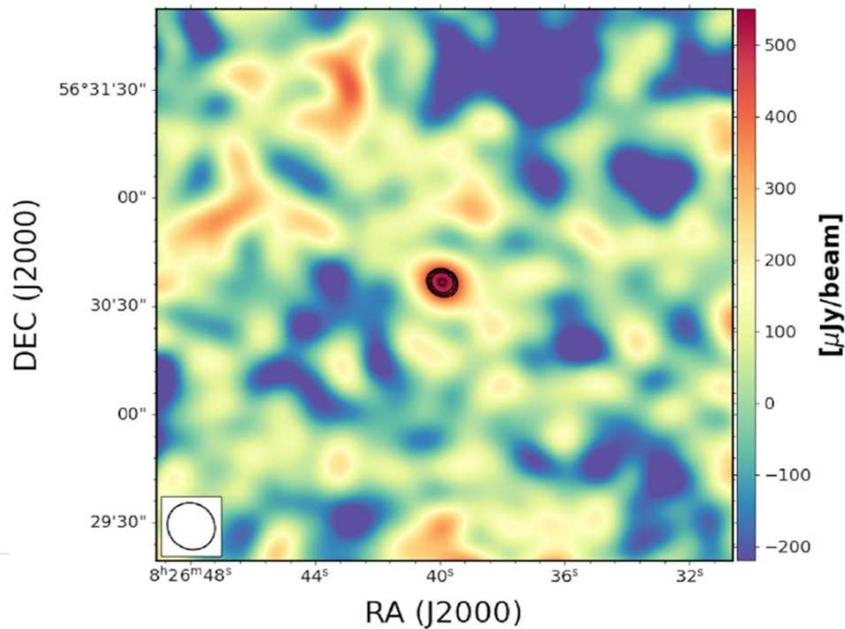


Figura 1 – Imagem em cores falsas do sinal de rádio do hidrogênio atômico da galáxia. Créditos: CHAKRABORTY e ROY/NCRATIFR/GMRT.

A elipse no canto inferior esquerdo é o feixe sintetizado, a qual representa a resolução espacial da imagem. Os contornos na imagem mostram os níveis de significância estatística da emissão de HI, definidos em termos do desvio padrão ( $\sigma$ ) da distribuição de ruído de fundo da imagem. O sinal de emissão de HI da galáxia em  $z \sim 1,3$  é claramente detectado no centro da imagem, com uma significância de  $5\sigma$ , indicando a presença de gás neutro na galáxia de fundo [4].

A detecção do sinal de emissão de HI em uma galáxia distante, conforme apresentado na Figura 1, é um importante avanço para o estudo da cosmologia e será um dos objetivos do Radiotelescópio BINGO, que será construído no sertão da Paraíba. Medidas precisas de emissão de HI em galáxias distantes são cruciais para a compreensão da história da formação de galáxias e da evolução cósmica, pois o hidrogênio neutro é um dos principais constituintes do meio interestelar.

O Radiotelescópio BINGO é uma grande construção para o avanço do estudo da cosmologia, em particular no uso da linha de 21 cm do HI. A detecção de emissão de HI em

galáxias distantes também pode ser usada para medir a distribuição espacial da matéria no universo, incluindo a distribuição de matéria escura, que não pode ser diretamente observada. Além disso, a emissão de HI é um dos principais sinais usados em estudos de intensidade de linha da radiação cósmica de fundo (CMB), fornecendo informações valiosas sobre a física do universo primordial.

## 1.2 Apresentação do Radiotelescópio BINGO

O Projeto BINGO planeja medir as Oscilações Acústicas Bariônicas (BAO) por meio de observações integradas do gás neutro. Essa iniciativa é desenvolvida no sertão paraibano, região nordeste do Brasil, e considerada uma das mais promissoras na área da cosmologia.

A estrutura do BINGO consiste em duas antenas parabólicas que concentram a radiação em um conjunto de cornetas. A radiação é então direcionada mediante um guia de onda até o receptor, descrito em detalhes em [5]. O BINGO é um telescópio de trânsito, o que significa que as antenas parabólicas são fixas e o telescópio é apontado para o norte celeste. À medida que a Terra gira, o telescópio varre o céu, permitindo que ele observe uma grande área do céu em um período relativamente curto. Essa técnica de observação por varredura é uma maneira eficiente e econômica de mapear grandes áreas do céu.

No caso do BINGO, a estratégia de observação por varredura é realizada de uma forma específica, permitindo que o céu se mova através do raio da antena e, desse modo, faz com que as somas do raio sejam mais simples e efetivas em apenas uma direção. Isso significa que, em vez de somar os sinais captados por vários pontos da antena em diferentes direções, é possível somá-los de forma mais simples em apenas uma direção. Logo, esta estratégia é importante para a medição precisa das BAOs, uma vez que permite boa resolução espacial e alta relação sinal/ruído. Atualmente, a resposta em frequência do radiotelescópio é modelada com um feixe gaussiano, embora haja planos para utilizar o perfil de projeto para a corneta em futuros trabalhos. Além disso, é utilizada uma abordagem de Intensidade Mapeamento (IM) para detectar as BAO, a qual é uma técnica promissora para a detecção dessas oscilações em grandes escalas cósmicas.

Vale destacar que, até o momento, os efeitos de polarização ainda não foram implementados (como o vazamento, por exemplo) [5]. O Projeto BINGO é, portanto, uma importante iniciativa na área da cosmologia, que contribuirá para a compreensão da evolução do universo através das oscilações acústicas dos bárions.

## 1.3 Objetivos da dissertação

O presente trabalho planeja analisar os impactos das Interferências de Rádio Frequência (RFI) gerados por satélites de posicionamento no Radiotelescópio BINGO, bem como compreender como o sinal dessas interferências é recebido pelo radiotelescópio e aprimorar a eficácia da análise para o correto funcionamento do instrumento. Dessa forma, pretende-se avaliar as formas mais eficientes de mitigação do sinal das RFIs, para filtrar apenas os sinais cosmológicos de interesse. Para tanto, será realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, além da realização de simulações computacionais e análises estatísticas para avaliar a eficácia das soluções propostas. Espera-se que os resultados deste trabalho contribuam para aprimorar as técnicas de mitigação de RFIs e favorecer para a melhoria da qualidade das observações do BINGO, bem como de outros radiotelescópios envolvidos em pesquisas similares.



## 2 Fundamentação teórica

### 2.1 Radiotelescópios

Segundo [3], a antena é responsável por converter as ondas eletromagnéticas em sinais de telecomunicações e vice-versa, permitindo a coleta de informações de corpos celestes distantes. A direção de resposta da antena é dada por um modo composto por diversos lóbulos, sendo o maior e principal lóbulo denominado de lóbulo principal, e os menores, de lóbulos secundários. Existem diferentes tipos de antenas utilizadas em radiotelescópios, tais como as antenas de feixes ou cornetas, antenas parabólicas e matrizes de fases, cada uma com suas próprias características, vantagens e desvantagens.

As antenas de feixes possuem uma geometria cônica ou piramidal com uma abertura na extremidade oposta ao cone. Além disso, são amplamente utilizadas em frequências mais altas devido ao seu ganho elevado e facilidade de construção. No entanto, possuem uma resposta de feixe mais estreita em relação a outros tipos de antenas. Já no que diz respeito às antenas parabólicas, utilizam uma superfície refletora parabólica para direcionar as ondas de rádio para um ponto focal, apresentando alta sensibilidade e ganho, além de uma resposta de feixe estreita, o que as torna ideais para observações de fontes pontuais.

As matrizes de fases consistem em várias antenas individuais que operam em conjunto para formar um padrão de radiação direcionado a uma determinada direção. Uma das principais vantagens do uso de matrizes de fases em radiotelescópios é a possibilidade de formar imagens de alta resolução do céu, com um intervalo de tempo de integração relativamente curto. A escolha do tipo de antena depende das necessidades específicas de cada aplicação, considerando fatores como a frequência de operação, o tamanho do radiotelescópio e o ambiente em que será instalado.

Os parâmetros que caracterizam o desempenho da antena incluem largura do feixe, sensibilidade, eficiência, polarização e a banda escolhida. A largura do feixe é a medição da capacidade da antena de coletar sinais ao longo da direção. A sensibilidade é a capacidade da antena em detectar sinais fracos, enquanto a eficiência refere-se à capacidade da antena de converter ondas de rádio em sinais elétricos. A polarização é a orientação do campo elétrico das ondas de rádio detectadas pela antena. A escolha da frequência é um fator crítico na concepção da antena, pois diferentes objetos celestes emitem ondas de rádio em diferentes frequências. Logo, a opção de frequência também é afetada pelas características ambientais do local de instalação da antena.

Ondas de rádio de estrelas e galáxias remotas, por exemplo, geralmente atingem algum MHz e GHz. Por outro lado, as ondas de rádio sem fio de satélites artificiais e radares

terrestres estão geralmente na faixa de frequência de algum GHz a algum THz. Em outras palavras, se houver muitas interferências eletromagnéticas no ambiente, uma frequência mais alta pode ser usada para evitar interferências. De outro modo, se o ambiente for muito barulhento ou a atenuação do sinal for relativamente alta, pode ser necessário usar frequências mais baixas para garantir uma boa qualidade de sinal. Portanto, a escolha da frequência depende da natureza dos objetos celestes de estudo e das características ambientais do uso da antena. Ao projetar antenas, os engenheiros devem considerar esses fatores para garantir que possam ser eficazes e coletar sinais com precisão.

Assim, a sensibilidade de uma antena aumenta diretamente com o aumento da área efetiva de coleta da antena, ou seja, quanto maior a antena, maior será a quantidade de energia que será coletada [3]. Além disso, a construção de grandes radiotelescópios representa um desafio técnico e financeiro significativo. A construção de uma antena com tamanho suficiente para coletar sinais de rádio de fontes remotas, como no BINGO, requer uma abundância de materiais e equipamentos especializados, além de uma equipe técnica qualificada para projetar, construir e operar o radiotelescópio.

Mais um desafio é a necessidade de localizar o radiotelescópio em um local remoto, onde não haja interferência de sinais de rádio gerados por equipamentos eletrônicos, como telefones celulares, televisores e rádios. Essa interferência pode prejudicar a capacidade do radiotelescópio de detectar sinais fracos de rádio emitidos por fontes cósmicas distantes.

Outro elemento importante em um radiotelescópio é a sua eletrônica, um componente fundamental na captação e processamento de sinais em radiotelescópios. De acordo com [3], o processamento dos sinais captados pelas antenas é uma etapa crucial para a obtenção de dados significativos em astronomia. A eletrônica é responsável por amplificar e filtrar os sinais recebidos, além de transformá-los em dados digitais que possam ser analisados por computadores.

A amplificação dos sinais é realizada por amplificadores de baixo ruído, projetados para ter um alto ganho e baixo ruído, aumentando assim a sensibilidade do sistema. Já o filtro é utilizado para separar o sinal de interesse de outros sinais que interferiram na análise, como ruídos elétricos e sinais de outras fontes. Existem diversos tipos de filtros utilizados em radiotelescópios, como filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa.

Após amplificação e filtragem, os sinais são convertidos em sinais digitais mediante conversores analógico-digital (ADC). Essa etapa é crucial para a análise dos dados, ao permitir que eles sejam armazenados e processados por computadores. A digitalização também ajuda a reduzir o ruído e a interferência no sinal. Além disso, o processamento digital dos sinais permite a aplicação de técnicas avançadas de processamento de sinais, como correlação de dados e interferometria, que possibilitam a obtenção de informações mais precisas sobre as fontes astronômicas estudadas.

Apesar de todos os desafios, os radiotelescópios são instrumentos cruciais para a astronomia moderna, uma vez que permitem aos astrônomos estudar objetos cósmicos que emitem sinais de rádio, como pulsares, quasares e galáxias distantes. Além de tudo, o uso de redes de radiotelescópios permite a formação de imagens detalhadas de objetos cósmicos, possibilitando estudos mais aprofundados sobre a física do universo.

## 2.2 Interferência de Rádio Frequência (RFI)

As bandas de ondas de rádio, em particular, têm um papel único na investigação de alguns dos objetos mais energéticos do universo, graças à emissão intensa de síncrotron não térmico gerada por elétrons relativísticos em espiral em torno de campos magnéticos. Além disso, as ondas de rádio conseguem penetrar na poeira e no gás, permitindo-nos ver galáxias e nuvens moleculares. A emissão térmica da poeira interestelar fria e a emissão livre do plasma interestelar quente também são mais bem vistas no rádio. Porém, é importante lembrar que alguns objetos só podem ser detectados em uma janela espectral específica, como o gás frio difuso na forma de hidrogênio atômico, detectado apenas porque emite ou absorve por meio da linha de estrutura hiperfina em  $\lambda = 21$  cm.

Assim, a radioastronomia tem sido uma ferramenta importante para desvendar os mistérios do universo e tem proporcionado avanços significativos na nossa compreensão do cosmos. Além de que, desempenha um papel fundamental na identificação de novos objetos astronômicos e na investigação de processos físicos que ocorrem no universo. Diante disso, os radiotelescópios modernos, como o Expanded Very Large Array (EVLA) no Novo México, o Low-Frequency Array (LOFAR) na Holanda, o Murchison Widefield Array (MWA) na Austrália [6] e o futuro Radiotelescópio BINGO que será construído no sertão da Paraíba, são radiotelescópios sensíveis e com uma profunda visão do universo.

Com o aumento do número de radiotelescópios em operação, surge a preocupação com a interferência de RFI nos sinais astrofísicos. A RFI pode ter um impacto significativo na detecção, processamento e análise de sinais astronômicos, uma vez que esses sinais são geralmente muito fracos. Para mitigar esse efeito, os astrônomos utilizam várias técnicas, como filtragem de sinais, bloqueio de frequências e o uso de antenas direcionais. Portanto, a capacidade de um sistema de radioastronomia de detectar, processar e analisar sinais astronômicos é crucial para a busca contínua por novas descobertas na radioastronomia.

Os sinais astrofísicos são bastante fracos e sofrem interferência de Radiofrequência (RFI) antes de serem detectados pelos radiotelescópios. A RFI é definida como a emissão de energia no espectro de frequência de radioastronomia. Esses sinais podem ser fortes o suficiente para interferir com o sinal astronômico, e a interferência de RFI pode ter um efeito significativo sobre a capacidade de qualquer sistema de radioastronomia de detectar, processar e analisar sinais astronômicos. A RFI é causada por fontes naturais e artificiais

que emitem radiação em frequências de rádio próximas às usadas para a radioastronomia. Para reduzir as chances de RFI, os astrônomos usam uma variedade de técnicas, como o uso de antenas direcionais, filtragem de sinais e bloqueio de frequências.

No contexto do BINGO, cuja a óptica é detalhada por [5], o padrão do feixe é crucial. Considera-se que o feixe do radiotelescópio corresponde à posição central obtida pelo software Ticsra GRASP<sup>1</sup>. O feixe pode ser descrito como o feixe de uma abertura iluminada com uma configuração de correntes. O padrão do feixe pode ser dado pela transformada de Hankel da distribuição de corrente [7]. Nas simulações dos feixes para os dois instrumentos apresentadas, utilizou-se um feixe principal com um Full Width at Half Maximum (FWHM) de aproximadamente 15°.

O gráfico da figura 2 revela a variação das amplitudes dos feixes medidos no radiotelescópio Uirapuru em relação ao ângulo de desvio ( $\theta$ ) para diferentes frequências. Cada curva no gráfico representa uma frequência específica e mostra como a amplitude do feixe varia à medida que o ângulo de desvio aumenta. Esse tipo de visualização é útil para avaliar a qualidade e o desempenho dos feixes do radiotelescópio, identificar padrões de interferência ou ruído, e otimizar a configuração do telescópio para obter melhores resultados em estudos astronômicos específicos.

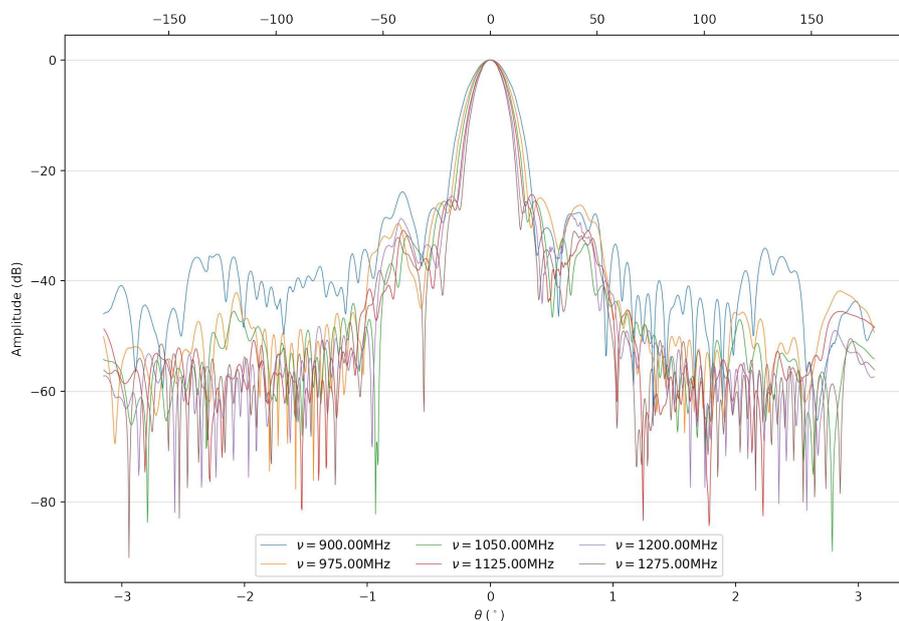


Figura 2 – Feixe do Uirapuru medido para polarização horizontal. Isso é feito com dados de medições LIT. Foi escolhido um conjunto de dados específico com polarização horizontal.

Analisando as figuras 2 e 4 é possível observar um conjunto de curvas que representam as amplitudes dos feixes para diferentes frequências ( $\nu$ ) do sinal. Essas curvas

<sup>1</sup> <https://www.ticra.com/software/grasp/>

apresentam variações suaves e oscilações em suas amplitudes à medida que o ângulo  $\theta$  aumenta. É importante notar que as variações nas amplitudes dos feixes podem indicar a direcionalidade e o comportamento do sinal irradiado ou recebido pelas antenas.

Essas figuras permitem determinar como o satélite é visto em função do ângulo de visão em diferentes frequências, assim podemos analisar o comportamento das curvas, a relação entre a frequência e o padrão da radiação e o nível de ruído.

Na astronomia do BINGO, o FWHM é utilizado para analisar o perfil de linhas espectrais, ou seja, a distribuição da intensidade do sinal ao longo de diferentes comprimentos de onda da luz. A análise do perfil da linha espectral pode fornecer informações importantes sobre as propriedades físicas da fonte emissoras de luz, tais como a sua temperatura e densidade.

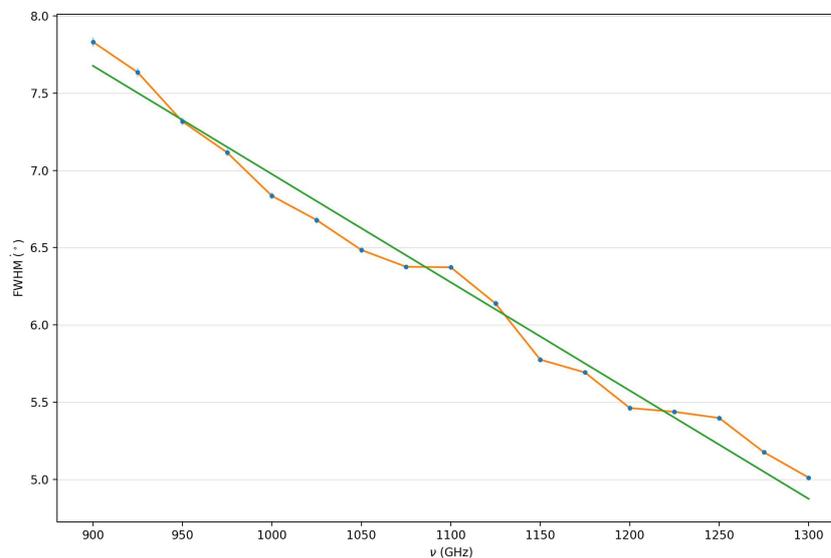


Figura 3 – Resultados ajustados da flutuação do feixe do Uirapuru no parâmetro FWHM. A linha verde é um ajuste linear.

A figura 3 apresenta a largura do feixe, representada pelo FWHM para diferentes frequências, como também, a largura do feixe da antena em questão na metade de sua amplitude máxima em relação a diferentes frequências. Nesse gráfico são apresentadas três curvas: os pontos em azul representam os valores observados, a curva em laranja representa uma aproximação da largura do feixe obtida a partir de uma função, e a curva em verde representa uma aproximação linear da largura do feixe em relação às frequências.

A partir desses dados, é possível comparar a largura do feixe do radiotelescópio Uirapuru em diferentes frequências, bem como a análise da função de ajuste para o feixe linear. Isso auxilia na compreensão do desempenho e das características do feixe do radiotelescópio em relação à frequência de operação.

Seguindo a discussão sobre aberturas circulares em [1], a modelagem do feixe do radiotelescópio é baseada em uma função de iluminação gaussiana em uma abertura

circular, convertida em um modelo de feixe por integração numérica. Esta função de iluminação gaussiana é definida como o meio quadrado exponencial negativo da distância radial normalizada ao diâmetro da antena, dada pela equação:

$$E(\rho) = e^{-\frac{1}{2}\frac{\rho^2}{\sigma^2}}. \quad (2.1)$$

O parâmetro  $\sigma$  controla a largura do decaimento gaussiano da função de iluminação gaussiana e um FWHM medido em LIT como função da frequência (3) para diferentes frequências entre 900 – 1300MHz usando o feixe do UIRAPURU. Podemos expressar esse FWHM como

$$FWHM = \frac{2\sqrt{2\ln 2}}{\sigma} \quad (2.2)$$

onde  $\sigma$  é o desvio padrão da distribuição. No caso do projeto BINGO, o FWHM medido em Laboratório de Integração e Testes (LIT) para o feixe do UIRAPURU foi utilizado para comparar com o feixe simulado pelo BINGO, permitindo avaliar a qualidade do feixe gerado pelo radiotelescópio.

O FWHM é um parâmetro comumente utilizado em análises de dados astronômicos para caracterizar a largura de uma distribuição de intensidade ou brilho. Especificamente, o FWHM é a medida da largura de um pico ou perfil de um sinal, medido na metade da amplitude máxima. Em outras palavras, é a largura da região central de um sinal, onde a intensidade ou brilho é maior que a metade do valor máximo.

