



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m12e/2026/02.12.12.43-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DOS ATRASOS DE FASE
GEOMÉTRICO E INSTRUMENTAL DO
INTERFERÔMETRO RÁDIO BRAZILIAN
DECIMETRIC ARRAY**

Matheus de Carvalho Abelha

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Astrofísica, orientada pelos Drs.
Carlos Alexandre Wuensche de
Souza, Cesar Strauss, e José
Roberto Cecatto, aprovada em 18
de dezembro de 2025.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD2USNRW34T/4F6A8QH>>

INPE
São José dos Campos
2025

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dr. Thales Sehn Korting - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)

Dr. Heyder Hey - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m12e/2026/02.12.12.43-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DOS ATRASOS DE FASE
GEOMÉTRICO E INSTRUMENTAL DO
INTERFERÔMETRO RÁDIO BRAZILIAN
DECIMETRIC ARRAY**

Matheus de Carvalho Abelha

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Astrofísica, orientada pelos Drs.
Carlos Alexandre Wuensche de
Souza, Cesar Strauss, e José
Roberto Cecatto, aprovada em 18
de dezembro de 2025.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD2USNRW34T/4F6A8QH>>

INPE
São José dos Campos
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Abelha, Matheus de Carvalho.

Ab141c Caracterização dos atrasos de fase geométrico e instrumental do interferômetro rádio Brazilian Decimetric Array / Matheus de Carvalho Abelha. – São José dos Campos : INPE, 2025.
xviii + 79 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m12e/2026/02.12.12.43-TDI)

Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2025.

Orientadores : Drs. Carlos Alexandre Wuensche de Souza, Cesar Strauss, e José Roberto Cecatto.

1. Interferômetro Rádio. 2. Atrasos de fase. 3. Coerência de fase. 4. BDA. I.Título.

CDU 520.36



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): MATHEUS DE CARVALHO ABELHA

Título: “Caracterização dos atrasos de fase geométrico e instrumental do interferômetro rádio Brazilian Decimetric Array.”

Aprovado(a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título Mestre (a) em Astrofísica.

(assinado eletronicamente)

Dr. Odylio Denys de Aguiar – Presidente (DIAST/INPE & PGAST/INPE)

() Aprovado () Reprovado

(assinado eletronicamente)

Dra. Tânia Pereira Dominici - Membro Interno (DIAST/INPE)

() Aprovado () Reprovado

(assinado eletronicamente)

Dr. Felipe Ramos Hald Madsen - Membro Externo (NRAO, USA)

() Aprovado () Reprovado

(assinado eletronicamente)

Dr. Carlos Alexandre Wuensche de Souza - Orientador (DIAST/INPE & PGAST/INPE)

() Aprovado () Reprovado

(assinado eletronicamente)

Dr. Cesar Strauss - Orientador (DIAST/INPE)

() Aprovado () Reprovado

(assinado eletronicamente)

Dr. José Roberto Cecatto - Orientador (DIAST/INPE)

() Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

- () maioria simples
(X) unanimidade

São José dos Campos, 18 de dezembro de 2025



Documento assinado eletronicamente por **José Roberto Cecatto, Pesquisador**, em 22/12/2025, às 17:00 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tânia Pereira Dominici, Pesquisadora**, em 22/12/2025, às 17:03 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Odylio Denys de Aguiar, Pesquisador**, em 22/12/2025, às 17:37 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alexandre Wuensche de Souza, Pesquisador**, em 22/12/2025, às 21:01 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Ramos Hald Madsen (E), Usuário Externo**, em 24/12/2025, às 01:09 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cesar Strauss, Tecnologista**, em 26/12/2025, às 06:45 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **13368533** e o código CRC **97DB16CD**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família. Aos meus pais, por todo amor incondicional, sacrificial e esforço para me darem oportunidades que eles nunca tiveram. Ao meu irmão, pelo companheirismo e amizade, e incontáveis noites de jogos e risadas. À minha companheira de vida, pelos ensinamentos além do mundo das exatas, pelo amor e carinho, e por compartilhar comigo os risos e as lágrimas de quase 3 anos e muitos outros por vir.

Também, aos meus familiares e amigos, que para minha sorte são muitos, por sempre estarem presentes nos bons e maus momentos, por serem verdadeiros companheiros e por me acolherem em momentos de necessidade.