Esse parâmetro é útil na caracterização de feixes de radiotelescópios, permitindo a avaliação da qualidade do feixe e sua resolução angular, além de ser uma medida importante para a caracterização de instrumentos astronômicos, como telescópios e radiotelescópios, utilizados para determinar a resolução angular dos mesmos. A resolução angular é uma medida da capacidade de um instrumento para distinguir entre duas fontes próximas no céu, ou seja, para separar objetos que estão próximos. É uma medida importante para a realização de observações astronômicas de alta qualidade e para a interpretação dos dados obtidos [1].

As flutuações do feixe do UIRAPURU nas frequências 960 – 1300MHz são representadas pelas linhas pontilhadas verde e azul na figura 4, enquanto as linhas contínuas laranja e vermelha representam o ajuste nessas mesmas frequências, compreendendo a região próxima a 0° do lóbulo principal em uma amplitude de até  $-3dB$ . Isso permite uma análise mais precisa das flutuações de temperatura do receptor e do feixe, o que pode ser utilizado para melhorar a qualidade das observações e a eficiência do radiotelescópio.. Para isso, foi escolhido um conjunto de dados específico com polarização horizontal e realizado o processo de medição para o feixe do Uirapuru. As figuras 4 e 6 mostram os resultados desse processo para os dois radiotelescópios, utilizando o método descrito por [8].

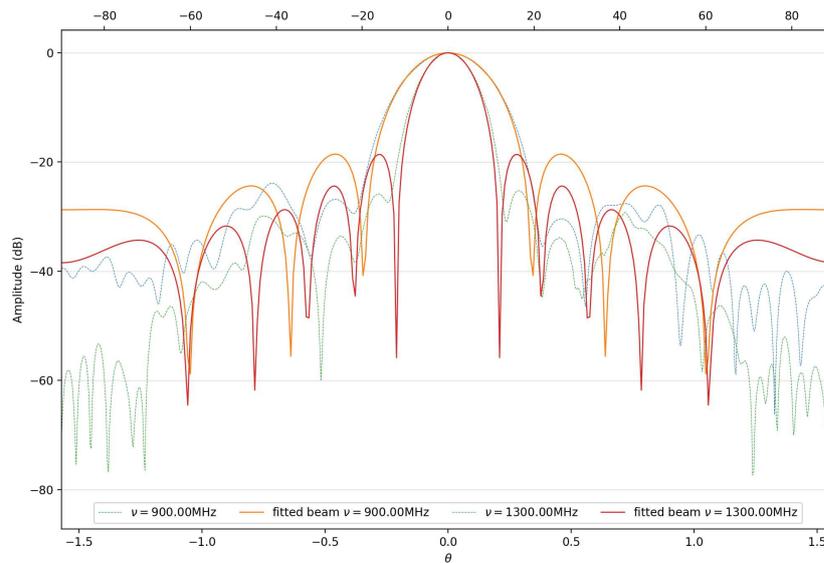


Figura 4 – Feixe gaussiano cônico ajustado aos dados do Uirapuru. Os resultados apresentam boa concordância no lóbulo principal e nas posições dos lóbulos laterais, embora estes sejam mais altos que os medidos.

Outro aspecto relevante que se pode observar para os gráficos do feixe do Uirapuru e do BINGO é o nível de ruído medido em diferentes ângulos, o que pode ser fundamental para a análise da qualidade do sinal recebido pela antena. Dessa forma, é possível identificar o nível de interferência que pode afetar o sinal e, conseqüentemente, a qualidade do serviço prestado.

Também é importante ressaltar a relevância de observar a escala utilizada no eixo y, que representa a amplitude em dB. A escala logarítmica é comum nesse tipo de gráfico, uma vez que a amplitude pode variar por várias ordens de magnitude e a escala logarítmica permite uma melhor visualização dessas variações.

O gráfico das figuras 5 e 7 apresentam o ganho da antena em função da frequência. Os pontos representam as medições do ganho do radiotelescópio Uirapuru em diferentes frequências. O eixo x representa a frequência em GHz, enquanto o eixo y representa o ganho em dB. Além dos pontos de dispersão, é plotada uma curva que representa o ajuste linear do ganho em relação às frequências.

O ganho de uma antena é a medida da direcionalidade do feixe, ou seja, a capacidade da antena de concentrar a energia em uma determinada direção em detrimento de outras [7]. Nesse gráfico, é apresentado o ganho em decibéis (dB) em relação às diferentes frequências. Duas curvas são apresentadas: a curva em vermelho representa o ganho não assumindo nenhuma relação específica entre o ganho e a frequência, enquanto a curva em azul representa o ganho obtido a partir de uma regressão linear.

O padrão de feixe normalizado é obtido pela transformada de Hankel da configuração de campo na abertura [7]:

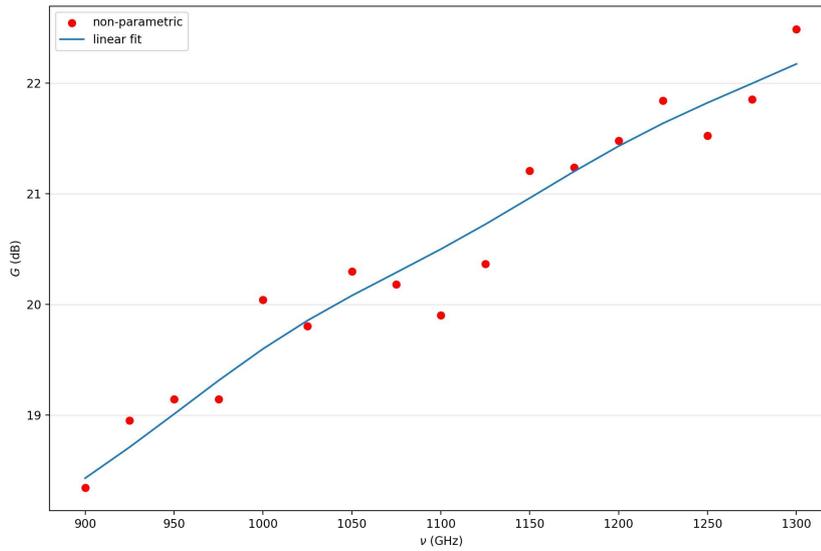


Figura 5 – Ganho do Uirapuru em função da frequência. A linha contínua corresponde ao ajuste linear FWHM.

$$B_\nu(\theta) = \frac{\int_0^D E(\rho) J_0(2\pi \sin \theta \rho) \rho d\rho}{\int_0^D E(\rho) \rho d\rho}. \quad (2.3)$$

Ajustamos os feixes para cada frequência encontrando o FWHM de melhor assentamento com os dados. Não tentamos modelar a dependência da frequência, mas consideramos os parâmetros para cada frequência por meio de uma interpolação pipeline das frequências ajustadas. Dessa forma, evitamos introduzir artefatos de ajuste no perfil do feixe.

Calculamos o ganho  $G(\nu)$ , que é a relação da área de uma esfera e a integral da equação 2.3 em todas as co-latitudes, Como:

$$G(\nu) = \frac{4\pi}{2\pi \int B_r(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (2.4)$$

Os resultados podem ser encontrados nas figuras 5 e 7 para Uirapuru e BINGO, respectivamente. A interpolação linear para FWHM e tamanho de abertura mostrada nas figuras tem apenas fins ilustrativos. Assim como a figura 5, a figura 7 apresenta novamente o ganho em função da frequência, mas agora para o BINGO. Os resultados apresentados nas duas imagens são importantes para avaliar a eficiência dos radiotelescópios em coletar a radiação emitida pelo satélite, o que permite determinar como o satélite é visto em função do ângulo de visão e da frequência, além de auxiliar na compreensão das características de desempenho do radiotelescópio em relação à frequência de operação e na avaliação da adequação do ajuste linear para descrever o comportamento do ganho.

Os gráficos gerados nesta seção fornecem informações sobre a capacidade de cada antena em emitir e receber sinais em diferentes frequências. Além disso, a comparação

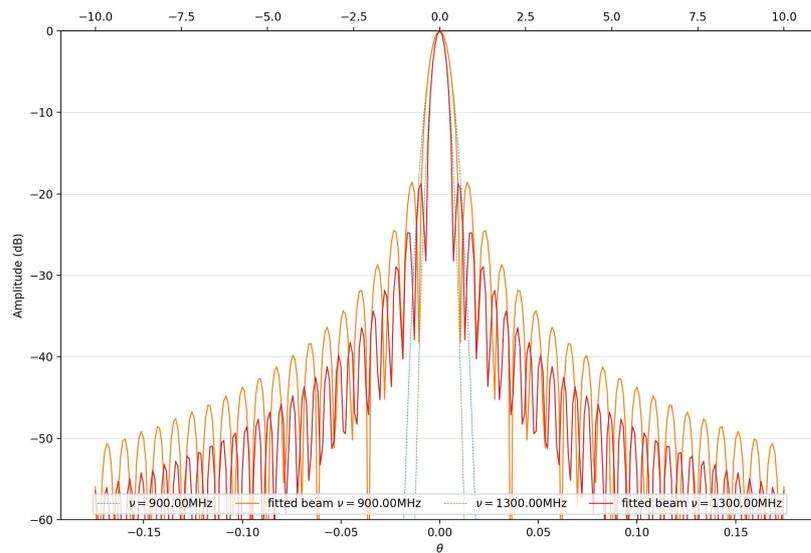


Figura 6 – Feixe gaussiano ajustado ao feixe simulado BINGO.

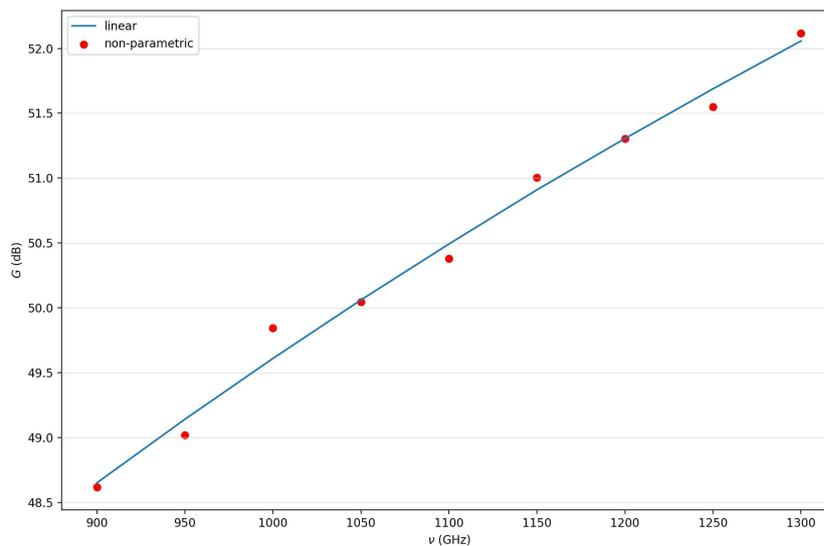


Figura 7 – Ganho para feixe de bingo. A linha sólida indica um ajuste linear FWHM. Os eixos x e y, indicam a frequência em GHz e o ganho em dB, respectivamente; os pontos representam as medições do ganho do radiotelescópio Uirapuru em diferentes frequências e o eixo y é definido como “G” para denotar a medida do ganho.

entre o ganho da antenna linear e o não paramétrico permite avaliar a eficácia do ajuste linear no ganho em relação à frequência. Logo, os resultados apresentados são importantes para avaliar a eficiência dos radiotelescópios em coletar a radiação emitida pelo satélite, o que permite determinar como o satélite é visto em função do ângulo de visão e da frequência.

Já no que diz respeito a análise dos feixes, esta, visa aferir a direção e intensidade do feixe emitido pela antenna, a fim de identificar se há alguma direção específica onde o feixe é mais intenso, os chamados lóbulos principais, se há direções onde a radiação é menor, ou ainda outras características específicas no padrão de radiação.

Outro aspecto relevante que a se observar na curva é o nível de ruído medido em diferentes ângulos, o que pode ser fundamental para a análise da qualidade do sinal recebido pela antena. Dessa forma, é possível identificar o nível de interferência que pode afetar o sinal e, conseqüentemente, a qualidade do serviço prestado.

## 2.3 Satélites GNSS

De acordo com [9], o desenvolvimento tecnológico nos observatórios e a detecção e mitigação de sinais interferentes em observações astronômicas tornaram-se partes importantes da análise de dados.

O espectro eletromagnético na faixa do rádio é regulamentado pela ITU (União Internacional de Telecomunicações). O grupo interno da ITU responsável por regular a radioastronomia, aspectos da pesquisa espacial, monitoramento ambiental e padrões de tempo e frequência é a Science Services. É um grupo que estuda problemas de importância atual na organização de frequências, além de produzir recomendações documentadas sobre as soluções e serviços [9].

O sistema GNSS (Serviços Globais de Navegação por Satélite) é o conjunto de satélites compostos pelo GPS (Sistema de Posicionamento Global pertencente aos EUA), GLONASS (Sistema de Navegação Global por Satélite Russo), GALILEO (Sistema de Navegação por Satélite da União Europeia) e BeiDou (Sistema Chinês de posicionamento global por satélite), responsáveis pela localização de pontos terrestres.

Os GNSS transmitem informações específicas sobre a posição e velocidade dos usuários finais, as quais são usadas para calcular a posição dos usuários finais em relação ao sistema GNSS. Este sistema GNSS é usado em navegação e geofencing, monitoramento de veículos, localização de pessoas e objetos, identificação e rastreamento de alvos, entre outros. Os GNSS também podem ser usados para medições geométricas precisas, além das aplicações civis, são usados para fins militares, como navegação de precisão, direção de fogo e vigilância.

As emissões de GNSS podem causar interferências gravíssimas nos Serviços de Radioastronomia, uma vez que as fontes RFI terrestres estão geralmente em regiões dos lóbulos laterais e provavelmente com ganho maior [10]. Cada satélite emite uma determinada radiação e devemos considerar a órbita da Terra e o arrasto da atmosfera.

O impacto dos GNSS em levantamentos de mapeamento de intensidade foi descrito por [8] com foco em SKA e MeerKat. Neste trabalho, revisitamos esses achados para avaliar como o GNSS pode impactar as medidas que serão realizadas em um futuro próximo com o radiotelescópio BINGO [5].

Abordamos o assunto de forma muito semelhante a discussão anteriormente citada

para o SKA, com algumas diferenças importantes destacadas no texto, tornando esta análise mais adequada ao instrumento alvo.

A análise do impacto dos satélites GNSS em operação é importante para radiotelescópios, como o Urapuru, o qual consiste em uma única buzina BINGO apontada para o céu. Este radiotelescópio é utilizado como campo de testes para o radiotelescópio principal e também para a rede de estabilizadores que estarão ao redor do BINGO. As características eletromagnéticas do instrumento estão descritas em [11]. Dessa forma, devemos nos concentrar nas quatro maiores constelações globais (GPS, GLONASS, GALILEO e BEIDOU) e considerar apenas órbitas terrestres médias (MEO), já que estamos preocupados com passagens de satélites no feixe principal do telescópio.

Os elementos NORAD de duas linhas foram obtidos para o satélite em questão, considerando o modelo completo de perturbações simplificado (SGP4) na elaboração das órbitas. Isso nos permite obter órbitas precisas, considerando não apenas os parâmetros nominais da órbita, mas também perturbações decorrentes da forma da Terra, arrasto, radiação e gravitação de outros corpos celestes. Órbitas realistas são importantes para compreender alguns dos efeitos de longo prazo dos satélites e não confundi-los com efeitos irreais. Assim, os gráficos apresentados neste trabalho são úteis para entender como as diferentes distâncias angulares entre os objetos observados e o eixo principal do feixe afeta a resposta do receptor do radiotelescópio.

### 2.3.1 Potência do sinal dos Satélites

A potência do sinal dos satélites GNSS pode variar consideravelmente entre diferentes constelações, serviços e até mesmo entre diferentes blocos de satélites. Por exemplo, as frequências de transmissão dos satélites GPS variam de L1 a L5, enquanto as frequências dos satélites GLONASS variam de G1 a G3 e as frequências dos satélites Galileo variam de E1 a E6. Cada constelação fornece vários serviços dentro de cada frequência de transmissão.

Para avaliar os efeitos da interferência dos sinais GNSS nos telescópios, é necessário modelar a Densidade Espectral de Potência (PSD) desses sinais em diferentes frequências. Essa modelagem é realizada com o uso de diferentes modelos de distribuição de PSD, que variam conforme a complexidade do esquema de modulação utilizado para codificar o sinal GNSS. Para o caso mais simples de modulação de fase binária (BPSK), a distribuição de PSD é descrita por uma função simples de  $\text{sinc}^2$ . No entanto, para esquemas de modulação mais avançados, são utilizados modelos mais complexos.

É possível também descrever a temperatura de brilho de um satélite, em uma dada frequência observada pelo telescópio, como a convolução do feixe com a densidade de fluxo espectral, conforme a seguinte equação:

$$T_B(\Omega, \nu) = G_r(\nu) B_r(\nu, \Omega - \Omega_0) \left( \frac{c^2}{4\pi\nu^2 k_B \delta\nu} \right) S[\nu] \quad (2.5)$$

Nessa equação,  $G_r$  e  $B_r$  representam, respectivamente, o ganho e o padrão normalizado do feixe do radiotelescópio. O parâmetro  $\Omega_0$  indica o eixo apontador e  $\Omega$  é uma posição angular escolhida no céu.

Para a simulação do sinal GNSS em relação a sua contribuição na temperatura da antena do telescópio, o pipeline utilizado envolve diversas etapas e entre elas, destaca-se a modelagem do feixe do telescópio, a convolução com o sinal GNSS de cada satélite em intervalos de tempo e frequência, e a criação de dados de saída que representam o sinal final esperado pelo telescópio.

As simulações realizadas visam avaliar o efeito da presença de satélites GNSS na pesquisa de mapeamento da intensidade de HI em dois instrumentos específicos. Para isso, um modelo simplificado de receptor, conforme descrito na equação 2.5, é utilizado. Esse modelo considera não apenas o ganho do feixe em qualquer direção, mas também as contribuições de temperatura da antena de cada satélite na posição  $\omega$  em um determinado instante e frequência. Desse modo, é necessário considerar a temperatura de brilho para cada satélite com o sinal correspondente e, em seguida, somar todas as contribuições para determinar o efeito geral dos satélites no sinal observado.

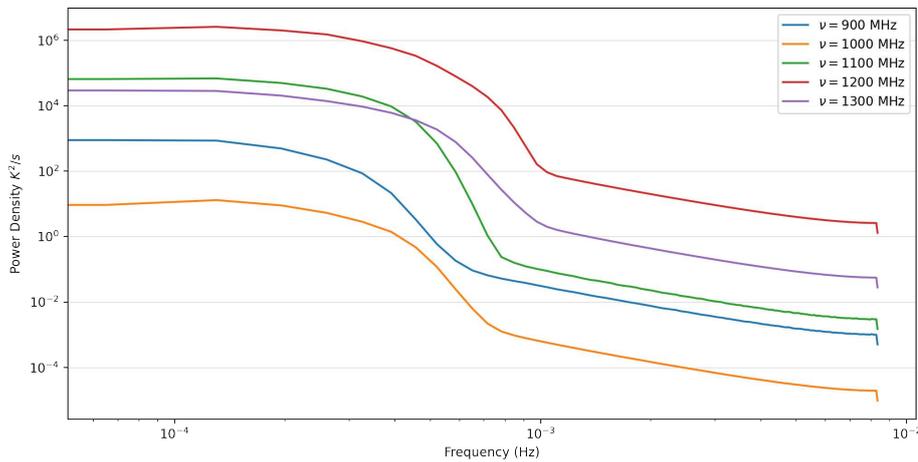


Figura 8 – Densidade de potência do sinal do UIRAPURU. A variação indica a duração de uma passagem no feixe do radiotelescópio.

As imagens 8 e 21 foram geradas a partir dos modelos de distribuição de PSD para diferentes esquemas de modulação de sinais GNSS em uma média de trinta dias. O objetivo é obter a PSD do sinal em cada uma das frequências (900 MHz, 1000 MHz, 1100 MHz, 1200 MHz e 1300 MHz). Os dados mostram o que ocorre com a passagem dos satélites. Na Figura 8, observa-se uma queda temporal na densidade de potência durante

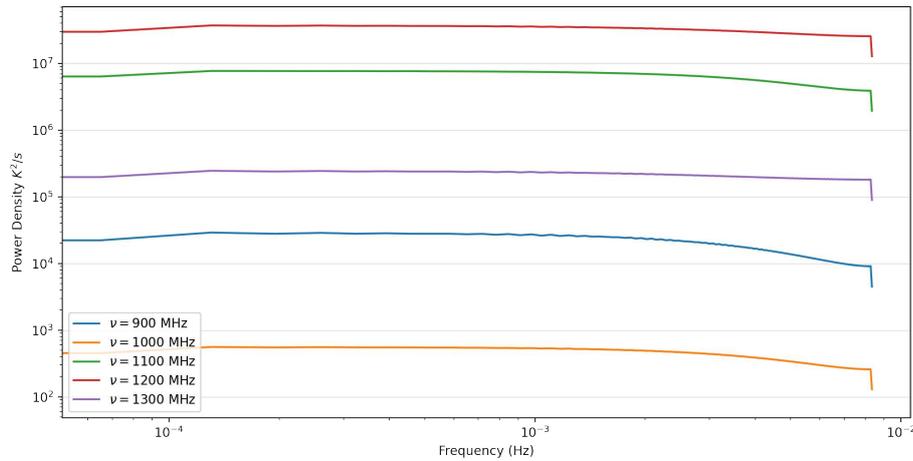


Figura 9 – Densidade de potência para sinais no feixe inferior do BINGO. A buzina do BINGO tem um FWHM pequeno comparado ao Uirapuru, a passagem do satélite é muito rápida.

a passagem do satélite no Uirapuru. Por outro lado, na Figura 21, a passagem é rápida, uma vez que o tamanho do feixe do sistema óptico do BINGO ser de  $1^\circ$ .

É usada uma escala logarítmica que permite uma melhor visualização e comparação dos valores em uma ampla faixa dinâmica. Cada curva no gráfico representa a densidade espectral de potência em relação à frequência para uma das frequências analisadas. O eixo horizontal mostra a faixa de frequências, enquanto o eixo vertical representa a densidade espectral de potência em  $K^2/s$ .

Comparando as curvas para as diferentes frequências, é possível identificar diferenças nas características do sinal em cada frequência. Por exemplo, se uma determinada frequência apresentar uma densidade espectral de potência significativamente maior em relação às outras, isso indica uma maior concentração de energia nessa frequência específica.

Além disso, a comparação das curvas também pode revelar padrões ou tendências gerais nas variações da densidade espectral de potência em diferentes faixas de frequência.

### 2.3.2 Sinais GNSS e suas órbitas

Existem diversas faixas protegidas para a radioastronomia, as quais possuem diferentes níveis de proteção. Essas faixas são regulamentadas pela ITU (União Internacional de Telecomunicações) [10]. As bandas primárias, por exemplo, nas quais a radioastronomia é a usuária primordial, são particularmente preservadas, de modo que nenhuma outra transmissão pode ocorrer dentro dessas faixas. No entanto, bandas vizinhas podem gerar interferência, seja por meio dos lóbulos laterais ou em modulação cruzada, conforme mencionado em [12].