Aos Dr. Carlos Alexandre Wuensche, Dr. Cesar Strauss e Dr. José Roberto Cecatto, pela orientação, paciência e ensinamentos que ajudaram a moldar minha carreira acadêmica, e por me guiarem no desenvolvimento instrumental de parte de um instrumento importante para ciência brasileira. Também aos colegas e amigos da Divisão de Astrofísica do INPE, pelo auxílio, acolhimento e experiências trocadas nesse período de trabalho conjunto. Em especial à equipe do BDA: Jorge Silva, Khristhiano Souza, Pedro Azevedo e Telmo Machado, que foram sempre solícitos a sanarem minhas dúvidas e me ajudar sempre que precisei.

Sou também grato ao INPE pelo acolhimento, cooperação e oportunidade de estudar e trabalhar em uma das melhores instituições de pesquisa do país. À CAPES, pela confiança e financiamento com a bolsa de mestrado e fomento da pesquisa e capacitação acadêmica no país.

E, por fim, mas não menos importante, à FAPESP, ao CNPq, à FINEP, que são as agências financiadoras do projeto e que permitem que a ciência aconteça no Brasil.

RESUMO

A interferometria em rádio é uma técnica fundamental em astronomia, permitindo a observação de fontes celestes com alta resolução angular por meio da combinação/correlação dos sinais de múltiplas antenas em coerência de fase. O *Brazilian Decimetric Array* (BDA) é um interferômetro rádio brasileiro projetado para pesquisas solares e de outras fontes cósmicas em comprimentos de onda decimétricos (1,2 - 1,7 GHz). A precisão da correlação dos sinais das antenas e a geração das imagens interferométricas depende da calibração das componentes de atraso de fase de todo o conjunto de antenas em relação a uma referência de fase. O atraso de fase é constituído pelas componentes geométrica e instrumental. A primeira é devida à configuração das antenas do arranjo, posição da fonte rádio no céu e frequência de observação, e pode ser ajustada por software entre cada antena e uma referência. Já o percurso do sinal em cada elemento do arranjo, correspondente à componente instrumental, é composta por contribuições desde o alimentador nas antenas até a entrada do subsistema correlacionador, passando por cabos coaxiais, componentes da eletrônica dos receptores, conversor eletro-óptico, fibra óptica e conversor opto-elétrico. A componente instrumental é gerada ao longo de toda a cadeia do subsistema receptor de cada antena. Este estudo visa construir o software de ajuste da componente geométrica e caracterizar os atrasos instrumentais entre todos os pares de antenas do instrumento. São apresentados os resultados do *software* de ajuste da componente geométrica dos atrasos de fase dos sinais de duas linhas de base do arranjo para uma fonte de posições simuladas no céu. Além disso, são apresentados os métodos e resultados obtidos da caracterização da componente instrumental dos atrasos de fase dos sinais para algumas antenas do interferômetro. O atraso de fase instrumental entre fibras possui uma diferença fixa em unidades de nanossegundos, enquanto que ao longo do dia ocorrem variações em décimos de nanossegundos. Esses resultados destacam a necessidade de monitoramento contínuo dos atrasos instrumentais em interferômetros rádio, ao longo de uma sessão de observação.

Palavras-chave: Interferômetro Rádio. Atrasos de fase. Coerência de fase. BDA.

CHARACTERIZATION OF THE GEOMETRIC AND INSTRUMENTAL PHASE DELAYS OF THE BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY RADIO INTERFEROMETER

ABSTRACT

Radio interferometry is a fundamental technique in astronomy, enabling the observation of celestial sources with high angular resolution through the combination and correlation of signals from multiple antennas in phase coherence. The Brazilian Decimetric Array (BDA) is a Brazilian radio interferometer designed for solar and other cosmic sources research at decimetric wavelengths (1.2–1.7 GHz). The precision of signal correlation between antennas and the generation of interferometric images depend on the calibration of phase delay components across the entire antenna array with respect to a phase reference. The phase delay consists of geometric and instrumental components. The first one, adjusted via software for each antenna relative to a reference, arises from the array configuration, the position of the radio source in the sky, and the observing frequency. The instrumental component corresponds to the signal path within each array element—from the antenna feed to the input of the correlator subsystem—passing through coaxial cables, receiver electronics, electro-optical converters, optical fibers, and opto-electrical converters. This instrumental contribution is generated throughout the entire receiver subsystem chain of each antenna. This study aims to develop software for adjusting the geometric component and to characterize the instrumental delays between all antenna pairs of the interferometer. The results of the software used to adjust the geometric component of the phase delays for signals from two baselines of the array are presented for a source with simulated positions in the sky. In addition, we describe the methods and results obtained for the characterization of the instrumental phase-delay component for a subset of the interferometer antennas. The instrumental phase delay between fibers exhibits a fixed offset on the order of nanoseconds, while variations of tenths of nanoseconds occur throughout the day. These findings highlight the need for continuous monitoring of instrumental delays in radio interferometers during observation sessions.

Keywords: Phase delay. Radio interferometer. Phase coherence. BDA.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>	
2.1	Janelas atmosféricas de absorção do espectro eletromagnético.	7
2.2	Cadeia eletrônica típica de aquisição de sinais em radioastronomia. . . .	10
2.3	Diagrama representativo de um receptor super-heteródino	15
2.4	Imagem ilustrativa da síntese de abertura com três telescópios.	17
2.5	Imagem ilustrativa de um arranjo de três antenas.	20
2.6	Vista aérea do VLA.	22
2.7	Vista aérea do ALMA.	23
2.8	Esquemático do funcionamento de um interferômetro multiplicador. . . .	25
2.9	Esquemático da configuração do arranjo de antenas do BDA.	31
2.10	Vista de satélite da configuração do arranjo de antenas do BDA.	32
2.11	Vista a nível do solo <i>in situ</i> das linhas de base do BDA.	33
2.12	Imagem do FPGA utilizado no correlacionador do BDA.	35
2.13	Imagem do <i>hardware</i> do correlacionador do BDA, com a caixa aberta, em teste de bancada.	36
2.14	Esquemático simplificado do subsistema correlacionador de sinais do BDA.	37
2.15	Esquemático do <i>software</i> da célula de correlação.	38
2.16	O esquemático do <i>software</i> do circuito completo do correlacionador. . . .	39
3.1	Fluxograma de funcionamento do software de conversão das coordenadas.	42
3.2	Fluxograma de funcionamento do software de atraso geométrico.	43
3.3	Setup instrumental de operação para duas antenas.	44
3.4	Diagrama do teste de diferença entre fibras na mesma antena.	45
3.5	Diagrama do teste de diferença entre duas antenas.	46
3.6	Diagrama do teste de diferença entre fibras na mesma antena.	47
4.1	Deslocamento das antenas da linha Leste - Oeste em relação ao planejado de projeto.	50
4.2	Deslocamento das antenas da linha Norte - Sul em relação ao esperado de projeto.	51
4.3	Deslocamento em altura entre as antenas da linha Leste - Oeste, utili- zando a altura da antena 9 como referência.	52
4.4	Deslocamento em altura entre as antenas da linha Leste - Oeste, utili- zando a altura da antena 9 como referência e desconsiderando a antena 1.	53

4.5	Deslocamento em altura entre as antenas da linha Norte - Sul, utilizando a altura da antena 9 como referência.	54
4.6	Atraso de fase geométrico entre as antenas 1 e 17.	55
4.7	Posições de uma fonte no céu para atrasos geométricos nulos entre as antenas 1 e 17.	56
4.8	Atraso de fase geométrico entre as antenas 1 e 26.	57
4.9	Posições de uma fonte fictícia no céu para atrasos geométricos nulos entre as antenas 1 e 26.	58
4.10	Atraso de fase geométrico entre as antenas 12 e 13.	59
4.11	Atrasos geométricos entre as antenas 12, 13, 20 e 21 do arranjo.	60
4.12	Atrasos instrumentais na antena 12, na configuração normal e em <i>loop</i>	62
4.13	Atrasos instrumentais na antena 13, na configuração normal e em <i>loop</i>	63
4.14	Atrasos instrumentais na antena 20, na configuração normal e em <i>loop</i>	64
4.15	Atrasos instrumentais na antena 21, na configuração normal e em <i>loop</i>	65
4.16	Atrasos instrumentais entre as antenas 12 e 13, na configuração normal e em <i>loop</i>	66
4.17	Atrasos instrumentais entre as antenas 20 e 21, na configuração normal e em <i>loop</i>	67
4.18	Atraso instrumental entre as antenas 20 e 12, ambas na configuração de <i>loop</i>	68
4.19	Atraso instrumental entre as antenas 21 e 13, ambas na configuração de <i>loop</i>	68