Os satélites de posicionamento GNSS são considerados uma barreira significativa

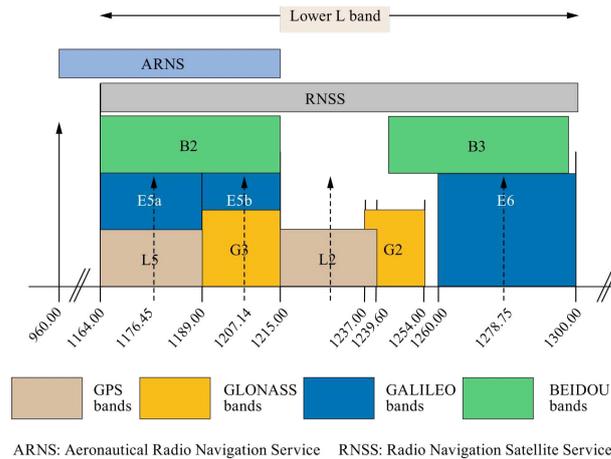


Figura 10 – Alocações dos satélites GNSS.

na captação de sinais radioespaciais, ao operarem em frequências próximas às bandas de radioastronomia. Essas fontes de RFI são percebidas pelos radiotelescópios como fontes de rádio convencionais, dificultando a recepção de sinais de rádio cósmicos [12].

A radiação cósmica que chega ao nosso planeta é extremamente fraca, exigindo que os radiotelescópios possuam altíssima sensibilidade, tornando-os extremamente suscetíveis a interferências, inclusive de frequências out-of-band (OoB). Na faixa de frequência do BINGO, as principais fontes de RFI são os sinais GNSS, que apresentam interferências de banda estreita. Conforme [10], os PFDs (Powers Flux Density) médios desses sinais em locais onde observatórios relativamente isolados estão instalados geralmente excedem  $-100\text{dB}(W/m^{\circ})$ . No entanto, é importante notar que esses sinais GNSS, bem como as efemérides correspondentes, são documentados (pelo menos parcialmente). Essa informação disponível é crucial, pois podem levar a informações técnicas sobre RFI, tornando-as muito eficientes [12].

Tabela 1 – Frequência de alocação para os satélites: GPS, GALILEO, GLONASS E BEIDOU.

Constelação	Banda	$\nu(\text{MHz})$	PSD	$\nu_0(\text{MHz})$	Power(dBm)
GPS	L5-I5	1176.45	BPSK(10)	1.023	-154.0
	L2-L2C	1227.6	BPSK(1)	1.023	-158.5
	L2-P(Y)	1227.6	BPSK(10)	1.023	-158.5
	L2-M	1227.6	BOCs(10,5)	1.023	-158.5
GALILEO	E5a-I	1191.79	altBOC(15,1)	1.023	-158
	E6B	1278.75	BPSK(5)	1023	-158
	E6A	1278.75	BOCc(10,5)	1.023	-158
GLONASS	L3OC-I	1202.025	BPSK(10)	1.023	-161
	L2OC	1248.06	BPSK(1)	0.5115	-161
	L2OC	1248.06	BOC(1,1)	0.5115	-161
	L2SC	1248.06	BOC(5,2.5)	0.5115	-161
BEIDOU	B2I	1191.795	ALTBOC(15,10)	1.023	-163
	B3	1268.52	BPSK(10)	1.023	-163
	B3-A	1268.52	BOC(15,2.5)	1.023	-163

As transmissões do sistema global de navegação por satélite (GNSS) são caracterizadas por diferentes alocações de frequência, com cada constelação possuindo sua própria nomenclatura para essas alocações. Por exemplo, as alocações de frequência do GPS são denominadas L1, L2 e L5, em ordem decrescente de frequência. As alocações do GLONASS são G1, G2 e G3, enquanto as alocações do Galileo são E1, E5 e E6. Geralmente, cada alocação de constelação oferece dois ou três serviços, referidos como códigos de Precisão (P), Aquisição Bruta (C/A) e Militar (M). A Tabela 1 apresenta acima mostra um resumo das alocações de serviço de satélite utilizadas nessas simulações, incluindo cobertura de frequência, saída de energia típica e respostas PSD esperadas, conforme as regulamentações da ITU [9] e fornece uma visão geral das características dos sinais de satélite GNSS que podem impactar as medições de intensidade de sinal de rádio realizadas por radiotelescópios, fornecendo informações úteis para o planejamento e análise do experimento BINGO.

A constelação GPS é composta por vinte e quatro satélites em órbita circular com raio orbital de  $26.559km$  e período de revolução de  $T = 11h58m$ . As órbitas são organizadas em seis planos orbitais igualmente espaçados em relação à sua inclinação em torno do eixo de rotação da Terra. A trilha do satélite se repete diariamente desde o período de meio-dia sideral, mas a forte influência de forças ressonantes exige manobras frequentes de manutenção da estação de satélite.

Desde 1978 até o presente, 67 satélites GPS foram lançados com sucesso e existem atualmente quatro tipos de satélites em órbita. Para fins deste estudo, consideraremos que todos os satélites têm a mesma alocação de frequência e potência de transmissão.

As frequências do sinal GPS são conhecidas como  $L1 = 1.575.42MHz$ ,  $L2 = 1276.6MHz$  e  $L5 = 1176.45MHz$ . Não serão considerados sinais L1, pois estamos interessados na banda de frequência  $900 - 1300MHz$ , onde esse sinal tem intensidade desprezível. Para cada frequência, há um número de sinais emitidos com modulações específicas, conforme o plano de alocação apresentado na tabela 1.

O GLONASS é um sistema de navegação global operado pela Federação Russa, composto por 24 satélites distribuídos uniformemente em três planos orbitais, a uma altitude de  $h = 19.100km$  e com um período  $T = 11h15min44s \pm 5s$ . A constelação não sofre influência de forças ressonantes do campo gravitacional da Terra, e o início de cada órbita se desloca em relação à superfície da Terra, passando pelo mesmo ponto a cada oito dias. Destaca-se que nem todos os parâmetros dos sinais de serviço GLONASS são divulgados publicamente. As frequências são:  $L1 = 1.575.42MHz$ ,  $L2 = 1248.06MHz$  e  $L3 = 1202.025MHz$ , e há um sinal L5 planejado ainda não implementado,  $L5 = 1176.45$ .

No que diz respeito a constelação GALILEO, é o resultado de um estudo detalhado e otimizado, é atualmente composta por 28 satélites distribuídos em três planos orbitais, com altitude de  $h = 23.222km$  e período orbital correspondente de  $T = 14h0min42s$ .

Essa disposição permite que os satélites completem 17 órbitas a cada 10 dias siderais, garantindo que eles passem sobre o mesmo ponto na superfície da Terra em intervalos regulares.

Por outro lado, a constelação BEIDOU utiliza um design de constelação que combina elementos de outros sistemas globais e regionais, com satélites em órbitas MEO e cinco órbitas geoestacionárias. Neste contexto, estamos focando somente nas órbitas MEO, onde estão dispostos 24 satélites em três planos orbitais com altitude de  $h = 21.530km$ , que completam 13 revoluções em sete dias siderais. Para a constelação BEIDOU, estamos considerando as frequências do sinal  $B2 = 1207MHz$  e  $B3 = 1268.52MHz$ .

Para simular as transmissões GNSS, a estratégia de observação adotada inclui uma varredura de deriva separada. O código utilizado para realizar essas simulações é o mesmo descrito em [8]. Já para simulações de ponta a ponta do RFI esperado das transmissões GNSS, é necessário consultar o código de simulação a fim de obter informações necessárias sobre a estratégia de observação utilizada.

Recuperamos o conjunto de elementos de duas linhas do NORAD para os satélites selecionados do celestrak [13] e usamos o pacote skyfield [14], que considera o modelo de perturbações simplificado completo (SGP4) para construir as órbitas. Com essa abordagem, obtivemos órbitas precisas, considerando não somente os parâmetros nominais da órbita, mas também perturbações devido à forma da Terra, arrasto, radiação e gravitação de outros corpos.

Observações GNSS são raramente feitas em planos de eixo azimutal, em razão da dificuldade de coleta de dados GNSS em áreas densamente povoadas. Em planos ortogonais ao plano orbital, a densidade de satélites é a mesma em todos os lados, resultando em observações mais densas de satélites. Contudo, uma densidade de satélites muito elevada pode acarretar uma sobrecarga de informações indesejadas.

A densidade de satélites em uma órbita realista é um fator importante a ser considerado para entender os efeitos de longo prazo dos satélites e evitar confusão com periodicidades irrealistas de órbitas. Foi usado um algoritmo de interpolação KDE (Kernel Density Estimation) para definir a densidade de satélites na esfera celeste, em coordenadas equatoriais, como mostrado na Figura 11. A densidade de satélites próximos ao equador é muito alta, como visto na imagem do céu observado pelo radiotelescópio Uirapuru, o que pode causar grande influência no Feixe Uirapuru e potencialmente afetar a ciência do BINGO. As sombras na figura correspondem à densidade de satélites em graus quadrados, tomadas em um período de 48 horas com uma resolução angular de  $1^\circ$  quadrado.

A passagem de cada satélite é referente a um ângulo de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  com respeito ao apontamento do instrumento. A imagem considera o céu observado pelo radiotelescópio Uirapuru que está em uma latitude muito próxima ao BINGO e mostra que a densidade de

satélites próximos ao equador é muito alta, causando grande influência no Feixe Uirapuru. Para a declinação do BINGO, podemos esperar que cada feixe veja um céu diferente, potencialmente perigoso para a ciência.

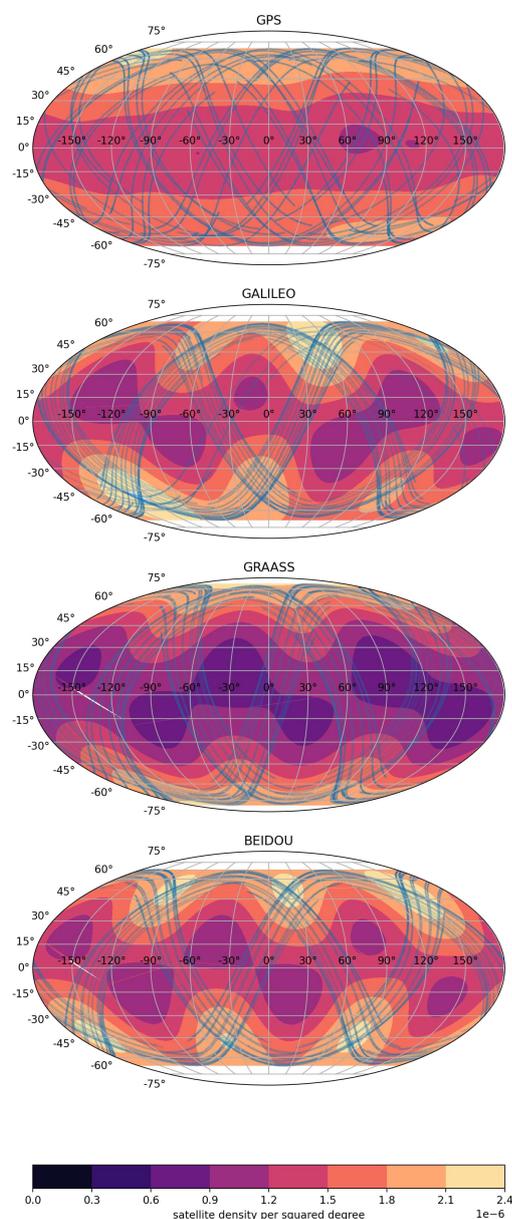


Figura 11 – Órbitas e densidade de satélites GNSS por grau quadrado ao longo de 48 horas. A figura mostra que a densidade de satélites próximos ao equador é muito alta, causando grande influência no Feixe Uirapuru. Para a declinação do BINGO, podemos esperar que cada feixe veja um céu diferente.

A representação gráfica da densidade de satélites GNSS na esfera celeste apresentada na figura 11 permite inferir que quanto mais escuro o tom do gráfico, maior é a densidade de satélites naquela região e as órbitas dos satélites são indicadas pelas linhas contínuas. Para construir esse gráfico, realizamos uma interpolação KDE e definimos um intervalo de 48 horas para calcular as posições de apontamento do radiotelescópio Uirapuru, assumindo que este se encontrava em trânsito com coordenadas horizontais fixas. Assim, obtivemos

um conjunto de dados que contém informações sobre o tempo, coordenadas equatoriais e ângulo entre o feixe e as constelações.

Durante o experimento, cada satélite GPS traça quatro linhas na figura 11, uma vez que a constelação GPS possui órbita de 12 horas siderais com órbitas fixas [8]. Observa-se que a densidade de satélites GNSS não é homogênea, sendo as regiões próximas dos polos geográficos mais propícias para observações, pois a densidade de satélites é menor nesses locais em comparação com as regiões próximas do equador. Além disso, a figura evidencia que os sinais GNSS são significantes na emissão de RFI em todas as regiões da esfera celeste onde o feixe do radiotelescópio é apontado, considerando as quatro constelações.

## 2.4 Radiotelescópio Uirapuru

O Uirapuru (figura 12) é um radiotelescópio auxiliar ao BINGO que consiste em uma corneta apontada diretamente para o céu capaz de detectar sinais de energia na frequência do rádio, cujo principal objetivo é apoiar as pesquisas da detecção rápida de rádio. É a mesma corneta usada no radiotelescópio BINGO e descrito em [15].

O instrumento está instalado no município de Campina Grande, na Paraíba. Sua construção envolveu uma série de desafios técnicos, desde o transporte das peças ao local da instalação, até a montagem e ajuste da antena. Apesar das dificuldades, o Uirapuru está operando com sucesso e já tem contribuído para avanços significativos na compreensão da evolução cósmica.

O Uirapuru possui um dos 50 feixes que serão instaladas no projeto óptico do BINGO, já situado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O Uirapuru está passando por testes e espera-se que obtenha dados da esfera celeste durante 24 horas por dia. Esses dados são recebidos numa banda específica de frequência BINGO (980 a 1260 MHz) que permite a detecção da emissão de hidrogênio neutro em galáxias distantes com uma precisão sem precedentes. e devem ser processados para obter a interpretação dos dados cosmológicos.

O radiotelescópio tem como meta principal a realização de estudos relacionados à cosmologia e astronomia do universo primordial. A capacidade do UIRAPURU em detectar sinais eletromagnéticos com alta sensibilidade e precisão permitirá fornecer informações importantes sobre a estrutura do Universo primordial e sua evolução, embora no momento, apenas uma polarização está sendo coletada no Uirapuru, ligada diretamente em um radiômetro simples e utilizando um USRP Ettus como frontend.

A figura 13 mostra o time-ordered-data (TOD) completo em uma escala logarítmica para o Uirapuru. Nesse gráfico, é expressa a evolução de uma grande quantidade de dados ao longo de duas dimensões, a variação da temperatura (T) em função do tempo e da



Figura 12 – Radiotelescópio Uirapuru.

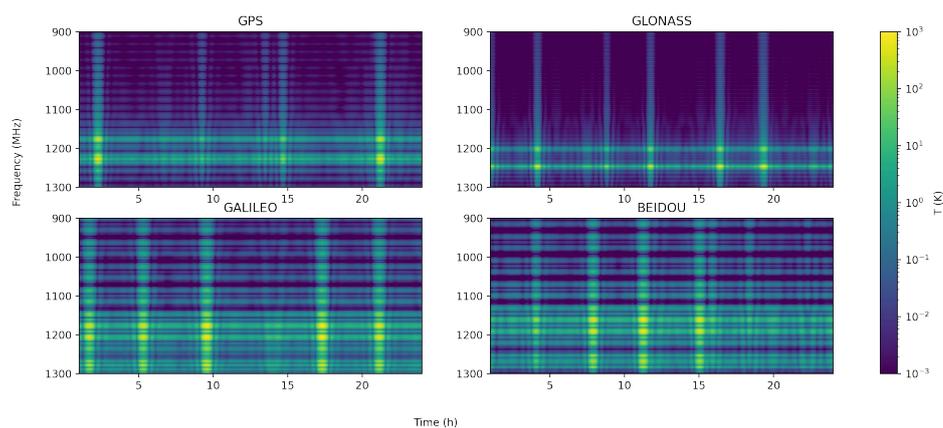


Figura 13 – Informações espectrais vistas pelo UIRAPURU para cada constelação GNSS. Variação do Espectro de Frequência ao Longo do Tempo.

frequência. É possível observar um evento de trânsito marcado no topo da figura, indicando quando um satélite está transitando o feixe principal do telescópio simulado. As cores indicam a intensidade da temperatura, seguindo uma escala de cores que vai desde um valor mínimo até um valor máximo em uma escala de cor logarítmica. Além disso, é possível

observar que, durante o trânsito dos satélites, ocorrem flutuações na TOD, indicando que os sinais GNSS afetam as observações astronômicas.

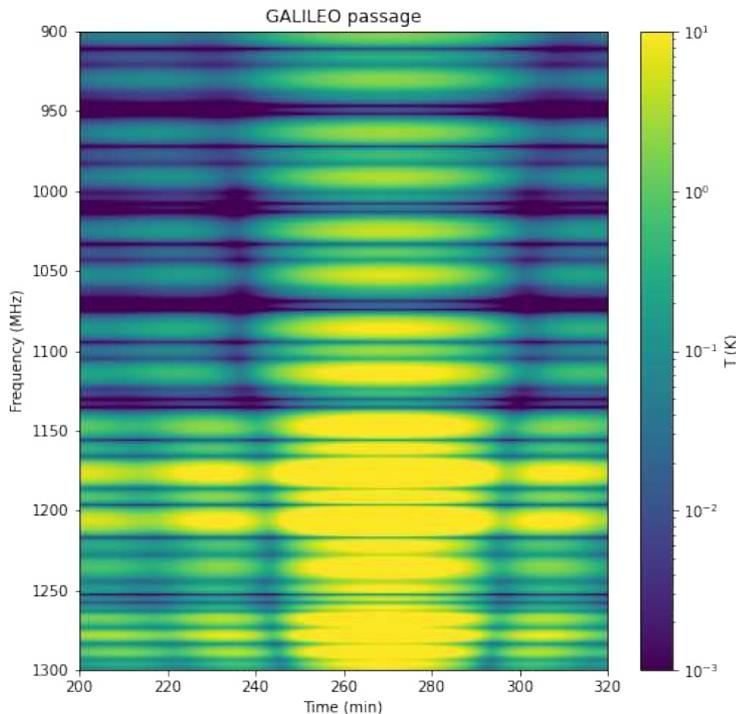


Figura 14 – Zoom na Passagem do Sistema de Navegação por Satélite GALILEO.

Visando visualizar e analisar os dados espectrais em diferentes frequências e ao longo do tempo, a figura 14 apresenta uma passagem específica em um dos sinais. É gerado um gráfico de zoom em uma passagem específica do sinal do sistema de navegação por satélite GALILEO, contido de um intervalo de frequência de 900 MHz a 1300 MHz. Com esse gráfico é possível visualizar com maior detalhe essa parte específica do sinal e analisar a intensidade ( $T$ ) em função do tempo e da frequência.

O gráfico fornece informações relevantes no estudo das RFIs, como padrões de interferência através da análise visual das estruturas presentes nos dados. Alguns dos possíveis padrões que podem ser observados incluem: estruturas regulares e agrupamentos de pontos ou aglomerados.

## 2.5 Radiotelescópio BINGO

A diferença entre um telescópio óptico e um radiotelescópio reside na frequência de recepção do espectro eletromagnético. De maneira geral, os radiotelescópios possuem uma estrutura bastante ampla, para evitar a perda de informações por difração nas bordas.

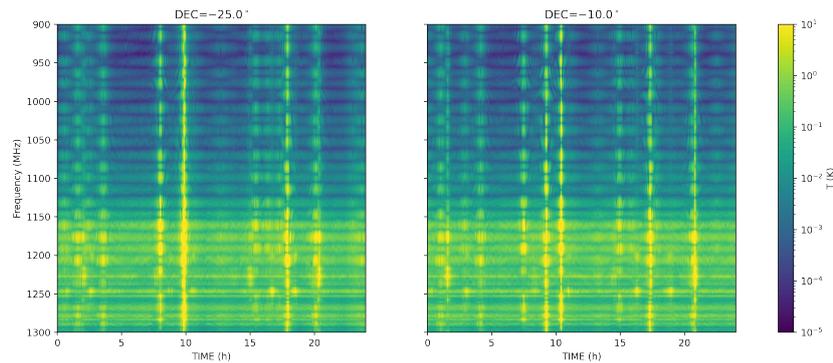


Figura 15 – Espectro GNSS total no BINGO para os feixes inferior e superior. Apesar de muito semelhantes, existem algumas diferenças importantes para o sinal recebido pelas cornetas inferior e superior.

O prato de um radiotelescópio costuma ser de proporções gigantescas, porque quanto maior o radiotelescópio, maior será o seu lóbulo principal, a região onde a direção máxima de radiação exerce sua influência sobre o ganho do instrumento. Desde a descoberta de Jansky, a radioastronomia tem proporcionado revelações extraordinárias sobre o universo em uma ampla faixa do espectro eletromagnético. Portanto, para a detecção de fenômenos astrofísicos, são necessários radiotelescópios de prato único com diâmetros consideráveis, como no BINGO. Na figura 15 é possível visualizar como os espectros de potência para as quatro constelações, onde variam ao longo do tempo. Cada constelação possui uma representação visual em forma de "waterfall", onde a intensidade do sinal é representada por cores, e o eixo horizontal representa o tempo em horas, enquanto o eixo vertical representa a frequência em MHz.

Para construção deste gráfico, foi necessário definir uma máscara de mapa celeste utilizando a biblioteca healpy [16] e uma lista de altitudes de observação, além disso, para normalização, são determinados os valores mínimos e máximos dos espectros.

Ressalta-se que, o principal objetivo científico do BINGO, consiste na medição da distribuição e da evolução da densidade de matéria escura ao longo do tempo. Para tal, o BINGO irá mapear o universo por meio da emissão da linha de 21 cm do hidrogênio neutro. O projeto contempla o mapeamento do céu em baixa frequência com o propósito de fornecer um mapa completo do universo em uma escala angular de  $1^\circ$ . Além disso, é composto por dois componentes: o telescópio BINGO e um equipamento de observação de imagem (OI). O telescópio BINGO observará uma linha correspondente à transição hiperfina do HI, com um comprimento observado em baixa resolução devido à sua associação com os objetos menores do universo [5].

O BINGO estudará uma área do céu de  $6000 \text{ deg}^2$  em uma faixa baixa de  $0,127 < z < 0,449$ , correspondendo a uma frequência de 980 a 1260 MHz e resolução de aproximadamente 40 arcmin [5]. O instrumento observacional será capaz de fornecer mapas da distribuição de HI do universo e será o primeiro experimento a pesquisar



Figura 16 – Projeção do Radiotelescópio BINGO.

BAO na faixa do rádio [5]. Isso é perfeito para o estudo de Estruturas de Larga Escala (LSS).

Será mapeada a intensidade da temperatura de brilho de inúmeras galáxias, medindo o HI de 21 cm, sem a necessidade de obter o redshift de cada objeto estudado, já que é possível obter informações em cada frequência para todo o campo [5, 17].

O BINGO irá detectar BAO presente nos mapas, bem como mapear a distribuição 3D de HI, com observações de alguns anos [5]. Foi escolhido um projeto de partes imóveis para obter baixo custo do BINGO. A estrutura é composta por um refletor primário de 40 m para obter a resolução de  $40 \text{ arcmin}$  a  $1 \text{ GHz}$ . O design óptico é feito com dois espelhos cruzados, permitindo um plano focal em um ângulo reto com a luz incidente para preservação da polarização luminosa. Toda essa tecnologia poderá ter o poder de ajudar a entender a física do Universo primitivo e a estrutura da criação cósmica.

### 2.5.1 Descrição do BINGO

O BINGO possui uma estrutura telescópica e óptica projetada com um diâmetro de 40 metros e é capaz de receber sinais na faixa de frequência de 960-1260 MHz. A instrumentação consiste em vários elementos, incluindo o receptor, o conversor analógico-digital (ADC), o sistema de sincronização, o sistema de correlação de visibilidade, a interface com o usuário e o sistema de controle. O receptor é composto por um pré-amplificador de baixo ruído (LNA), um filtro passa-banda sintonizável e um conversor de frequência. O ADC converte os sinais analógicos recebidos pelo receptor em sinais digitais, sendo então processados pelo sistema de sincronização e correlação de visibilidade. O sistema de sincronização é responsável por garantir que todos os elementos do instrumento estejam sincronizados no tempo e no espaço, enquanto o sistema de correlação de visibilidade combina os sinais recebidos por várias antenas para obter uma imagem do céu em alta resolução.

Além disso, o BINGO inclui uma estratégia de observação detalhada que envolve a seleção cuidadosa do local acolhedor. A localização ideal deve ter baixa interferência radioelétrica e condições climáticas favoráveis para minimizar as perturbações atmosféricas.

O BINGO também possui um sistema de calibração de polarização que mede as polarizações dos sinais recebidos, permitindo a correção de polarização cruzada e outros efeitos indesejados. O instrumento é, inclusive, equipado com um sistema de mitigação de interferência de radiofrequência (RFI), que filtra sinais indesejados, como sinais de satélite GNSS, para garantir que apenas os sinais cosmológicos sejam registrados. Sua instrumentação avançada o torna capaz de receber sinais de alta qualidade em um ambiente com alta interferência de radiofrequência. É um exemplo notável do uso de tecnologia na busca por uma melhor compreensão do universo.

### 2.5.2 Localização do BINGO e impactos de FRI

A escolha da localização para a construção de um radiotelescópio é um aspecto crucial que pode afetar diretamente a qualidade das observações realizadas. No caso do BINGO, foi escolhida com base em uma série de critérios técnicos e científicos. A região escolhida foi a Serra da Catarina, no município de Aguiar, Paraíba, Brasil [5]. Esse local foi escolhido após uma análise criteriosa das condições, incluindo a densidade populacional, topografia, condições meteorológicas, acesso à infraestrutura, bem como das características do sinal de rádio que seria recebido pelo telescópio.

Uma das principais vantagens da localização do BINGO é a baixa interferência de rádio na região. De fato, a rádio interferência medida na Serra da Catarina é a menor observada em toda a América do Sul e isso se deve a localização e o isolamento da região, minimizando as fontes de interferência externa.

Além disso, a topografia da região é ideal para a operação do radiotelescópio. A Serra da Catarina está localizada em uma área elevada e relativamente plana, o que permite ao telescópio ter uma visão desobstruída do céu em todas as direções, condição particularmente importante para observações em baixas frequências, onde a atmosfera terrestre pode causar distorções significativas no sinal recebido.

Outro fator importante é a baixa umidade relativa do ar no sertão da Paraíba, benéfico para a qualidade das observações em razão da menor absorção do sinal de rádio pelo ar. O clima seco minimiza os efeitos negativos da umidade na eletrônica sensível do telescópio, enquanto a estabilidade climática reduz as variações no sinal recebido ao longo do tempo. Além do mais, a região tem uma boa infraestrutura de transporte e energia elétrica, facilitando a construção e operação do radiotelescópio.

A escolha do local foi a primeira e uma importante etapa do projeto, pois a escolha inadequada do local de instalação de um radiotelescópio pode acarretar uma série de

consequências negativas para as observações cosmológicas. Uma localização com alta umidade relativa do ar, por exemplo, pode causar maior absorção do sinal de rádio pelo ar, afetando a qualidade das observações. A presença de fontes de interferência, como torres de telefonia celular ou antenas de transmissão, também pode prejudicar as observações. Além disso, a falta de infraestrutura adequada de transporte e energia elétrica pode dificultar a construção e operação do radiotelescópio.

## 3 Revisão Cosmológica

A cosmologia é fascinante por buscar a compreensão da estrutura e evolução do universo em larga escala. Ao explorar os fenômenos cósmicos, é de suma importância embasar nossas análises em referências confiáveis e autoritativas, proporcionando uma base teórica sólida para a análise e discussão dos tópicos abordados. Neste capítulo, abordaremos diversos aspectos da cosmologia, tendo como base teórica e bibliográfica o livro intitulado "Modern Cosmology"[18].

### 3.0.1 Dinâmica do Universo: Equação de Friedmann

A partir desse embasamento teórico e bibliográfico, adentraremos na equação de Friedmann, que determinam a evolução temporal do Universo. Estas equações descrevem como a densidade de energia total da matéria e da radiação se modificam com o tempo.

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 \left\{ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 [d\theta^2 + (\sin\theta)^2 d\varphi] \right\} \quad (3.1)$$

Utilizando a equação de Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu} \quad (3.2)$$

onde  $g$  é o tensor métrico,  $R_{\mu\nu}$  é o tensor de Ricci,  $T_{\mu\nu}$  é o tensor energia-momento. A geometria espacial de curvatura constante descreve o espaço tridimensional conforme os três tipos de curvaturas:  $k = -1$  (aberta),  $k = 0$  (plana) e  $k = 1$  (fechada). O tensor espacial de Ricci e a curvatura escalar são dados por

$$R_{00} = \frac{-3\ddot{a}}{ac^2} \quad (3.3)$$

$$R = 6 \left[ \frac{\ddot{a}}{ac^2} + \frac{H^2}{c^2} + \frac{k}{a^2} \right] \quad (3.4)$$

Utilizaremos o modelo de um Universo composto por um fluido perfeito (isotrópico):

$$T_{\mu\nu} = \rho u^\mu u^\nu + P(g^{\mu\nu} + u^{\mu\nu}) \quad (3.5)$$

É razoável considerar que  $P$  (pressão) e  $\rho$  (densidade) são compostos por diferentes tipos de energia/matéria:

- Matéria (bárions, elétrons, matéria escura, etc.);
- Radiação (ondas, ondas gravitacionais e neutrinos);

- Energia escura.

$$T^{\mu\nu} = T_M^{\mu\nu} + T_R^{\mu\nu} + T_D^{\mu\nu} \quad (3.6)$$

Usando as equações de estado para  $u^\mu = (1, 0, 0, 0)$

$$T_M = \rho_M u^\mu u^\nu, \quad (3.7)$$

$$T_R^{\mu\nu} = \frac{4}{3}\rho_R u^\mu u^\nu + \frac{1}{3}\rho_R g^{\mu\nu} \quad (3.8)$$

$$T_D^{\mu\nu} = -\rho_D g^{\mu\nu} \quad (3.9)$$

Supondo que matéria, radiação e energia escura não interagem significativamente, cada componente obedece à conservação da energia/momento local

$$\nabla_\mu T^{\mu\nu} = \nabla_\mu T_M^{\mu\nu} = \nabla_\mu T_R^{\mu\nu} = \nabla_\mu T_D^{\mu\nu} = 0 \quad (3.10)$$

A equação para calcular o escalar de curvatura de Ricci, usada para medir a curvatura do espaço-tempo é dada por

$$R = g^{00}R_{00} + g^{ii}R_{ii} = 6 \left[ \frac{\ddot{a}}{ac^2} + \frac{H^2}{c^2} + \frac{kc/R^2}{a^2} \right] \quad (3.11)$$

Podemos reescrever a equação de Einstein como:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (3.12)$$

Escrevendo a componente temporal da equação acima, onde  $\mu = \nu = 0$ , teremos:

$$G_{00} = R_{00} - \frac{1}{2}g_{00}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{00}$$

$$\frac{8\pi G}{c^2}\rho = 3c^2 \left[ \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{R^2 a^2} \right] \quad (3.13)$$

Reagrupando os termos substituindo  $H = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)$  e a densidade de matéria pela densidade de energia  $\varepsilon = \rho c^2$ , assim a equação anterior pode ser reescrita como:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3c^2}\varepsilon - \frac{kc^2}{R^2 a^2} \quad (3.14)$$

As equações de Friedmann nos permitem testar a validade das leis da Relatividade Geral e da mecânica quântica, sua compatibilidade com a observação e como a matéria e

a energia do Universo evoluem com o tempo, permitindo que possamos estudar o Universo em todos os seus aspectos. Além disso, permitem entender a formação e a evolução das estruturas do Universo, assim como as suas propriedades, incluindo a sua taxa de expansão, a sua geometria e os seus possíveis destinos.

### 3.0.2 Equação de Boltzmann

A Equação de Boltzmann desempenha um papel fundamental no campo da cosmologia. Essa equação possibilita uma descrição estatística do comportamento das partículas, permitindo-nos analisar a matéria e a radiação em larga escala. Através da Equação de Boltzmann, é possível estudar o transporte e a evolução das partículas no universo, bem como entender como a matéria se distribui e interage com a radiação em diferentes estágios da história cósmica. Dessa forma, combinando as equações de Friedmann e a Equação de Boltzmann, temos uma base teórica abrangente para investigar os aspectos fundamentais do cosmos.

Na cosmologia, não estamos interessados no destino individual de cada partícula, mas no comportamento estatístico dessa partícula em conjunto. Para isso, consideramos uma coleção de partículas que ocupam uma determinada região do espaço, as quais são descritas por suas posições e momentos, que compõem o conjunto  $x_i, p_i$ . Para quantificar o número de partículas em um pequeno elemento de espaço de fase em torno de  $(x, p)$ , utilizamos a função de distribuição, denotada por  $f(x, p, t)$ . Essa função relaciona-se ao número de partículas por meio da seguinte Equação:

$$N(x, p, t) = f(x, p, t) \cdot x^3 \cdot p^3 \cdot (2\pi)^3 \quad (3.15)$$

É importante destacar que, considerando inúmeras partículas no elemento de volume em questão, a função de distribuição se aproxima de uma função contínua que descreve o estado da coleção de partículas.

#### 3.0.2.1 Derivação da Equação de Boltzmann

A próxima etapa é derivar uma aprovação que rege a função de distribuição. Essa proteção deve ser tolerada a partir das forças de movimento que as partículas individuais obedecem.

Uma propriedade fundamental é a preservação do número de partículas e isso significa que a derivada temporal total da função de distribuição é igual à zero. Essa relação pode ser expressa pela equação:

$$\frac{\partial f(x, p, t)}{\partial t} = -\dot{x} \cdot \nabla_x f(x, p, t) - \dot{p} \cdot \nabla_p f(x, p, t) \quad (3.16)$$

Aqui,  $\frac{\partial}{\partial t}$  é a derivada temporal total, considerando as derivadas parciais em relação a  $x$  e  $p$ . Essa mostra a conservação do número de partícula e descreve a evolução da função de distribuição ao longo do tempo.

### 3.0.2.2 A Equação de Boltzmann em um Universo em Expansão

Considerando um universo em expansão, a Equação de Boltzmann é generalizada para considerar a geometria do espaço-tempo. Nesse contexto, a equação descreve o comportamento das partículas no espaço e no tempo, considerando o fator de escala  $a(t)$  que caracteriza a expansão do universo.

Para entender melhor a Equação de Boltzmann em um Universo em Expansão, demonstramos sua forma geral. A equação é dada por:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + p^i \left( a \frac{dp_i}{dt} \right) \frac{\partial f}{\partial x^i} - Hp \left( \frac{\partial f}{\partial p} \right) = C[f] \quad (3.17)$$

Acima,  $f$  é a função de distribuição que descreve a probabilidade de encontrar uma partícula em um determinado estado (posição e momento) no espaço de fase. As derivadas parciais  $\frac{\partial f}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial f}{\partial x^i}$  e  $\frac{\partial f}{\partial p}$  representam as variações da função de distribuição em relação ao tempo, às coordenadas espaciais e aos momentos, respectivamente. Além disso, o termo relacionado à taxa de expansão do universo ( $H_p$ ) é introduzido, onde  $H$  é o parâmetro de Hubble.

## 3.1 Perturbações Cosmológicas

Esses levantamentos permitiram uma análise mais aprofundada da estrutura do universo. Foram encontrados padrões de aglomerados e vazios, bem como filas de galáxias ao longo de linhas de visão de grandes distâncias - um sinal de que as galáxias estão agrupadas em clusters e superclusters. Isso possibilitou, pela primeira vez, calcular a estrutura a grande escala do universo e a sua distribuição de massa. Dessa maneira, estes levantamentos permitiram que os astrônomos começassem a ver o universo como uma estrutura onde o espaço entre as galáxias é organizado em padrões em grandes escalas [18].

Além disso, os levantamentos aqui descritos também permitiram a detecção das anisotropias do CMB. O mapa do CMB revelou enormes ondulações, consideradas as marcas deixadas pelas flutuações de densidade na matéria no universo primordial, que acredita-se ter se expandido e se arrefecido para formar as estruturas existentes.

Para estudar as perturbações ao redor do fundo liso da composição do Universo em largas escalas, usamos várias ferramentas da teoria da gravitação linear. Isso inclui a teoria de campos perturbados, que descreve como as flutuações na densidade e na curvatura da geometria do tempo-espaço se propagam. Também abordamos a teoria de perturbações

gerais, que descreve como a densidade, a pressão e a velocidade da matéria-energia se comportam. Essas teorias permitem calcular como as perturbações se mantêm e como elas se relacionam com observações como o CMB.

A função de dois pontos mede a correlação entre dois pontos qualquer no universo e pode ser usada para medir a correlação entre dois pontos separados por uma distância conhecida. O espectro de potência pode ser usado para medir a correlação entre regiões adjacentes em uma escala específica, permitindo um melhor entendimento da estrutura em grande escala. É possível usar essas estatísticas para comparar mapas com teorias, por permitirem medir a relação entre duas regiões no universo. Além disso, é possível usar o espectro de potência espaço de Fourier para separar grandes escalas de pequenas escalas [18].

Dado um campo  $\delta(x, t)$  obedecendo à equação diferencial parcial linear,

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}\delta + f(t)\frac{\partial}{\partial t}\delta + g(t)\nabla^2\psi = 0. \quad (3.18)$$

O espaço das Transformadas de Fourier é definido como

$$\delta(x) = \int d^3x \exp^{ik \cdot x} \tilde{\delta}(k) \quad (3.19)$$

Considerando o espectro de potência para uma galáxia  $P_g(k)$ , podemos definir uma média por:

$$\langle \tilde{\delta}_g(k) \tilde{\delta}_g^*(k') \rangle = (2\pi)^3 \delta_D^3(k - k') P_g(k) \quad (3.20)$$

A equação indica que o espectro de potência é a dispersão, ou a variância na distribuição [18].  $\delta_D^3$  é o delta de Dirac que restringe  $k = k'$  e  $\tilde{\delta}_g(k)$  a transformada de Fourier. Por construção, a média do campo  $\delta_g(x)$  é igual à zero.

## 3.2 Energia Escura

Sucintamente, o que se sabe é que a energia escura é uma forma misteriosa de energia que possui uma equação de estado negativa e não participa do colapso gravitacional. Acredita-se que componha a maior parte da energia do universo e seja responsável pela expansão acelerada do universo. É considerada um dos principais componentes da cosmologia moderna, o chamado Modelo Lambda-CDM, que descreve o Universo como feito de matéria e energia escura. É importante destacar que a energia escura não é restrita a um universo euclidiano.

O parâmetro de densidade da matéria  $m$  é um dos parâmetros cosmológicos livres usados para descrever o Modelo Lambda-CDM. É definido como a quantidade de matéria

e energia presentes no Universo responsável pela taxa de expansão. O segundo parâmetro cosmológico livre é o parâmetro correspondente à constante cosmológica, usado para descrever a quantidade de energia escura presente no universo e influência a velocidade de sua expansão.

Outra evidência para a existência de matéria escura é a Baryon Acoustic Oscillation (BAO), usada para medir a distância entre galáxias e para entender a expansão do Universo. Quando a distância angular para um dado redshift é medida, pode fornecer informações sobre a taxa de expansão do Universo. A taxa de expansão é influenciada pelo conteúdo energético do Universo, incluindo a energia escura. O fato de as medições de BAO fornecer resultados consistentes com os modelos cosmológicos que incluem energia escura oferece uma evidência independente para a existência desta forma de energia.

Sabemos que o Universo não está apenas se expandindo, mas se expandindo com uma aceleração crescente. A razão por trás dessa aceleração a energia escura pode ser expressa usando a constante cosmológica de Einstein:

$$\Lambda = 8\pi G\rho \quad (3.21)$$

Acrescentada na equação de Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu} \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} \Lambda > 0 \longrightarrow \text{expansão - exponencial} \\ \Lambda = 0 \longrightarrow \text{desacelerado} \end{cases}$$

A constante cosmológica foi introduzida por Einstein em sua equação para descrever um universo estático e combater o colapso gravitacional, consistente com as observações da época. Após a descoberta de Hubble sobre a dinâmica do universo, fez com que Einstein retirasse a constante de sua equação e só voltaria a ser utilizada na equação com a descoberta da matéria escura, como o agente responsável pela taxa de expansão. Assim, quando  $\Lambda$  assume valor positivo teremos um Universo que acelera exponencialmente. A segunda equação de Friedmann pode ser representada como

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{-4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3P}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (3.23)$$

Assumimos que  $\Lambda$  é positivo, sem  $\Lambda$  a equação 3.20 seria negativa, pois a densidade e a pressão retardam a expansão do Universo.

### 3.3 Cosmologia não homogênea - CMB

Nesta seção, abordamos o tema da cosmologia não homogênea, com foco nas anisotropias na distribuição cósmica de fótons e na não homogeneidade da matéria. Analisamos as equações de Einstein e Boltzmann, as quais descrevem o comportamento desses componentes em um universo em expansão. Além disso, discutimos a dependência espacial e direcional da função de distribuição, considerando a influência da gravidade e das interações entre as diferentes espécies presentes no universo.

A cosmologia não homogênea envolve a análise das flutuações na distribuição de fótons e na matéria ao longo do tempo. Essas flutuações são descritas pelas equações de Boltzmann e Einstein, que desempenham um papel fundamental na compreensão da evolução desses componentes.

É importante mencionar que, em princípio, também devemos considerar as perturbações na densidade de energia escura, desde que a energia escura não seja uma constante cosmológica. No entanto, modelos viáveis de energia escura sugerem que as perturbações são muito pequenas e só se tornam relevantes recentemente. Portanto, para os propósitos desta dissertação, é justificável negligenciar a energia escura como fonte de perturbações na métrica.

Para tratar sobre essa análise, consideraremos a equação de Boltzmann para fótons, que descreve sua evolução em um universo em expansão. Essa equação pode ser representada por:

$$\frac{dt}{df} = \frac{\partial t}{\partial f} + p^i \left( a \frac{\partial x_i}{\partial f} \right) - p \frac{\partial p}{\partial f} H - \dot{\phi} + p^i \left( a \frac{\partial x_i}{\partial \psi} \right) \psi \quad (3.24)$$

Esta equação descreve a evolução da função de distribuição  $f(x, p, t)$  para fótons. Inclui termos que representam a derivada temporal, a influência gravitacional e os efeitos de perturbação. A solução dessa equação nos fornecerá informações valiosas sobre a evolução dos fótons em um universo em expansão com perturbações.

### 3.4 BAO - Oscilações Acústicas Bariônicas

A compreensão da estrutura e evolução do universo vai além da presença de matéria escura fria e radiação. Nesse contexto, os bárions desempenham um papel crucial. Compreender o impacto dessas partículas na função de transferência é fundamental para a compreensão do panorama cosmológico.

Primeiramente, a presença de bárions resulta em uma supressão da função de transferência em pequenas escalas. Durante os estágios iniciais do universo, os bárions estavam fortemente acoplados aos fótons. Como as perturbações na radiação não se

desenvolvem no horizonte, as sobredensidades de bárions são suprimidas em relação à matéria escura.

Bárions são partículas elementares subatômicas que possuem cargas elétricas positivas ou negativas, além de serem constituídos por prótons e nêutrons, os dois principais componentes de núcleos atômicos. Os bárions têm uma função como régua padrão para determinar os parâmetros cosmológicos, introduzindo um recurso conhecido como oscilação acústica de bárions (BAO). A BAO é uma oscilação no espectro de potência da matéria que surge da interação entre bárions e fótons antes do desacoplamento. A oscilação é causada por uma onda de pressão impulsionada pelo campo de radiação. Essa onda de pressão viaja na velocidade do som do fluido bárion-fóton e faz com que os bárions se acumulem em regiões ligeiramente mais densas que a matéria escura (que não é afetada pela pressão de radiação). Logo, o resultado é uma característica oscilatória no espectro de potência da matéria com um comprimento de onda característico de cerca de 150 Mpc.

As oscilações acústicas foram responsáveis pela distribuição de matéria bariônica no Universo que podemos observar hoje. Quando a matéria bariônica caiu nos poços de potencial, formou estruturas que se tornaram as primeiras estruturas a se originarem no Universo. Essas estruturas são responsáveis pelo formato das galáxias e aglomerados de galáxias que observamos hoje.

É descrito em [19] uma Revolução da Distância na cosmologia que refere ao aumento do conhecimento acerca da história da expansão cósmica, como o universo se expande ao longo do tempo. Desde o início do século XXI, vários métodos, incluindo velas padrão, estatísticas e BAO foram usados para estudar a expansão cósmica. Assim, esses métodos permitem que os astrônomos sondem a história da expansão cósmica além do universo local, ajudando-os a entender melhor a natureza da energia escura.

Usando a equação de Friedman na forma adimensional, podemos obter a partir da BAO medições do parâmetro de Hubble e a distância do diâmetro angular

$$E(z) \equiv \frac{H(z)}{H_0} = \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_D f(z) + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_{rad}(1+z)^4} \quad (3.25)$$

Onde  $f(z)$  é a densidade de energia escura adimensional,  $\Omega_m, \Omega_{rad}, \Omega_D$  são as densidades de matéria, radiação e energia escura, respectivamente.

A distância comóvel define distâncias no Universo FLRW. É uma distância adimensional, radial sendo descrita como a distância entre dois pontos no espaço medida usando a relação presente abaixo:

$$\chi(z) \equiv \int_0^z \frac{dz'}{E(z')}. \quad (3.26)$$

Assim, podemos obter a distância do diâmetro angular,  $d_A(z)$  e a distância de luminosidade,  $d_L(z)$

$$d_A(z) = \frac{c}{H_0(1+z)\sqrt{-\Omega_k}} \sin(\sqrt{-\Omega_k}\chi(z)) \quad (3.27)$$

$$d_L(z) = (1+z)^2 d_A(z) \quad (3.28)$$

Portanto, as duas grandezas determinam as distâncias cosmológicas são  $\chi$  e  $\Omega_k$ , pois fornecem as distâncias angular e de luminosidade [19].



## 4 Simulações

A radioastronomia é uma das áreas científicas mais críticas para as interferências, dada sua sensibilidade à radiação de transmissão, e a natureza de seus espectros de largura de banda, assim como já apresentado. De fato, essa ciência foi uma das primeiras áreas de interesse de abordagens de gerenciamento de ingerências que visam proteger as atividades científicas de interferências prejudiciais. No entanto, está sendo ameaçada por um conjunto de interferências, incluindo interferência de usos tradicionais, a área recebeu pouca atenção no processo de tomada de decisão acerca do uso do espectro radioelétrico. A radioastronomia é um exemplo de serviço de recepção de sinal fraco, o que significa que a interferência não precisa ser tão forte quanto a sinal para causar problemas. Por exemplo, nos limites de interferência com base na razão  $\text{signal/interference}$  (S/I) de 0,25, uma redução de apenas 10 dB na sensibilidade de uma recepção de sinais astronômicos pode causar uma perda de desempenho de 4 vezes, ao passo que uma redução de 10 dB na sensibilidade de recepção de um serviço de transmissão, como a radiocomunicação móvel, pode causar apenas uma perda de desempenho de 10%. A radioastronomia é também um exemplo de serviço que lida com larguras de banda extremamente amplas, de alguns MHz até centenas de GHz. Essas larguras de banda são ainda mais amplas quando consideradas as frequências de sintonia de muitos instrumentos radioastronômicos.

### 4.1 O problema do RFI para Radiotelescópios

A radiação eletromagnética de origem humana produz interferência na banda específica, vizinha e até mesmo distante das frequências do radiotelescópio que podem prejudicar o experimento. Devido à intensidade da emissão dessas fontes, em comparação a radiação dos objetos astronômicos de estudo, a excisão desses ruídos é uma tarefa árdua para o radioastrônomo.

Os telescópios de rádio devem ser situados em regiões remotas e desertas para minimizar a interferência de outros transmissores de rádio. No entanto, mesmo em lugares isolados, o RFI é uma preocupação constante para a ciência espacial de rádio. O RFI pode ser gerado por diversas fontes, tais como transmissões de televisão, telefonia celular e outros sinais de comunicação. Além disso, o RFI pode ser gerado pelo homem ou pelo meio ambiente. Por exemplo, o RFI pode ser gerado por trovões, motores de avião e até mesmo por motores de carro.

Os astrônomos têm trabalhado para abordar este problema, desenvolvendo e implementando técnicas de filtragem de interferência de rádio para reduzir a interferência externa. Nesse sentido, as técnicas incluem o uso de antenas direcionais e ganhos de antena,

bem como filtros de interferência de rádio específicos projetados para bloquear sinais de interferência. Além disso, alguns radiotelescópios, como o BINGO, são projetados para ter uma largura de banda mais estreita para evitar interferências e também para diminuir a interferência existente. Essas medidas ajudam a diminuir a interferência externa e a garantir que os sinais celestes de interesse sejam capturados com maior qualidade.

Dessa forma, a interferência pode ser caracterizada pela amplitude do sinal, a frequência do sinal, a amplitude de variação com o tempo e a amplitude de variação com a antena apontada para diferentes fontes astronômicas. Uma das maneiras de identificar a interferência é comparar a amplitude do sinal medido na linha de base com a amplitude medida em um campo de referência. Podemos classificar as RFI como banda larga ou banda estreita. Uma banda de larga escala se comporta por meio de rajadas impulsivas de curta duração de sinal interferente; durante o tempo que a banda estreita ocorre em longa duração [20].

Este trabalho está voltado para a instrumentação científica ligada ao radiotelescópio BINGO, analisar a RFI que perturbam a faixa na frequência de 1215 – 1260 MHz, compreendida pelo BINGO na detecção de hidrogênio. Nesta faixa estão interferências não intencionais (não usadas para levar informações) e as intencionais como serviços globais de navegação por satélite (GNSS). Possibilitar que as bandas de frequências compreendidas pelo experimento sejam minimizadas é crucial para êxito das pesquisas.

O RFI é uma barreira para a radioastronomia do BINGO, como a radiação do HI é fraca acaba sendo corrompida por essas interferências. Portanto, realizamos uma análise do ruído proveniente dos satélites GNSS que afetam o campo do Bingo. Para tal propósito os radiotelescópios têm evoluído buscando maneiras mais eficientes de mitigar a interferência de RFI, a sua maior barreira. Interferências de radiofrequências ou RFI são todos os ruídos produzidos pelo homem por dispositivos eletrônicos que transmitem ondas do espectro eletromagnético ou pela própria natureza. Essas fontes podem estar na banda de observações ou em frequências adjacentes do radiotelescópio.

## 4.2 Simulações da temperatura da antena

A principal finalidade do BINGO é mapear a intensidade de HI, porém quando mesmo integrada a clusters essa radiação é relativamente fraca comparada a outras fontes de rádio emitidas na frequência  $<1420$  MHz [8].

O impacto do ruído de fundo de HI esperado nas simulações de ponta a ponta é discutido em [8]. Aqui, descrevemos os parâmetros de simulação de ponta a ponta, atributos a radiação de satélites GNSS que afetam as observações de HI, as quais, foram geradas usando essas simulações de flutuação das constelações GNSS, modelando-se no prato do BINGO, usando o código descrito em [8].

Buscamos soluções para reduzir o impacto das transmissões GNSS. Uma das estratégias consiste no mapeamento das flutuações temporais desses sinais.

Realizamos simulações dos sinais RFI descrito pelas passagens dos satélites de posicionamento GNSS com as constelações GPS, Glonass, Galileo e Beidou que contribuem significativamente no RFI no campo do BINGO. As simulações foram efetuadas em um período de vinte dias de observações do feixe do Uirapuru, localizado na cidade de Campina Grande-PB. Podemos descrever o TOD, as saídas dos dados ordenados de tempo do receptor como:

$$d(t, \nu) = G_r(\nu) B_r(\Omega - \Omega_0, \nu) \cdot T_{sat}(\Omega, \nu) \quad (4.1)$$

O vetor TOD ( $d$ ) é uma função do tempo e da frequência. O primeiro termo da equação  $x$  descreve o ganho do feixe dependente de  $\Omega_0$  (eixo do feixe principal) e uma direção arbitrária  $\Omega$ , assim como a  $\nu$  é a temperatura da antena  $T_{sat}$  para cada satélite e depende de  $\Omega$  em determinada frequência [8].

As propriedades das radiações procedentes dos GNSS foram exploradas por varredura do feixe do Uirapuru. Essa varredura consiste em apontar o feixe para o azimute em elevação fixa, associados a uma declinação entre  $0^\circ$  a  $45^\circ$  na esfera celeste e usar a rotação da Terra na varredura do céu, assim como feito em [8], com algumas correções, uma delas está em usar escalas esféricas tornando mais claras as interpretações nas órbitas dos satélites. Notamos pela figura xx que o uso de uma região entre  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , como também se mudarmos a posição do feixe, muda a maneira de como o radiotelescópio avista o satélite.

Usamos um quadro de horizontes obtidos das transformadas dos vetores de elementos de linhas duplas (TLE) dos satélites de posicionamento. Os TLEs são estruturas de dados que permitem calcular a órbita dos satélites a partir dos seguintes indicadores: movimento médio em revoluções ao longo de vinte e quatro horas, anomalia média no momento da TLE, excentricidade da órbita, inclinação orbital e o ângulo de direção de referência conhecido como longitude do nó ascendente ou origem da longitude. O catálogo usado das órbitas foi disponibilizado pela CelesTrak [13], baixados no formato CSV para a construção dos gráficos no ambiente de desenvolvimento interativo do JupyterLab.

Para cada transmissão GNSS foi calculada a potência de radiação de pico de cada satélite e determinado a potência de radiação de pico total de cada satélite dentro da banda de frequência de cada observação. Em seguida, a potência total de todos os satélites em vista foi determinada e usada para determinar o brilho do fundo de cada observação.

Queremos expressar a densidade de fluxo integrada de cada satélite. Começamos considerando a potência do sinal como

$$P_r = P_s + G_s + G_r - L_0 - K \quad (4.2)$$

A potência recebida ( $P_r$ ) na escala dB é descrito como a soma de diferentes componentes:  $P_s$  é a potência emitida do satélite,  $G_s$  é o ganho da antena do satélite,  $G_r$  é o ganho da antena receptora e  $L_0$  dado por

$$L_0(dB) = 10 \log_{10} \left[ \frac{4\pi R\nu}{c} \right]^2 \quad (4.3)$$

$L_0$  é a perda de espaço de caminho livre e  $K$  é responsável pela atenuação atmosférica. Definimos a Potência Isotrópica Radiada Efetiva (EIRP) como:

$$\text{EIRP} = P_s + G_s \quad (4.4)$$

$$\text{EIRP}(\nu) = P_r - G_r + L_0 + K = P_{\min} - 3 \text{ dB} + 3 + L_0 \quad (4.5)$$

A EIRP indica o quanto de potência é emitido pela antena em uma dada direção, ignorando as consequências de perdas e incluindo um fator de danos  $K$  para considerar a reflexão com o projeto de vista. E usando os valores nominais de mínimo dos satélites, definidos como sinal recebido por uma antena de 3dB a 5° de elevação acima do horizonte. Consideramos  $K=3$  como medida típica.

Assumimos também que a potência dos sinais das diferentes frequências é a mesma. Assim temos uma estimativa para o EIRP de cada satélite e podemos escrever uma expressão para o fluxo observado, se assumirmos uma largura de banda  $\delta\nu$ .

$$S[\nu] = \frac{P_s G_s}{4\pi r^2 \delta\nu} \mathcal{P}(\nu) = \frac{\text{EIRP}}{4\pi r^2 \delta\nu} \mathcal{P}(\nu), \quad (4.6)$$

A potência GNSS varia consideravelmente de satélite para satélite e de constelação para constelação, bem como das condições atmosféricas e composto de vários sinais nas frequências centrais com uma modulação também característica. Estimamos a EIRP considerando  $P_r$  como a potência mínima recebida, então  $G = 3dBi$ , as perdas atmosféricas têm um valor típico de  $3dBi$  e calculamos a perda de trajetória do satélite para um observador no solo usando a altitude nominal para cada constelação.

Os sinais dos satélites têm diferentes condições, entre elas a modulação binária BPSK. Na equação 4.6,  $\mathcal{P}(\nu)$  representam a densidade espectral de potência para o sinal modulado, dada pelo conjunto de equações:

$$S_{\text{BPSK}}(\nu, \nu_0, m) = \frac{1}{m\nu_0} \text{sinc}^2 \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{m\nu_0} \right) \quad (4.7)$$

$$S_{\text{BOC}}(\nu, \nu_0, m, n) = m\nu_0 \left( \frac{\sin \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{2m\nu_0} \right) \sin \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{m\nu_0} \right)}{\pi[\nu - \nu_0] \cos \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{2m\nu_0} \right)} \right)^2 \quad (4.8)$$

$$S_{\text{BOCc}}(\nu, \nu_0, m, n) = m\nu_0 \left( \frac{\sin \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{2m\nu_0} \right)}{\pi[\nu - \nu_0] \cos \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{2m\nu_0} \right)} \right)^2 \left[ \cos \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{2n\nu_0} \right) - 1 \right]^2 \quad (4.9)$$

$$S_{\text{slitBOCc}}(\nu, \nu_0, m, n) = \frac{8m\nu_0}{\pi^2(\nu - \nu_0)^2} \left( \frac{\sin \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{m\nu_0} \right)}{\cos \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{2n\nu_0} \right)} \right)^2 \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi[\nu - \nu_0]}{2n\nu_0} \right) \right] \quad (4.10)$$

$f$  é a frequência em Hz,  $f_c$  é a frequência central do sinal em Hz e BOCc e BPSK são tipos de modulação usados em sinais GNSS.

Este capítulo apresenta quatro modelos de densidade espectral de potência (PSD) representando as quatro constelações GNSS (Galileo, GPS, GLONASS e BeiDou) e seus sinais de frequência L5 e E6. Cada modelo é definido por uma equação que descreve o PSD em termos de frequência e são baseados nas especificações de modulação de código e modulação de portadora dos sinais GNSS. Estas equações são baseadas em modelos teóricos de sinais GNSS, considerando as características dos sinais modulados e processos de transmissão.

O PSD é uma medida da distribuição de energia de um sinal em uma faixa de frequência e é amplamente utilizado na análise de sinais e sistemas. No contexto deste estudo, o PSD é usado para modelar o consumo de energia dos sinais emitidos pelos satélites GNSS em diferentes frequências.

A Figura 17 apresenta diferentes modulações utilizadas para a emissão de energia total dos satélites GNSS, onde o eixo de frequência representa o deslocamento de frequência da portadora e as amplitudes máximas são normalizadas e mostradas em uma escala linear. Para criar a figura, foram gerados quatro modelos de densidade espectral de potência (PSD), cada um representando uma constelação GNSS distinta, a saber: Galileo E5A, Galileo E5B, Galileo E6 e GPS-M. Os modelos PSD foram normalizados em relação ao pico e apresentados em uma escala linear com a mesma faixa de valores de potência.

As curvas em cada subgráfico indicam os parâmetros da modulação. Essas linhas são expressas em função da frequência, que variam conforme os valores definidos nas frequências mínimas e máximas. Cada curva é normalizada dividindo-se pelo valor máximo da respectiva função de potência espectral, o que permite comparar o comportamento relativo das diferentes modulações em termos de potência espectral.

A figura é útil para avaliar a diferença nas emissões de energia total das diferentes constelações GNSS, o que é importante para entender o impacto potencial desses sinais na

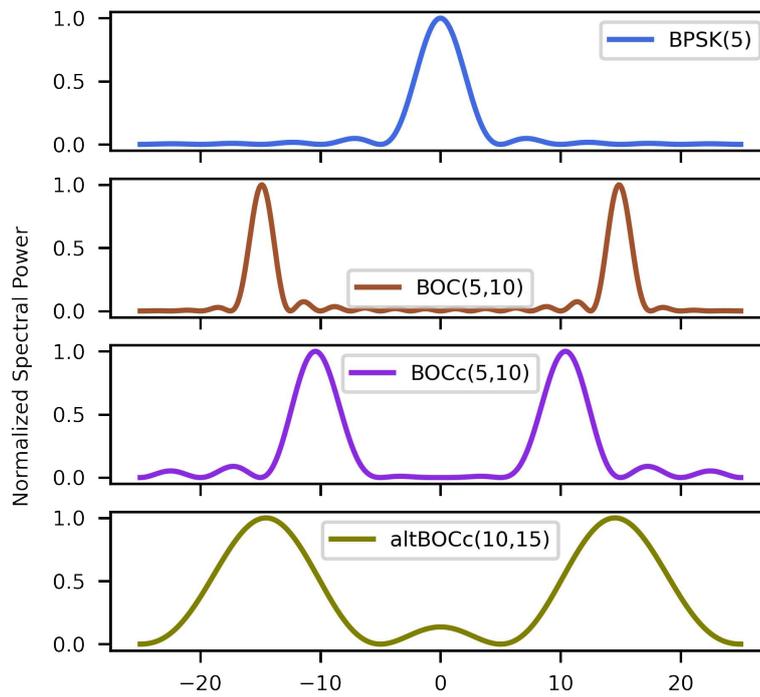


Figura 17 – Modulação de sinal.

pesquisa de mapeamento de intensidade de HI. A modulação de sinal PSD é importante porque, como os sinais GNSS são muito fortes, eles podem causar interferência em outras frequências e distorcer as medições de intensidade de hidrogênio neutro efetuadas por radiotelescópios terrestres. Para mitigar esse efeito, é necessário considerar a modulação do sinal PSD dos sinais GNSS nas análises de dados.

## 5 Resultados e Perspectivas

A análise feita aqui é um passo importante na compreensão do impacto de sinais satélites sobre a medição de HI. A primeira conclusão desta análise é que o impacto do sinal é grande em todas as alocações de frequência e existem sinais que contaminarão a medição do HI fora das alocações GNSS. Nossas simulações sugerem que a interferência GNSS pode ser de até três ordens de grandeza maior que o brilho esperado de rádio HI. Isso implica que é possível que o HI possa ser medido com o uso de técnicas de remoção de interferência.

### 5.1 Caracterização e Impacto da Interferência GNSS no Experimento do Uirapuru

Uma das maneiras “simples” de lidar com esse tipo de interferência no experimento a ser realizado é identificar ou registrar quando um satélite estiver presente no campo do radiotelescópio. Nas simulações, observou-se que a passagem de satélites é mais frequente no Uirapuru em comparação com o BINGO, devido ao tamanho maior do feixe para o primeiro. Embora não seja viável simplesmente descartar os dados quando um satélite estiver no campo de visão do feixe, é possível filtrá-los para tornar mais suave esse efeito.

Além disso, neste trabalho, realizamos simulações de observações de varredura contínua, conforme descrito em [8], assumindo que o radiotelescópio está em movimento, com coordenadas horizontais fixas, aproveitando o movimento sideral da Terra. Essas simulações foram realizadas visando analisar e compreender melhor os efeitos da presença de satélites nas observações, conforme mencionado anteriormente.

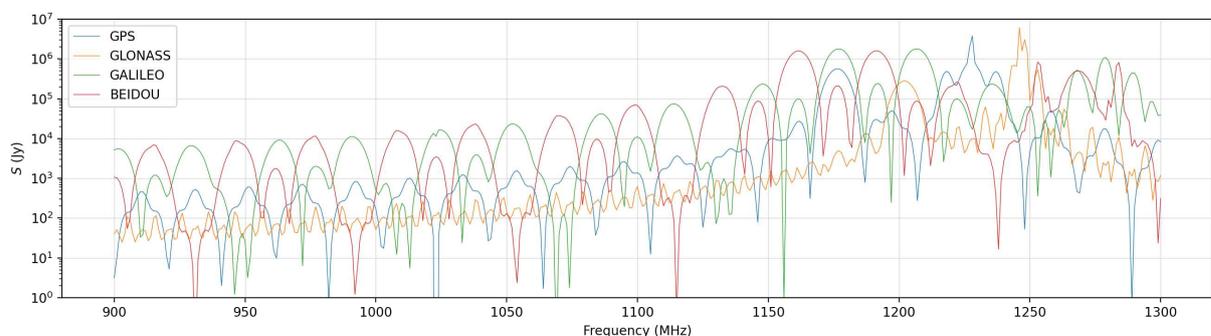


Figura 18 – Densidade de fluxo para cada constelação GNSS vista do solo.

A Figura 18 mostra a densidade de fluxo típico vista do solo para as quatro constelações consideradas neste trabalho. Para a faixa de frequência considerada, vemos

que os fluxos excedem  $10^5 Jy$ . Além disso, essas fontes muito brilhantes estão distribuídas em todo o céu. Pode-se considerar extirpar o RFI que passa no lóbulo principal para mitigar sua influência.

A potência do sinal é expressa em uma escala logarítmica, e isso permite visualizar uma ampla faixa de valores de potência, desde valores baixos até valores muito altos. O gráfico resulta em uma representação visual das curvas de potência do sinal para os diferentes sistemas GNSS, permitindo comparar a distribuição da potência em diferentes frequências.

O objetivo do Uirapuru não é buscar um sinal cosmológico, mas estudar objetos astrofísicos brilhantes. Apesar de não podermos extirpar completamente as passagens dos satélites, como visto acima, podemos utilizar técnicas de filtragem para melhorar a relação sinal/ruído. Uma alternativa para essa filtragem, é o uso do filtro MAD, bem testado para RFI de impulso conforme descrito em [21].

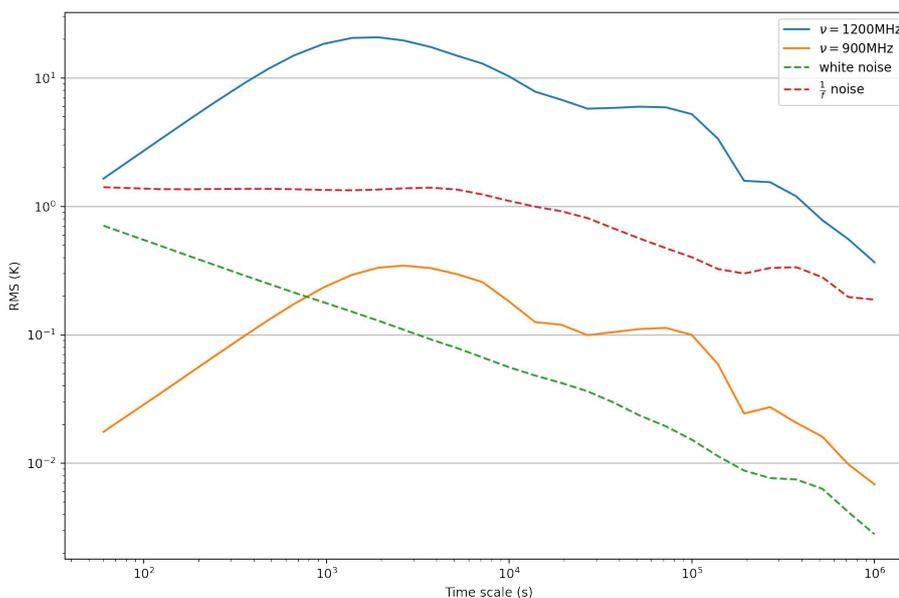


Figura 19 – Tempo de Allan para sinal em UIRAPURU. O sinal é distinto do ruído branco e do ruído  $1/f$  para integrações curtas. Existe uma escala de tempo específica para a qual o sinal GNSS contribui apenas para o ruído branco.

Na figura 19 temos o Desvio Allan para diferentes tipos de ruído de frequência. Foi definido um vetor de tempo “t” com valores espaçados logaritmicamente, o vetor é usado para calcular essa medida. As curvas sólidas representam o desvio Allan para duas frequências específicas (1200 MHz e 900 MHz), enquanto as curvas tracejadas representam o desvio Allan para dois tipos de ruído: ruído branco e ruído rosa. O ruído branco é caracterizado por ter uma potência constante em todas as frequências, enquanto o ruído rosa tem uma densidade espectral inversamente proporcional à frequência.

Podemos observar na figura que para o feixe do UIRAPURU, em pequenos intervalos de tempo os satélites apresentam estrutura espectral e em grandes intervalos de tempo os sinais em diferentes frequências se comportam como ruído branco. Como o UIRAPURU utilizará pequenos intervalos de tempo, os sinais GNSS não serão como ruído branco.

## 5.2 Análise da Interferência e Mitigação de RFI no Contexto do Bingo

De acordo com [21], a entrada para um receptor de radiotelescópio é composta por uma combinação de três sinais — o ruído do sistema, o ruído do céu que são sinais gaussianos não congruentes de média zero e RFI, sinais de banda estreita e não-gaussianos. As escolhas das técnicas para mitigar o RFI depende de suas propriedades, intensidade em relação o sinal e perda de dados toleráveis para o alcance de uma sensibilidade desejada do receptor na identificação de sinais cosmológicos [21]. Por ser um radiotelescópio de antena direcional, o BINGO consegue inibir RFI de banda estreita. A mitigação do RFI para o experimento em questão inicia-se na escolha do local, assim o experimento será construído em uma região com vales e distante de grandes centros urbanos para evitar grandes níveis de radiação, porém não evitando emissões de satélites. A segunda etapa está em usar receptores de monitoramento das fontes de interferência.

A detecção automatizada de RFI usa algoritmos de processamento de sinal para identificar sinais RFI em vez de processar manualmente grandes volumes de dados. Esta abordagem oferece vantagens significativas em termos de rapidez e eficiência, mas também exige que os dados sejam tratados de maneira eficiente e consistente. Isso significa que os algoritmos de processamento de sinal devem ser refinados, para garantir que os sinais indesejáveis sejam identificados corretamente. Além disso, os algoritmos de redução de dados precisam ser aprimorados para acompanhar a exigência de aplicações da radioastronomia do BINGO.

O BINGO será construído com uma arquitetura pensada para combater o RFI, a começar pelo seu projeto e sua localização de instalação [17].

A escolha de uma técnica específica depende das propriedades do RFI, sua força em relação ao sinal e a perda de dados tolerável. Assim, para a maioria dos radiotelescópios, uma combinação de técnicas serve como a melhor estratégia para mitigar a interferência e alcançar sensibilidade desejada do receptor.[21]

O sinal coletado pelo BINGO contará com uma combinação de técnicas para mitigar o RFI, desde técnicas aplicadas antes do funcionamento do experimento até mitigação em tempo real.

Transmissores em satélites podem apresentar dificuldades particulares porque as condições de propagação LoS (Line of Sight) geralmente existem e a probabilidade de recepção em lóbulos laterais próximos ao feixe principal (em vez dos lóbulos laterais distantes) é maior que para transmissões terrestres [9].

Um dos métodos usados será a excisão de fontes impulsivas de RFI no domínio do tempo ou da frequência quando o RFI for de maior intensidade que o sinal astrofísico. O processo pode ser efetuado em domínios temporal, espectral, espacial e de dispersão [21].

A excisão é composta pela detecção do RFI e a sua filtragem. A primeira depende da diferença na distribuição gaussiana Threshold-based, uma detecção de limite robusta que conta com estatística de dispersão do sinal captado e definida como desvio absoluto. “Devido a mudanças no ganho do receptor, ambiente RFI e temperatura do sistema, a dispersão do sinal precisa ser calculada instantaneamente ou intervalos de tempo regulares” [21].

Essa técnica de IM é um método de observação de imagem bastante usada no BINGO, a linha de IM do HI é proposta como a principal técnica em vários outros projetos como o MeerKAT, Tianlai, SINAL, HIRAX, HERA, bem como o SKA.

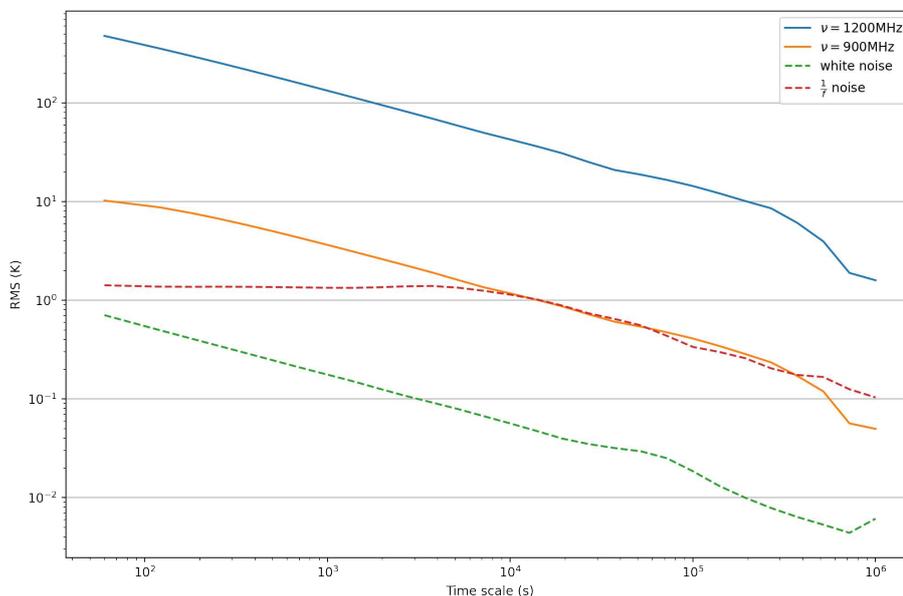


Figura 20 – Tempo de Allan para sinais no feixe inferior do BINGO. O sinal GNSS se assemelha ao ruído branco mesmo em escalas de tempo curtas.

Realizamos o mesmo processo da figura 19 para o BINGO, os resultados são expressos na figura 20. As curvas sólidas representam os resultados do Tempo de Allan para as frequências de 1200 MHz e 900 MHz, enquanto as curvas tracejadas representam os resultados para o ruído branco e o ruído rosa. O resultado permite comparar a estabilidade

dos diferentes tipos de sinais de frequência ao longo do tempo. O Tempo de Allan está relacionado ao desvio padrão do sinal em função do tempo em escalas logarítmicas. O desvio padrão é calculado para dois sinais de frequência diferentes, bem como para um sinal de ruído branco e um sinal de ruído rosa, além disso, podemos fazer um comparativo desse tipo de desvio com o espectro de potência para diferentes frequências dos sinais de rádio.

### 5.3 Mapeamento de intensidade HI

O Mapeamento de Intensidade (IM) é uma técnica usada na astronomia para detectar variações na intensidade do HI em larga escala através da utilização de um único telescópio. Nessa abordagem o instrumento é direcionado para várias áreas do céu e registra a intensidade do sinal de HI em cada local. As informações obtidas são posteriormente utilizadas para gerar um mapa tridimensional da distribuição de HI no universo. O principal objetivo dessa abordagem é medir BAO e limitar as propriedades da energia escura. O mapeamento de intensidade HI pode fornecer informações valiosas sobre como a matéria está distribuída no universo e como a estrutura cósmica evolui ao longo do tempo [22].

Como o comprimento de onda é desviado para o vermelho pela expansão do Universo, temos uma determinação precisa do redshift da fonte emissora. Podemos, assim, mapear a distribuição do HI no Universo em diferentes redshifts, realizando uma análise tomográfica que permite estudar a evolução da distribuição da matéria [5].

No âmbito da cosmologia o Bingo irá detectar a emissão do HI em 21 cm, utilizando-o no estudo do LSS [5]. Uma das linhas mais importante e amplamente observadas da radioastronomia, proveniente do hidrogênio neutro não ionizado no meio estelar, com variação na banda devido o efeito Doppler e de possível detecção em todas as direções da esfera celeste [12]. O HI é usado em diversos estudos de sua distribuição em galáxias, seus dados são utilizados para investigação do estado da matéria interestelar fria, a distribuição de gases, estimativas de massa, rotação galáctica, cinemática e dinâmica do universo.

O principal ponto de estudo do BINGO é o BAO, que pode fornecer informações da expansão do universo, sua evolução, efeitos da energia escura e parâmetros do modelo  $\Lambda$ CDM.

O IM pode ser feito com HI e essa técnica vem sendo proposta em muitos projetos como o principal mecanismo na medição do componente mais presente do universo.

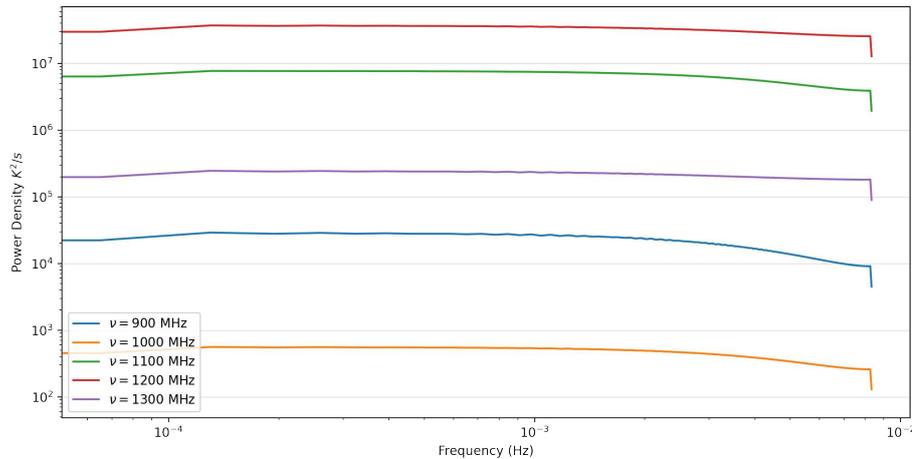


Figura 21 – Densidade de potência para sinais no feixe inferior do BINGO. O feixe do BINGO tem um FWHM pequeno comparado ao Uirapuru, a passagem do satélite é muito rápida.

## 5.4 Impactos nos sinais cosmológicos

Os resultados da pesquisa mostram que os sinais emitidos pelos satélites do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) podem ter um efeito importante nas investigações sobre a intensidade de HI no mapeamento. Esse impacto é particularmente significativo em baixos redshifts ( $0 < z < 0,2$ ), que estão nas faixas de transmissão dos sinais emitidos pelos sistemas GNSS.

Essa análise é fundamental no contexto da exploração cósmica, pois o estudo da intensidade do hidrogênio neutro por meio do mapeamento desempenha um papel central na compreensão das estruturas e distribuições no Universo. Portanto, examinar as interferências causadas pelos sinais dos satélites GNSS nas observações do mapeamento de HI contribui para uma avaliação mais abrangente dos possíveis impactos nos dados coletados, especialmente nas regiões do espectro de frequência associadas aos redshifts mencionados. A mitigação pode ser alcançada por meio de técnicas de filtragem de sinal e modelagem precisa do feixe.

O feixe do BINGO possui uma largura de aproximadamente  $1^\circ$  ( $40arcmin$ ), extirpar os sinais fora do feixe acarreta pouca perda dos dados. Entretanto, os dados de trânsito de satélites muito distantes do eixo principal podem ser um ruído indesejado que afeta a qualidade da solução de posicionamento, especialmente quando os sinais são fracos. Como a intenção é a captura de dados cosmológicos, é preciso um instrumento extremamente sensível e a perda de dados por mínima que seja sempre será um problema.

O Uirapuru possui um feixe de largura de aproximadamente  $15^\circ$ , extirpar todos os dados quando um satélite estiver no campo do lóbulo principal significa perder cerca de 50% do sinal para uma determinada declinação, portanto esse procedimento não é uma

opção para nenhum dos dois instrumentos aqui apresentados.

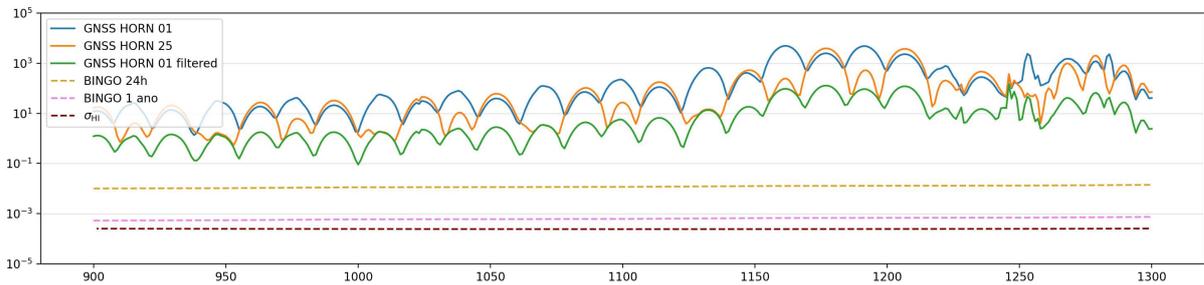


Figura 22 – Desvio quadrático médio para o sinal de 30 dias para BINGO. Sinais acima de 1100 MHz ficam comprometidos, a buzina superior recebe um sinal menos intenso. Um procedimento de mascaramento que extirpa todo o sinal com um ângulo de visada inferior à  $1^\circ$  mostra uma melhoria significativa.

A figura 22 apresenta a raiz quadrática média de uma série temporal de 30 dias. É calculado a temperatura de ruído RMS em Kelvin para o conjunto de frequências de 900 MHz a 1300 MHz, com base em vários parâmetros, como a temperatura do instrumento, a largura de banda, o tempo de observação, a densidade de feixes, a largura do feixe e a área de sobrevivência do feixe.

O gráfico dá o comparativo dos espectros de ruído de diferentes fontes e sistemas. Além disso, também são adicionadas curvas que representam a estimativa de ruído térmico em diferentes cenários. As linhas contínuas retratam a densidade acumulada dos satélites, enquanto as linhas tracejadas laranja e rosa representam a sensibilidade do radiotelescópio BINGO em diferentes períodos de observação. Ademais, a linha tracejada marrom expressa a variação do HI em um intervalo anual.

É definido uma função na simulação, descrita em B que calcula a raiz quadrada da temperatura do ruído RMS em função de diferentes parâmetros, como frequência, temperatura de instrumento, largura de banda, tempo de observação, etc. O gráfico permite comparar os diferentes espectros de ruído dos sistemas GNSS, além de fornecer uma referência para o ruído térmico e a radiação cósmica de fundo.

Os códigos de configuração do ambiente de execução no Jupyter Notebook e a importação das bibliotecas e módulos necessários para a análise dos dados nos feixes apresentados neste trabalho fornecem as ferramentas e recursos computacionais para realizar a comparação entre o espectro de potência do HI e do RFI. Essa análise é essencial para investigar a relação entre esses dois espectros e compreender a contaminação do sinal cosmológico pela interferência de rádio.

Através desses códigos e bibliotecas, é possível manipular os dados dos feixes e calcular os espectros de potência do HI e do RFI. A figura 23 mostra os espectros de potência para três frequências do GNSS (900 MHz, 1100 MHz e 1300 MHz) e três frequências de ruído (900 MHz, 1100 MHz e 1300 MHz). Cada curva representa um espectro de potência

correspondente a uma componente específica. As curvas azuis representam os espectros de potência do GNSS em cada frequência, enquanto as curvas douradas representam os espectros de potência do ruído de interferência de rádio.

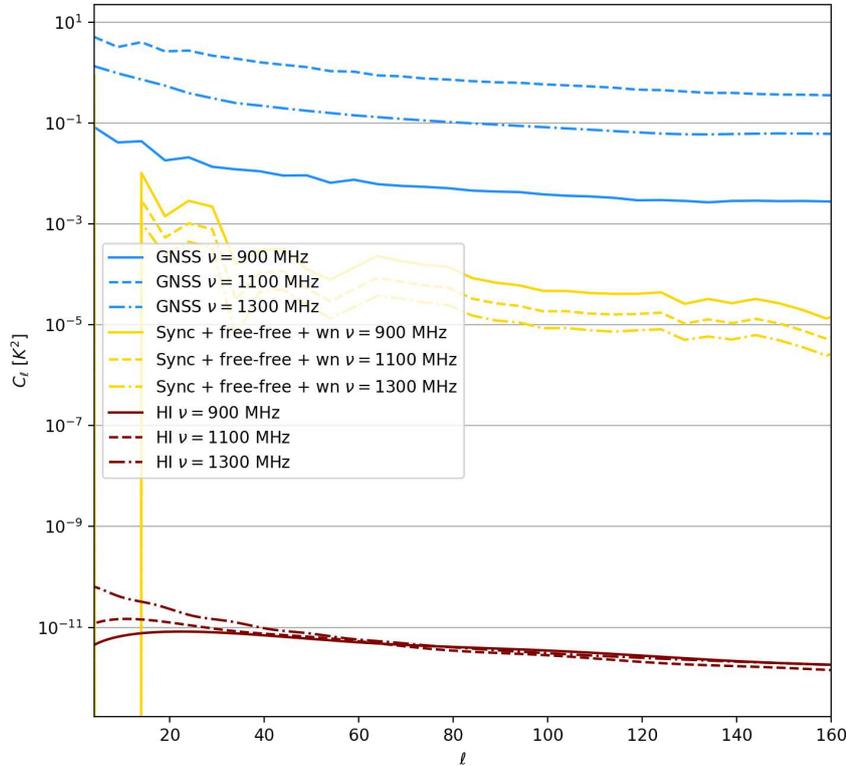


Figura 23 – Espectros de Potência do Hidrogênio Neutro (HI), GNSS e Ruído de Interferência de Rádio (RFI) em Diferentes Frequências.

Além disso, as curvas vermelhas representam os espectros de potência do Hidrogênio Neutro em cada frequência. Através da análise desses espectros, é possível observar as contribuições relativas de cada componente em diferentes frequências. O eixo horizontal do gráfico representa o número de multipolos ( $l$ ), uma medida da escala angular das flutuações no céu. Enquanto o eixo vertical representa o valor do espectro de potência em unidades de " $K^2$ ".

A comparação desses espectros permite avaliar a presença e a intensidade da interferência de rádio em relação ao sinal cosmológico. Ao examinar a razão HI/RFI (figura 24) em diferentes frequências e escalas angulares, é possível identificar as regiões do espectro onde o sinal cosmológico é dominante e onde o ruído de interferência prevalece.

A observação dos resultados desse gráfico revela informações valiosas sobre a contaminação do sinal cosmológico pelo RFI. Quando a razão HI/RFI é alta em uma determinada região do gráfico, isso indica que o sinal cosmológico é mais intenso do que o ruído de interferência nessa região específica de multipolos e frequências. Por outro lado, quando a razão HI/RFI é baixa, sugere-se que o sinal cosmológico é dominado pelo ruído de interferência.

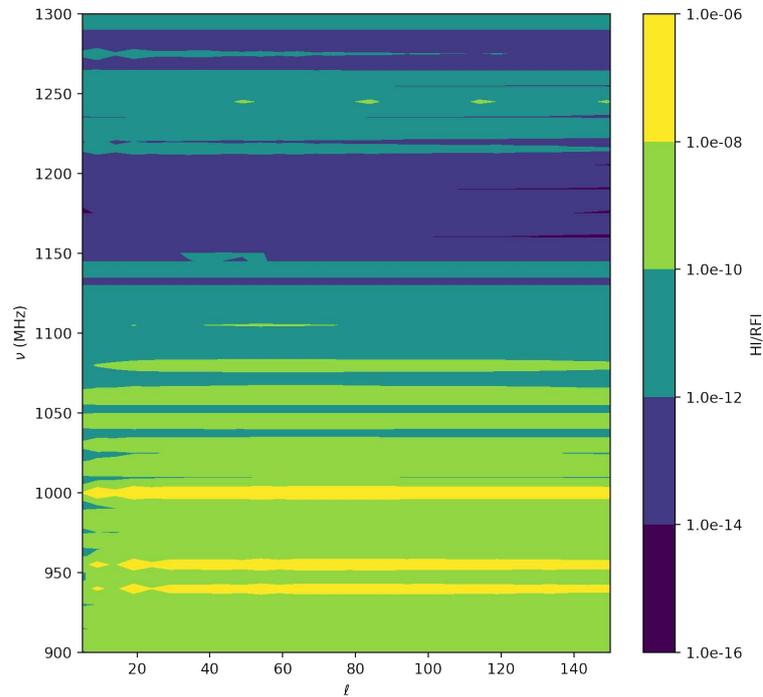


Figura 24 – Comparação do Espectro de Potência do Hidrogênio Neutro (HI) com o Ruído de Interferência de Rádio (RFI).

Essa comparação é de extrema importância para o estudo das RFIs em sinais cosmológicos, uma vez que os sinais provenientes do Hidrogênio Neutro são fundamentais para a compreensão da evolução e formação das estruturas no universo primordial. Ao identificar as regiões do gráfico onde o sinal cosmológico se destaca em relação ao ruído de interferência, é possível selecionar as faixas de frequências e multipolos mais adequadas para a análise cosmológica, maximizando a qualidade e confiabilidade dos resultados.

Além disso, a comparação entre o espectro de potência do HI e do RFI auxilia no desenvolvimento de estratégias de mitigação e remoção do ruído de interferência, permitindo uma melhor recuperação do sinal cosmológico. Essas estratégias são essenciais para aprimorar a sensibilidade das observações e desvendar informações cruciais sobre a física e a estrutura do universo.

Ressalta-se que o uso de filtros nos modelos de feixe pode retirar a emissão de outros satélites na faixa onde os satélites estão próximos ao eixo principal do feixe, o que pode levar a subestimação do tamanho real da temperatura flutuações do sistema receptor. Portanto, é importante levar esses efeitos em consideração ao analisar dados astronômicos e considerar modelos mais complexos para entender as flutuações de temperatura do sistema receptor.

Existem algumas opções viáveis para minimizar o impacto das interferências de

radiofrequência RFI causadas pelos sinais GNSS em pesquisas intensivas de mapeamento. Uma possibilidade é desenvolver um telescópio personalizado para a observação de HI, que tenha uma reduzida quantidade de lóbulos secundários. Outra alternativa é evitar as áreas próximas às faixas de transmissão dos satélites. No entanto, o estudo feito destaca que os sinais do GNSS podem estar presentes fora das faixas alocadas para sua transmissão e podem ser significativamente mais intensos em relação às fontes astrofísicas e cosmológicas, mesmo quando medidos nos lóbulos secundários do telescópio.

## 6 Conclusões

### 6.1 Síntese dos resultados

Os algoritmos desenvolvidos nesta dissertação são baseados em técnicas de detecção de sinais gaussianos e esses algoritmos são comparados com outros métodos de detecção de linhas espectrais, precisão de detecção e desempenho computacional para criar um modelo estatístico para detectar sinais cósmicos em meio ao ruído de radiofrequência. Os resultados experimentais simulados mostram que os algoritmos desenvolvidos nesta tese são mais precisos e mais eficientes do que os métodos manuais de mitigação e excisão de RFI.

A mitigação de RFI deve ser considerada um processo dinâmico e contínuo como parte integrante da construção de novos instrumentos de observação e da modernização de instalações existentes, assim como é projetado o BINGO. Em particular, o ruído sujeito aos radiotelescópios pode ser removido pelo processamento automatizado de dados e, devido ao aumento do ruído, a mitigação de RFI deve ser um processo de mitigação de ruído contínuo. Na verdade, o ruído RFI nunca pode ser completamente removido, mas pode ser reduzido a um nível aceitável. Portanto, a mitigação de RFI deve ser considerada não apenas como um processo de mitigação de ruído, mas também uma forma de minimizar a perda de dados.

Essas amostras de tensão real são convertidas em espectros feitos de valores complexos por Transformada discreta de Fourier processada por um espectrômetro, assim como expresso em [23].

A análise usada nesta dissertação é uma ferramenta importante para contornar a dificuldade de lidar com outliers. Estes estimadores são selecionados para serem imparciais, eficientes e convergentes, o que significa que eles conseguem produzir resultados precisos mesmo quando o conjunto de dados contém outliers cuja contribuição para a amostra é inferior a 50%.

### 6.2 Implicações e limitações do estudo

A análise de RFI possui implicações e limitações relevantes no estudo do radiotelescópio BINGO. Entre as implicações, destaca-se a capacidade de identificar as fontes de interferência de radiofrequência presentes no ambiente, permitindo compreender a origem dessas interferências e adotar medidas adequadas para mitigá-las. Essa identificação precisa contribuir para obter dados mais limpos e confiáveis, melhorando a qualidade das

observações e dos resultados obtidos.

Além disso, a análise de RFI auxilia na otimização da sensibilidade do radiotelescópio BINGO. Por meio da identificação das frequências e períodos de maior incidência de RFI, é possível ajustar os parâmetros de observação e evitar a contaminação dos dados por interferências. Dessa forma, maximiza-se a sensibilidade do radiotelescópio para capturar sinais astrofísicos mais fracos, aumentando a precisão das medidas.

No entanto, há limitações a serem consideradas: a interferência de radiofrequência pode contaminar os dados coletados pelo BINGO, introduzindo artefatos e distorcendo as observações. Essa presença de RFI nos dados dificulta a detecção de sinais astrofísicos relevantes e pode resultar em resultados imprecisos ou equivocados. Assim, é necessário identificar e remover efetivamente as interferências de RFI, garantindo uma análise confiável e precisa.

A dificuldade na identificação de fontes específicas é outro desafio. Em alguns casos, as fontes de RFI podem ser distantes ou variáveis, dificultando rastrear sua origem exata, o que limita a capacidade de eliminar completamente as interferências de RFI e pode demandar estratégias adicionais para mitigar seus efeitos nos dados observacionais.

A presença de RFI também é capaz de impactar a faixa de frequência observada pelo radiotelescópio BINGO. Certas frequências podem ser fortemente afetadas pelas interferências, tornando-as inadequadas para análise científica. Isso reduz a gama de frequências disponíveis para estudo, com o potencial de influenciar a capacidade de investigar certos fenômenos astrofísicos específicos que ocorrem nessas frequências.

Adicionalmente, a análise de RFI requer técnicas avançadas de processamento de dados para identificar, caracterizar e remover as interferências de radiofrequência. Esse processo exige um esforço computacional adicional e a aplicação de algoritmos complexos para garantir a eficácia da remoção das interferências. Essa etapa de processamento adicional pode aumentar a complexidade da análise e requerer recursos computacionais mais robustos.

### 6.3 Sugestões para pesquisas futuras

Com base nos resultados obtidos nesta dissertação sobre os impactos dos satélites GNSS no radiotelescópio BINGO, existem várias direções promissoras para investigações adicionais, como a exploração de técnicas avançadas de processamento de sinal.

Apesar dos esforços realizados na mitigação da interferência dos sinais GNSS, ainda há espaço para investigar e desenvolver técnicas mais avançadas de processamento de sinal. Por exemplo, a aplicação de algoritmos de filtragem adaptativa ou de aprendizado de máquina pode ajudar a identificar padrões específicos associados aos sinais GNSS e apri-

morar a supressão da interferência. Além disso, a utilização de técnicas de processamento de sinal em tempo real pode permitir uma detecção mais precisa e eficiente dos sinais astronômicos desejados. A exploração dessas abordagens promissoras contribuirá para o aperfeiçoamento das técnicas de mitigação de interferência e possibilitará uma melhor preservação dos sinais de interesse no contexto das observações do radiotelescópio BINGO.

Essa possibilidade, permite explorar abordagens mais avançadas no processamento de sinal para enfrentar os desafios específicos da interferência dos sinais GNSS. Ao investigar essas técnicas e sua aplicação no contexto do BINGO, será possível aprimorar ainda mais a capacidade do radiotelescópio em realizar medições precisas de HI e avançar no entendimento do Universo.



# Apêndices



# APÊNDICE A – Hidrogênio Neutro

A temperatura de brilho do HI pode ser escrita como [24]

$$T_{\text{HI}}(z) = 188\Omega_{\text{HI}}(z)\frac{H}{(1+z)^2}E(z) \text{ mK} \quad (\text{A.1})$$

$$P_{21} = \frac{T(z)}{2b_{\text{HI}}(z)^2 P_m(k, z)} \quad (\text{A.2})$$

$$\Omega_{\text{HI}}(z) = 2.7 \times 10^{-4} + 10^{-4} \frac{z - 8 \times 10^{-5}}{z^2} \quad (\text{A.3})$$

$$\Omega_{\text{HI}}(z) = 2.7 \times 10^{-4} + 10^{-4} \frac{z - 8 \times 10^{-5}}{z^2} \quad (\text{A.4})$$

Esses valores foram obtidos usando o catálogo HOD e podemos proceder para encontrar o espectro de potência angular para o hidrogênio neutro considerando a cosmologia WMAP5 e o procedimento para construir traçadores generalizados no pyclcl [25]:

$$C_{\alpha\beta\ell} = \frac{2}{\pi} \int d\chi_1 d\chi_2 dk k^2 P_{\alpha\beta}(k, \chi_1, \chi_2) \Delta_{\alpha\ell}(k, \chi_1) \Delta_{\beta\ell}(k, \chi_2) \quad (\text{A.5})$$

$$\Delta_{\alpha\ell}(k, \chi) = f_{\alpha\ell} W_{\alpha}(\chi) T_{\alpha}(k, \chi) j_{\ell}(k\chi) \quad (\text{A.6})$$

No presente caso, cada  $\Delta$  corresponde ao marcador de hidrogênio neutro,  $f_{\ell}$  é um pré-fator definido como 1,  $W_{\alpha}$  é uma função de janela assumida como um kernel de top hat,  $T_{\alpha}$  é a função de transferência adequada que codifica a informação HI e  $j_{\ell}(k\chi)$  é o termo da função de Bessel.

Conectando esta informação à expressão geral para o traçador, chegamos a uma expressão para o espectro de potência angular:

$$C_{I,J\ell} = \frac{2}{\pi} \int W_{\text{HI},\ell}(k) W_{J,\ell}(k) k^2 P_m(k; 0) dk \quad (\text{A.7})$$

$$W_{\text{HI},\ell}(k) = \int \frac{b_{\text{HI}}(z) \Theta(z_{\text{max}} - z_{\text{min}}) T_{\text{HI}}(z) D(z) j_{\ell}[k\chi(z)]}{z_{\text{max}} - z_{\text{min}}} dz \quad (\text{A.8})$$

$$D(z) = \left[ \frac{P_m(k; 0)}{P_m(k; z)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.9})$$

$$\chi(z) = \frac{c}{H_0} \int \frac{dt}{E(z)} \quad (\text{A.10})$$

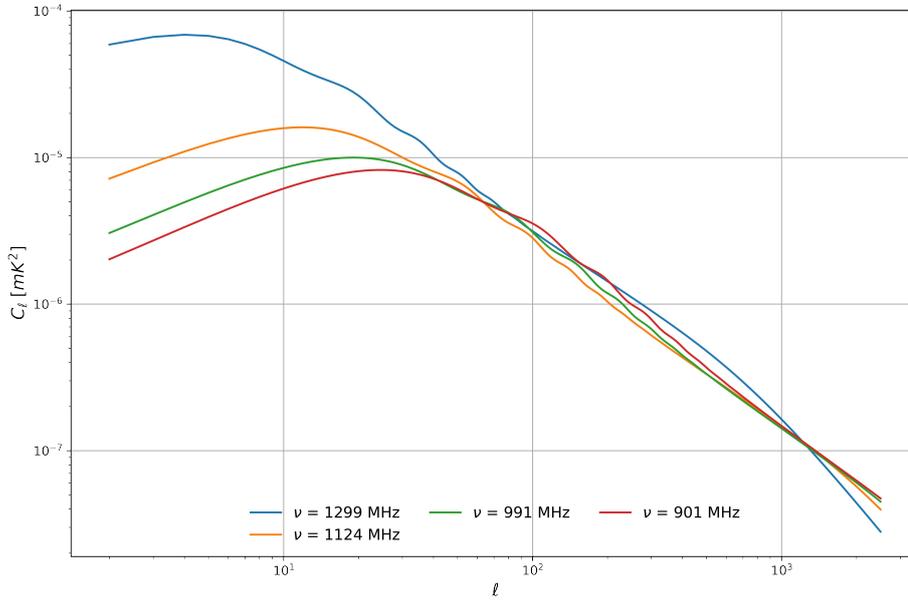


Figura 25 –  $C_\ell$  teórico para sinal cosmológico HI obtido através da construção de um traçador personalizado para pyccl.

A figura 25 ilustra o espectro de potência do hidrogênio neutro em emissão de rádio. São usadas funções descritas no apêndice B para calcular o fator de escala do universo, a frequência da radiação de 21 cm, o viés para o hidrogênio neutro, a densidade de matéria bariônica de hidrogênio neutro e a temperatura de brilho de hidrogênio neutro.

Os espectros de potência obtidos constituem uma importante medida estatística da distribuição espacial do hidrogênio neutro no universo, fornecendo informações acerca de como ele é distribuído em diferentes escalas.

Ao analisar o espectro  $C_\ell$ , é possível investigar a presença de estruturas como galáxias, aglomerados de galáxias e filamentos cósmicos, responsáveis por essas flutuações.

A análise do espectro de potência do HI no espectro  $C_\ell$  permite a extração de informações sobre parâmetros cosmológicos, como o viés do HI e a densidade de matéria de HI. Estas informações são cruciais para entender a formação e evolução das estruturas no universo, além de fornecerem restrições importantes para modelos cosmológicos.

Além disso, o espectro de potência do HI no espectro  $C_\ell$  é uma medida fundamental para estudos de correlações cruzadas entre o HI e outros tracers cosmológicos, como a radiação cósmica de fundo em micro-ondas (CMB), a distribuição de galáxias e os dados de lentes gravitacionais. Essas correlações cruzadas fornecem conjecturas adicionais sobre a evolução do universo e as propriedades das estruturas cósmicas.

# APÊNDICE B – Ferramentas de Simulação em Python

A utilização de códigos de programação para análise de dados astronômicos vem se tornando cada vez mais frequente nos últimos anos. A linguagem de programação Python, em particular, tem se destacado nesse contexto por sua flexibilidade, facilidade de uso e grande quantidade de bibliotecas disponíveis para a análise de dados.

Nesse contexto, o objetivo deste apêndice é apresentar o processo de criação de um conjunto de códigos em Python voltados para a análise de espectros de sinais de satélites recebidos pelo radiotelescópio BINGO. Para tanto, são abordados aspectos como a escolha das bibliotecas utilizadas, a definição das classes e funções necessárias para a análise dos dados, além do processo de normalização e visualização dos resultados.

Com base nesse conjunto de códigos, é possível realizar a análise de diversos aspectos relacionados aos sinais recebidos pelo radiotelescópio BINGO, incluindo a identificação de satélites de GPS, GLONASS, GALILEO e BEIDOU, bem como a avaliação da intensidade e distribuição dos sinais recebidos.

## B.1 Conjunto de dados

As observações foram realizadas em diferentes momentos e com diferentes configurações. Foram coletados dados de diversas fontes astrofísicas, como galáxias, radiação cósmica de fundo e outros fenômenos cósmicos. Além disso, foram realizadas medições e análises para caracterizar o ruído de fundo e as interferências de radiofrequência que podem afetar as observações.

Após a coleta dos dados, eles foram processados e analisados utilizando técnicas específicas. Foram aplicados métodos de redução de ruído, correção de interferências e calibração dos sinais, como também realizadas interpolações e ajustes para obter medidas em pontos específicos e extrapolar informações para toda a faixa de frequência.

O conjunto de dados abrange diferentes aspectos, incluindo a carga e a manipulação de medições do LIT para polarização horizontal do radiotelescópio UIRAPURU, a concatenação de arquivos GRASP para produzir feixes do BINGO, a simulação de espectros de frequência para várias constelações de satélites, a geração de mapas de ruído e muito mais.

Todo esse processo envolveu o uso de algoritmos e técnicas de processamento de dados especializados, bem como a aplicação de modelos teóricos e suposições para

interpretar os resultados. Dessa maneira, os dados foram organizados em conjuntos de informações relevantes, como espectros, mapas de ruído e outros parâmetros cosmológicos.

Ao longo das análises e simulações, várias implicações e limitações são consideradas, como por exemplo, a presença de RFI é uma limitação significativa, pois pode contaminar os dados coletados e distorcer as observações. Portanto, é necessário identificar e mitigar efetivamente essas interferências para obter análises confiáveis e precisas. Além disso, as limitações instrumentais dos radiotelescópios, como sensibilidade e resolução espacial, podem restringir a capacidade de detectar sinais fracos e estudar certos fenômenos astrofísicos específicos.

O código está organizado em uma parte central localizada na pasta (**src**), em arquivos (**.py**) com as principais classes e funções e em uma sequência de notebooks que implementa as análises realizadas.

Na pasta **src** temos:

- `beams.py`: implementa a classe `Beam`, que encapsula todas as funções necessárias para a manipulação dos feixes, incluindo ajustes, padrão do feixe, ganho e temperatura de brilho. Também tem a classe derivada `WindowedBeam` que implementa um feixe com filtro angular.
- `gnss.py`: implementa as modulações de sinais de satélites GNSS BPSK, BOC, BOC<sub>c</sub> e AltBOC e as densidades espectrais de potência para cada uma das constelações de satélites.
- `noise.py`: implementa rotinas para gerar ruídos em diferentes frequências utilizando o Planck Sky Model e uma função para a geração de ruído branco.
- `simulations.py`: implementa rotinas para gerar os espectros associados aos satélites GNSS tanto como TOD como em formato de mapa.
- `sky.py`: implementa rotinas para a determinação das coordenadas celestes associadas aos satélites das 4 constelações GNSS. Também inclui uma função para realizar um KDE na esfera para visualização das órbitas dos satélites.

Na pasta **notebooks** temos:

- `00_DATASETS.ipynb`: para garantir a eficiência do código, as principais rotinas são realizadas neste notebook e salvas em formato csv para serem lidas nos demais notebooks.
- `01_BEAMS.ipynb`: analisa os feixes do Uirapuru e BINGO, com visualizações do padrão do feixe ajustado, FWHM e ganho.
- `02_SKY.ipynb`: apresenta visualização das órbitas dos satélites com uma aproximação KDE.

- 03\_SPECTRUM.ipynb: Analisa a TOD para Uirapuru e BINGO, com visualizações do waterfall, Densidade Espectral de Potência e variância de allan.
- 04\_CLL\_HI.ipynb: Implementa a cosmologia WMAP5 e cria um traçador customizado no pyccel para descrever o espectro de potência do Hidrogênio Neutro.
- 05\_MAPS.ipynb: gera mapas para ruídos e para o sinal dos satélites, permitindo visualização comparativa com o sinal cosmológico.

### B.1.1 Beams

Os principais métodos da classe beam são os seguintes:

```

1     def EE_gauss(self, rr, freq):
2         """Define o perfil de ilumina o da abertura como uma
3         gaussiana truncada."""
4         if rr.ndim ==1:
5             rr = rr[:,np.newaxis]
6
7         AA = self.Apertures_func(freq)
8         FWHMs = self.FWHMs_func(freq)
9         SIGMA = (np.sqrt(2*np.log(2)))/FWHMs
10
11        result = np.where(rr<=AA/2, np.exp(-1/2 * (rr/SIGMA))**2,0)
12        return result
13
14    def beam_pattern(self, freq, theta, num_int=100):
15        """Padr o normalizado do feixe como a transformada de Hankel da
16        ilumina o."""
17
18        theta = theta[:,np.newaxis,np.newaxis]
19
20        AA = self.Apertures_func(freq)
21        rr = np.linspace(0,AA/2, num_int)
22
23        _num = (self.EE_gauss(rr, freq) * rr)[np.newaxis, :] * j0(2*np.
24        pi*np.sin(theta)*rr)
25        _den = self.EE_gauss(rr, freq) * rr
26
27        num = np.trapz(_num, rr[np.newaxis,:], axis=1)
28        den = np.trapz(_den, rr, axis=0)
29
30        result = np.abs(num/den)**2
31        return result
32
33    def gain(self, freq):
34        """Ganho obtido por integra o num rica do padr o do feixe.
35        """

```

```

33     tt = np.linspace(0, np.pi, 1000)
34     den = 2*np.pi*np.trapz((self.beam_pattern(freq, tt).T * np.sin(
35     tt)).T, tt, axis=0)
36     result = 4 * np.pi/den
37     return result
38
39     def T_A(self, freq, theta, signal, bandwidthMHz):
40         """Temperatura de antena dado feixe e sinal detectado, em Kelvin
41         .
42         """
43         GAIN = self.gain(freq)
44         prefactor = 10**(-38) * c**2/(kB*4*np.pi*freq**2)  ## Jy ->
45         Kelvin
46         signal = signal(freq, bandwidthMHz)
47
48         result = ((prefactor * GAIN * signal) * self.beam_pattern(freq,
49         theta)).astype(float)
50
51         return result.T

```

## B.1.2 GNSS

As modulações dos sinais GNSS são definidas nas funções abaixo:

```

1     def BPSK(freq, freq_c, nu0, m):
2         try:
3             x = np.pi * (freq-freq_c) * (1/(nu0*m))
4             result = (1/(nu0*m)) * np.sinc(x/np.pi)**2
5         except ZeroDivisionError:
6             result = 1
7         return result
8
9     def BOC(freq, freq_c, nu0, m,n):
10        try:
11            x = np.pi*(freq-freq_c)/(n*nu0)
12            y = np.pi*(freq-freq_c)/(m*nu0)
13            result = m*nu0*(np.sin(x/2)*np.sin(y)/(np.pi*(freq-freq_c)*np.
14            cos(x/2))**2
15        except ZeroDivisionError:
16            result = 1
17        return result
18
19    def BOCc(freq, freq_c, nu0, m,n):
20        try:
21            x = np.pi*(freq-freq_c)/(n*nu0)
22            y = np.pi*(freq-freq_c)/(m*nu0)

```

```

22     result = m*nu0*( np.sin(y)/( np.pi*(freq-freq_c)*np.cos(x/2)))
    **2 * (np.cos(x/2) - 1)**2
23     except ZeroDivisionError:
24         result = 1
25     return result
26
27 def altBOC(freq, freq_c, nu0, m,n):
28     try:
29         x = np.pi*(freq-freq_c)/(n*nu0)
30         y = np.pi*(freq-freq_c)/(m*nu0)
31         result = (8*nu0*m)*(1/(np.pi**2*(freq-freq_c)**2))*((np.cos(y))
    /(np.cos(x/2)))**2 * (1-np.cos(x/2))
32     except ZeroDivisionError:
33         result = 1
34     return result

```

Consideramos que todos os satélites de uma dada constelação tem o mesmo sinal. Determinados a EIRP para cada constelação considerando altitude nominal das órbitas e a potência mínima do sinal recebida em terra, também nominal. As funções que reproduzem o sinal para cada uma das constelações segue abaixo:

```

1     def _PSD_GPS(freq, EIRP, rr):
2         # Watt
3         P1 = 10**(EIRP/10)/(4* np.pi * rr**2)
4         result = P1 * (BPSK(freq, 1176.45, 1.023, 10)
5             + BPSK(freq, 1227.6, 1.023, 1)
6             + BPSK(freq, 1227.6, 1.023, 10)
7             + BOC(freq, 1227.6, 1.023, 5, 10)
8             )
9         return result
10
11
12 def _PSD_GLONASS(freq, EIRP, rr):
13     # Watt
14     P1 = 10**(EIRP/10)/(4* np.pi * rr**2)
15     result = P1 * (BPSK(freq, 1246, 0.511, 1)
16         + BPSK(freq, 1246, 0.511, 10)
17         + BPSK(freq, 1202.025, 1.023, 10)
18         + BPSK(freq, 1248.06, 1.023, 1)
19         + BOC(freq, 1248.06, 1.023, 1, 1)
20         + BOC(freq, 1248.06, 1.023, 2.5, 5)
21         )
22     return result
23
24
25 def _PSD_GALILEO(freq, EIRP, rr):
26     # Watt

```

```
27     P1 = 10**(EIRP/10)/(4* np.pi * rr**2)
28     result = P1 * (altBOC(freq, 1191.795, 1.023, 10, 15)
29                   + BPSK(freq, 1278.75, 1.023, 5)
30                   + BOCc(freq, 1278.75, 1.023, 5, 10)
31                   )
32     return result
33
34
35 def _PSD_BEIDOU(freq, EIRP, rr):
36     # Watt
37     P1 = 10**(EIRP/10)/(4* np.pi * rr**2)
38     result = P1 * (altBOC(freq, 1176.45, 1.023, 10, 15)
39                   + BPSK(freq, 1268.52, 1.023, 10)
40                   + BOC(freq, 1268.52, 1.023, 2.5, 15)
41                   )
42     return result
43
44
45 def S_GNSS(freq, EIRP, rr, bandwidthMHz, constellation=None):
46     if constellation == "GPS":
47         result = _PSD_GPS(freq, EIRP, rr)/(bandwidthMHz * 1e6)
48     elif constellation == "GLONASS":
49         result = _PSD_GLONASS(freq, EIRP, rr)/(bandwidthMHz * 1e6)
50     elif constellation == "GALILEO":
51         result = _PSD_GALILEO(freq, EIRP, rr)/(bandwidthMHz * 1e6)
52     elif constellation == "BEIDOU":
53         result = _PSD_BEIDOU(freq, EIRP, rr)/(bandwidthMHz * 1e6)
54     else:
55         print("Constela o inv lida.")
56
57     return 10**26 * result
58
59
60 def S_GPS(freq, bandwidthMHz):
61     EIRP = 24.6
62     result = S_GNSS(freq, EIRP, 20180e3, bandwidthMHz, constellation="
63     GPS")
64     return result
65
66 def S_GLONASS(freq, bandwidthMHz):
67     EIRP = 21.1
68     result = S_GNSS(freq, EIRP, 19100e3, bandwidthMHz, constellation="
69     GLONASS")
70     return result
71
```

```

72 def S_GALILEO(freq, bandwidthMHz):
73     EIRP = 25.8
74     result = S_GNSS(freq, EIRP, 23222e3, bandwidthMHz, constellation="
75     GALILEO")
76     return result
77
78 def S_BEIDOU(freq, bandwidthMHz):
79     EIRP = 24.6
80     result = S_GNSS(freq, EIRP, 21528e3, bandwidthMHz, constellation="
81     BEIDOU")
82     return result

```

### B.1.3 Noise

Temos uma função que produz ruídos em uma banda de frequência utilizando o Planck Sky Model implementado pela biblioteca **pysm3** e uma função que gera ruído branco em uma frequência específica, a partir de uma temperatura de instrumento especificada.

```

1     def make_noise_maps(freq_min, freq_max, bandwidth, FWHM, NSIDE=64,
2         noise_strings=["s1"]):
3         freq_min = freq_min * u.MHz
4         freq_max = freq_max * u.MHz
5         FWHM = FWHM * u.deg
6         bandwidth = bandwidth * u.MHz
7         maps = []
8         sky = pysm3.Sky(nside=NSIDE, preset_strings=noise_strings)
9         num_freqs = int((freq_max-freq_min)/bandwidth) + 1
10        freqs = np.linspace(freq_min, freq_max, num_freqs)
11        for freq in freqs:
12            noise_map = sky.get_emission(freq)
13            map_smoothed_rotated = pysm3.apply_smoothing_and_coord_transform
14            (noise_map, rot=hp.Rotator(coord="GE"), fwhm=FWHM)
15            tmp_map = map_smoothed_rotated[0]
16            maps.append(tmp_map)
17        result = np.asarray(maps)
18        return result
19
20    def realise_white_noise(freq, Tins, tp, FWHM, dnu, NSIDE):
21        dtheta = hp.pixelfunc.nside2resol(NSIDE)
22        t_res = tp * dtheta**2/FWHM**2
23        Tsky = 60*(freq/300)**(-2.5)
24        Tsys = Tins + Tsky
25        sigma_rms = Tsys / np.sqrt(t_res * dnu * 1e6)
26        noise = np.random.normal(0., 1., hp.nside2npix(NSIDE))*sigma_rms
27        return noise

```

### B.1.4 Simulations

A função `make_spectrum` recebe como argumentos um intervalo de frequências, um dataframe com informações de tempo e posição dos satélites, um método da classe `Beam` para calcular a temperatura do feixe, o PSD associado ao satélite e a largura de banda para a resolução espectral, retornando um dataframe indexado pela coluna de tempo (expresso como tempo atômico internacional) e com as colunas indicando as diferentes frequências na forma de um dataframe `wide`.

A função `make_spectra` é uma conveniência para chamar a função para uma lista de constelações, iterando sobre ela e concatenando o resultado. A variável `ALT` do dataframe `data` com as posições do satélite indica a altitude do radiotelescópio. Para o caso do BINGO, a iteração nesta variável permite obter os resultados para as diferentes cornetas em um único dataframe.

```

1   csts = ["GPS", "GSAT", "BEIDOU", "COSMOS"]
2   signals = {"GPS":gnss.S_GPS, "COSMOS":gnss.S_GLONASS, "GSAT":gnss.
3             S_GALILEO, "BEIDOU":gnss.S_BEIDOU}
4   def make_spectrum(freqs=None, data=None, TT=None, signal=None, bandwidth
5                     =None):
6       result = pd.DataFrame(TT(freqs, data.ANGLE.values, signal, bandwidth
7                             ).T,
8                             index=data.TIME,
9                             columns=freqs).groupby("TIME").sum().
10          reset_index()
11          return result
12
13  def make_spectra(csts=csts, freqs=None, data=None, TT=None, bandwidth=
14                  None):
15      results = []
16      for name, groupAlt in data.groupby("ALT"):
17          spectra = []
18          for cst in csts:
19              df = groupAlt.query("CST == @cst", local_dict={"cst": cst})
20              signal = signals[cst]
21              spectrum = make_spectrum(freqs=freqs, data=df, TT=TT, signal
22                                     =signal, bandwidth=1)
23              spectra.append(spectrum)
24          df_ALT = pd.concat(spectra).groupby("TIME").sum().reset_index()
25          df_ALT["ALT"] = name
26          results.append(df_ALT)
27      result = pd.concat(results)
28      return result

```

### B.1.5 SKY

- Definimos as URLs para download das TLEs a partir do site celestrak. É importante observar a data das TLEs e ajustar a data da simulação em um intervalo menor do que um mês, uma vez que as órbitas dos satélites são frequentemente corrigidas.
- Definimos uma pasta para realizar os downloads a partir da biblioteca **skyfield**.
- Fazemos o download de um arquivo de efemérides adequado. Escolhemos utilizar o arquivo **de440s** com dados válidos 1849 a 1950 e com acurácia suficiente para os nossos propósitos.
- Inicializados uma escala temporal do **skyfield**.
- A função **make\_timevector** recebe como entrada um tempo inicial em formato de data válido do python e com informação de fuso horário, uma duração e um intervalo de tempo da forma de uma quantidade do **astropy**. A função produz um vetor com datas a partir da data inicial com intervalo indicado por **delta** e duração especificada. Internamente a função utilizada os formatos de tempo do **astropy** mas retorna um objeto que é mais eficiente do ponto de vista de memória, a escala temporal do **skyfiels**.
- A função **make\_pointings** produz um dataframe com informações de tempo e de coordenadas equatoriais para os apontamentos de um instrumento a partir de dados de uma escala temporal, uma localização na superfície da Terra e informações de coordenadas horizontais de apontamento do equipamento. É sempre suposto que o instrumento seja um instrumento de trânsito.

```

1 # Endereco para as TLEs dos satelites
2 TLE_urls = ['https://celestrak.com/NORAD/elements/gps-ops.txt', 'https
   ://celestrak.com/NORAD/elements/glo-ops.txt', 'https://celestrak.com/
   NORAD/elements/galileo.txt', 'https://celestrak.com/NORAD/elements/
   beidou.txt']
3 #-----
4 # Iniciando objetos skyfield globais
5 sky_loader = api.Loader('../data/raw')
6 eph = sky_loader('de440s.bsp')
7 #sky_loader = Loader('./')
8 earth = eph['earth']
9 ts = api.load.timescale()
10 #-----
11 def make_timevector(t_start=None, duration=None, delta=1*u.h):
12     """Faz vetor de tempo.
13
14     Vetor com timestamps a partir de t_start, com intervalo delta e
15     durac o, no formato de tempo do skyfield.
16     """
17     delta = delta.to(u.s).value

```

```

17     steps = duration.to(u.s).value / delta
18     vec = np.arange(steps)
19     # Astropy timevector is fast to create.
20     timelist = Time(t_start, scale='utc') + np.arange(steps)*TimeDelta(
delta, format='sec', scale='tai')
21     # Convert to skyfield timescale for later use.
22     timevector = ts.from_astropy(timelist)
23     return timevector
24
25
26 def make_pointings(timevector=None, observer=None, Alt=None, Az=None):
27     """Faz apontamentos para observador.
28
29     Args:
30         timevector (type): vetor de tempos para determina o das
posi es. Defaults to None.
31         observer (type): objeto `observer` cont m informa es de
latitude, longitude e altitude para observador. Defaults to None.
32         Alt (type): altitude `Alt`, coordenada horizontal para
apontamento. Defaults to None.
33         Az (type): azimute `Az`, coordenada horizontal para apontamento.
Defaults to None.
34
35     Returns:
36         DataFrame: colunas TIME, RA e DEC.
37
38     """
39     # skyfield para obter coordenadas rapidamente.
40     ra, dec, _ = observer.at(timevector).from_altaz(alt_degrees=Alt,
az_degrees=Az).radec(ts.J2000)
41     # astropy para manipular e desempactor vetor de coordenadas.
42     pointings_sky = coord.SkyCoord(ra.hours, dec.degrees, unit=(u.
hourangle, u.deg), frame='icrs', equinox='J2000')
43     RA = pointings_sky.ra.radian
44     DEC = pointings_sky.dec.radian
45     TIME = timevector.tai
46     df = pd.DataFrame(zip(TIME, RA, DEC), columns=["TIME", "RA", "DEC"])
47     return df

```

Para a determinação dos satélites e suas posições no céu do radiotelescópio em um intervalo de tempo construímos três funções que utilizam a lógica da biblioteca **skyfield** e utiliza a biblioteca **dask** para construir dataframes que otimizam a memória e podem ser gravados em múltiplos arquivos em disco. Nosso objetivo é construir informações acerca de satélites em vinte e quatro horas com uma granularidade temporal de um minuto para as quatro constelações, portanto, para mais de cem satélites, exigindo algum cuidado especial no gerenciamento do processamento para otimizar tanto o tempo de execução quanto o

uso da memória. A biblioteca **dask** implementa naturalmente métodos e funções que nos auxiliam nesta tarefa.

A função `__pos` é uma função de conveniência que constrói um vetor entre o objeto celeste e o instrumento, calculado nos tempos indicados na escala temporal. Sua entrada são dois objetos **skyfield** e uma escala de tempo. Internamente estas posições são salvas em um sistema de coordenadas cartesiano em três dimensões e a biblioteca provê métodos para extrair dados de coordenadas celestes.

A função `__get_satellites` encapsula toda a lógica necessária para a determinação da posição de um satélite. Esta é uma função decorada com o decorador **delayed** e, portanto, ela só é efetivamente executada quando explicitamente indicado. A função recebe como parâmetros dois objetos **skyfield**, uma escala temporal e coordenadas horizontais, constrói um objeto com centro na Terra usando a função `__pos` e extrai as informações de coordenadas equatoriais com o método **radec** e o ângulo entre o apontamento do instrumento e o objeto celeste é determinado com o método **observer.at(timevector).from\_altaz(alt\_degrees=Alt, az\_degrees=Az).separation\_from(pos)**. A função retorna um **dask array** com a informação dos tempos na escala atômica internacional **float**, coordenadas equatoriais em radianos, ângulo entre a visada do instrumento e o objeto celeste em radianos e o nome do objeto celeste.

A função **make\_sky** é a principal função do pacote. Seu objetivo é construir informações sobre os objetos no céu visto pelo instrumento. Esta função carrega os dados de todos os satélites a partir das TLEs (fazendo o download caso os arquivos não existam em disco) e chama a função `__get_satellites` recursivamente. A partir da lista de **delayed arrays** constroi um dataframe **dask**.

```

1     def __pos(obj, observer, timevector):
2         pos = (obj - observer).at(timevector)
3         return pos
4
5     @delayed
6     def __get_satellites(obj, observer, timevector, Alt, Az):
7         pos = __pos(obj, observer, timevector)
8         ra, dec, dist = pos.radec()
9         cone = observer.at(timevector).from_altaz(alt_degrees=Alt,
10            az_degrees=Az).separation_from(pos)
11         RA = coord.Longitude(ra._degrees, u.deg, wrap_angle=180*u.deg).to(u.
12            rad).value
13         sats = da.from_array([timevector.tai, RA, dec.radians, cone.radians,
14            [obj.name] * len(timevector)])
15         return sats
16
17     def get_satellites(timevector=None, observer=None, Alt=None, Az=None,
18            reload=False, save=False, foldername=None):

```

```

15
16 # -----
17 # Loading satellite data.
18 # -----
19 TLE = TLE_urls
20 satellites = []
21 for url in TLE:
22     satellites.append(sky_loader.tle_file(url, reload=reload))
23 gnss_all = list(itertools.chain(*satellites))
24 # -----
25 # Generate positions in dataframe.
26 # -----
27 # TLE are geocentric, observer should also be geocentric.
28 objects = []
29 for ii, satellite in enumerate(gnss_all):
30     sat_obj = _get_satellites(satellite, observer, timevector, Alt,
Az)
31     objects.append(sat_obj)
32
33 primeiro = objects[0].compute()
34 arrays = [dd.from_dask_array(da.from_delayed(obj, dtype=primeiro.
dtype, shape=(5, len(timevector))).T) for obj in objects]
35 ddf = dd.concat(arrays)
36 # generate dask datafram
37 # # name columns
38 ddf.columns = ['TIME', 'RA', 'DEC', 'ANGLE', 'NAME']
39 ddf['TIME'] = ddf['TIME'].astype(float)
40 ddf['RA'] = ddf['RA'].astype(float)
41 ddf['DEC'] = ddf['DEC'].astype(float)
42 ddf['ANGLE'] = ddf['ANGLE'].astype(float)
43 ddf['NAME'] = ddf['NAME'].astype(str)
44 if save:
45     if foldername:
46         ddf.repartition(partition_size="500MB").to_parquet(
foldername, engine="pyarrow", compression=None)
47     else:
48         print("Nome da pasta n o definido.")
49 return ddf
50
51
52 def make_sky(timevector=None, observer=None, Alt=None, Az=None, save=
False, load=False, suffix=None):
53     # Fazendo apontamentos
54     if not isinstance(Alt, Iterable):
55         Alt = np.asarray([Alt])
56     duration = str(int(np.ceil(24*(timevector[-1] - timevector[0])))
57     n_ALT = str(len(Alt))

```

```

58     file_suffix = duration + "h_" + "ALT_" + n_ALT + str(suffix)
59
60     if load:
61         filename = "../data/processed/pointings_" + file_suffix + ".csv"
62         pointings = pd.read_csv(filename)
63         print("Arquivo {} carregado com sucesso.\n".format(filename))
64     else:
65         pointings = np.asarray([make_pointings(timevector=timevector,
66                                             observer=observer,
67                                             Alt=alt,
68                                             Az=Az) for alt in Alt
69 ])
69     dfs = []
70     for ii, alt in enumerate(Alt):
71         data = pointings[ii,:,1:]
72         df = pd.DataFrame(data, columns=["RA", "DEC"])
73         df["TIME"] = timevector.tai
74         df["ALT"] = alt
75         dfs.append(df)
76     pointings = pd.concat(dfs)
77     if save:
78         filename = "../data/processed/pointings_" + file_suffix + ".
79 csv"
80         pointings.to_csv(filename, index=True)
81         print("Arquivo {} salvo com sucesso.\n".format(filename))
82
83     # Fazendo rbitas dos sat lites
84     if load:
85         filename = "../data/processed/sky_" + file_suffix + ".parquet"
86         ddf = dd.read_parquet(filename, engine="pyarrow")
87         print("Arquivo {} carregado com sucesso.\n".format(filename))
88     else:
89         ddfs = [ get_satellites(timevector=timevector, observer=observer
90 , Alt=alt, Az=Az)
91                 for alt in Alt
92                 ]
93     for ii, ddf in enumerate(ddfs):
94         ddf["Az"] = Az
95         ddf["ALT"] = Alt[ii]
96     #ddf = dd.concat(ddfs, axis=1)
97     ddf = dd.concat(ddfs, axis=0)
98     ddf["CST"] = ddf.NAME.apply(lambda val: str(val).split(" ")[0].
99 split("0")[0].split("-")[0])
100     ddf = ddf.query('~ NAME.str.contains("BEIDOU-3 G")')
101     ## GPS spare satellites
102     ddf = ddf.query('~ NAME.str.contains("PRN 11")')
103     ddf = ddf.query('~ NAME.str.contains("PRN 18")')

```

```

101     #-----
102     ddf = ddf.query('ANGLE < 1.57') # pi/2
103     #Salva dados
104     if save:
105         filename = "../data/processed/sky_" + file_suffix + ".
parquet"
106         ddf.repartition(partition_size="500MB").to_parquet(filename,
engine="pyarrow", compression=None)
107         print("Arquivo {} salvo\n".format(filename))
108     return pointings, ddf

```

A função `kde_fit` é utilizada para a visualização do mapa de densidades de satélites em coordenadas equatoriais em projeção mollweide. É utilizada a métrica **haversine** na esfera e a Kernel Density Estimation é realizada com a função **KernelDensity** do pacote **scikit-learn**.

```

1     def kde_fit(data = None, angular_size=1, metric="haversine", kernel=
"gaussian", bandwidth=0.2):
2         """Ajusta kde.
3
4         Retorna tripla com coordenadas e valores de densidade de satélites
por reatido espaço, calculados com KDE, conforme parâmetros de
resolução angular, métrica, kernel e largura de banda indicados.
5         """
6         # Intervalo de variação das coordenadas e criação de grid
bidimensional
7         RA_min, RA_max = data.RA.min(), data.RA.max()
8         DEC_min, DEC_max = data.DEC.min(), data.DEC.max()
9         RA, DEC = np.mgrid[RA_min:RA_max:angular_size, DEC_min:DEC_max:
angular_size]
10        # Formatação de dados do GRID em array empilhado
11        positions = np.vstack([DEC.ravel(), RA.ravel()])
12        # Formatação de dados de posições em array empilhado
13        values = np.vstack([data.DEC, data.RA])
14        # Inicialização de objeto Kernel Density Estimator com valor
específico de bandwidth, métrica e kernel
15        kde = KernelDensity(bandwidth=bandwidth, metric=metric, kernel=
kernel)
16        # Determinação dos parâmetros KDE para os valores de dados
17        kde.fit(values.T)
18        # Cálculo dos valores de intensidade de cada ponto do grid
19        ZZ = np.exp(kde.score_samples(positions.T))
20        # Ajuste da forma para array bidimensional de coordenadas,
normalização e conversão para
21        # valores de densidade em stereoradianos
22        ZZkde = ZZ.reshape(RA.shape)/(4 * np.pi * ZZ.sum())
23        return RA, DEC, ZZkde

```

# Referências

- 1 Wilson, T. L.; Rohlfs, K.; Hüttemeister, S. *Tools of Radio Astronomy*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas [13](#), [23](#) e [24](#).
- 2 MARR, J. M.; SNELL, R. L.; KURTZ, S. E. *Fundamentals of radio astronomy: observational methods*. [S.l.]: CRC Press, 2015. v. 13. Citado na página [14](#).
- 3 KRAUS, J. D. et al. *Radio astronomy*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1986. v. 66. Citado 3 vezes nas páginas [14](#), [19](#) e [20](#).
- 4 CHAKRABORTY, A.; ROY, N. Detection of h i 21 cm emission from a strongly lensed galaxy at z 1.3. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 519, n. 3, p. 4074–4081, 2023. Citado na página [15](#).
- 5 ABDALLA, E. et al. The BINGO Project I: Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutral Gas Observations. *arXiv e-prints*, p. arXiv:2107.01633, jul. 2021. Citado 7 vezes nas páginas [16](#), [22](#), [28](#), [39](#), [40](#), [41](#) e [63](#).
- 6 OFFRINGA, A. R. Algorithms for radio interference detection and removal. *Ph. D. thesis*, 2012. Citado na página [21](#).
- 7 WILSON, T. L.; ROHLFS, K.; HÜTTEMEISTER, S. *Tools of radio astronomy*. [S.l.]: Springer, 2009. v. 5. Citado 2 vezes nas páginas [22](#) e [25](#).
- 8 HARPER, S. E.; DICKINSON, C. Potential impact of global navigation satellite services on total power h i intensity mapping surveys. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 479, n. 2, p. 2024–2036, 2018. Citado 7 vezes nas páginas [24](#), [28](#), [34](#), [36](#), [54](#), [55](#) e [59](#).
- 9 THOMPSON, A. R.; MORAN, J. M.; SWENSON, G. W. Radio frequency interference. In: *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. [S.l.]: Springer, 2017. p. 787–808. Citado 3 vezes nas páginas [28](#), [33](#) e [62](#).
- 10 RANCY, F. *Handbook on Radio Astronomy*. [S.l.: s.n.], 2013. 164 p. Citado 3 vezes nas páginas [28](#), [31](#) e [32](#).
- 11 WUENSCHÉ, C. et al. Baryon acoustic oscillations from Integrated Neutral Gas Observations: Broadband corrugated horn construction and testing. *Experimental Astronomy*, v. 50, n. 1, p. 125–144, jul. 2020. Citado na página [29](#).
- 12 GILLOIRE, A.; SIZUN, H. Rfi mitigation of gnss signals for radio astronomy: problems and current techniques. *annals of telecommunications-Annales des télécommunications*, Springer, v. 64, n. 9, p. 625–638, 2009. Citado 3 vezes nas páginas [31](#), [32](#) e [63](#).
- 13 CELESTRAK, S. *Web site of CELESTRAK*. Citado 2 vezes nas páginas [34](#) e [55](#).
- 14 Rhodes, B. *Skyfield: High precision research-grade positions for planets and Earth satellites generator*. 2019. ascl:1907.024 p. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1907.024. Citado na página [34](#).

- 15 WUENSCHÉ, C. et al. Baryon acoustic oscillations from integrated neutral gas observations: Broadband corrugated horn construction and testing. *Experimental Astronomy*, Springer, v. 50, n. 1, p. 125–144, 2020. Citado na página 36.
- 16 PRICE-WHELAN, A. M. et al. The astropy project: Building an open-science project and status of the v2. 0 core package. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 156, n. 3, p. 123, 2018. Citado na página 39.
- 17 ABDALLA, F. B. et al. The BINGO Project III: Optical design and optimisation of the focal plane. *arXiv e-prints*, p. arXiv:2107.01635, jul. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 61.
- 18 DODELSON, S.; SCHMIDT, F. *Modern cosmology*. [S.l.]: Academic press, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 43, 46 e 47.
- 19 BASSETT, B.; HLOZEK, R. Baryon acoustic oscillations. *Dark energy: observational and theoretical approaches*, Cambridge University Press Cambridge, v. 246, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.
- 20 BUCH, K. D. et al. Towards real-time impulsive rfi mitigation for radio telescopes. *Journal of Astronomical Instrumentation*, World Scientific, v. 5, n. 04, p. 1641018, 2016. Citado na página 54.
- 21 BUCH, K. D. Rfi excision in radiometers: A radio astronomy perspective. In: *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 4535–4538. Citado 3 vezes nas páginas 60, 61 e 62.
- 22 BATTYE, R. A. et al. Hi intensity mapping: a single dish approach. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 434, n. 2, p. 1239–1256, 07 2013. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stt1082>>. Citado na página 63.
- 23 BELLEVAL, C. *Robust Statistics Applied to Radio Astronomy: Radio Frequency Interference Mitigation and Automated Spectral Line Detection for Broadband Surveys*. Tese (Doutorado) — Observatoire de Paris, 2019. Citado na página 69.
- 24 ZHANG, J. et al. The bingo project-vi. h i halo occupation distribution and mock building. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 664, p. A19, 2022. Citado na página 75.
- 25 CHISARI, N. E. et al. Core cosmology library: Precision cosmological predictions for lsst. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 242, n. 1, p. 2, 2019. Citado na página 75.