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Operador Ex-OR para as componentes C_1 e C_2	29
2.2 Operador Ex-OR para as componentes S_1 e S_2	30
2.3 Operador Ex-OR para as componentes C_1 e S_2	30
2.4 Operador Ex-NOR para as componentes S_1 e C_2	30
2.5 Características gerais do BDA.	34
2.6 Características relevantes da placa FPGA Altera Stratix III.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	–	Analog to Digital Converter
ALMA	–	Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
ANATEL	–	Agência Nacional de Telecomunicações
ASIC	–	Application Specific Integrated Circuit
BDA	–	Brazilian Decimetric Array
CASA	–	Common Astronomy Software Application
CME	–	Coronal Mass Ejection
ECEF	–	Earth Centred Earth Fixed
ENU	–	Earth North Up
EUV	–	Extreme Ultraviolet
FI	–	Frequência Intermediária
FPGA	–	Field-Programmable Gate Array
GBO	–	Green Bank Observatory
GIC	–	Geomagnetic Induced Currents
GNSS	–	Global Navigation Satellite System
GPS	–	Global Positioning System
GPU	–	Graphing Processing Unit
HEMT	–	High electron mobility transistor
HPBW	–	Half-Power Beam Width
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JWST	–	James Web Space Telescope
LNA	–	Low Noise Amplifier
LO	–	Local Oscillator
LOFAR	–	Low Frequency Array
LWA	–	Long Wavelength Array
MMIC	–	Monolithic microwave integrated circuit
NRAO	–	National Radio Astronomy Observatory
RF	–	Rádio Frequência
RFI	–	Radio Frequency Interference
SEP	–	Solar Energetic Particle
SOHO	–	Solar and Heliospheric Observatory
STEREO	–	Solar Terrestrial Relations Observatory
VLA	–	Very Large Array
VLBI	–	Very Long Baseline Interferometry

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos gerais	3
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Organização do trabalho	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Radioastronomia	5
2.2 Fundamentos da radioastronomia	5
2.3 Radiotelescópios	10
2.3.1 Alimentador	10
2.3.2 Amplificador de Baixo Ruído (LNA)	11
2.3.3 Filtros e rejeição de interferência	11
2.3.4 Conversão de frequência	11
2.3.5 Amplificação de FI e controle de ganho	11
2.3.6 Conversão Analógico-Digital (ADC)	12
2.3.7 Correlacionador	12
2.3.8 Referências de tempo e sincronização	12
2.3.9 Controle e monitoramento	12
2.3.9.1 Receptores de Rádio Frequências	13
2.4 Interferometria em Rádio Frequência	18
2.4.1 Frequências espaciais	18
2.4.2 Interferômetros	20
2.5 Atrasos de fase	23
2.5.1 Atraso geométrico	24
2.5.2 Atraso instrumental	26
2.6 Correlacionador de sinais	28
2.7 <i>Brazilian Decimetric Array</i>	30
2.8 Correlacionador de sinais do BDA	34
3 METODOLOGIA	41
3.1 Ajuste do atraso geométrico	41
3.2 Ajuste do atraso instrumental	43
3.2.1 Montagens para aquisição	44

3.2.2	Software para cálculo da amplitude e fase	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	Disposição do arranjo	49
4.2	Atraso geométrico	54
4.3	Atraso instrumental	61
5	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	APÊNDICE A - CÓDIGOS DESENVOLVIDOS PARA CÁLCULO	
	DOS ATRASOS DE FASE	77
A.1	Cálculo do atraso geométrico	77
A.2	Cálculo do atraso instrumental	78

1 INTRODUÇÃO

A Radioastronomia é uma subárea da Astronomia que estuda os objetos celestes por meio do registro e da análise das ondas eletromagnéticas na faixa de rádio. Com essa abordagem, os cientistas conseguem observar detalhes e estimar parâmetros físicos, como a distribuição de hidrogênio neutro no Universo, a distribuição e energia de partículas aceleradas de diversos fenômenos energéticos e até mesmo buracos negros, que não seriam possíveis de se detectar diretamente com observações em outros comprimentos de onda.

Como existem processos físicos que emitem radiação eletromagnética exclusivamente na banda de rádio, o estudo dos fenômenos nessa faixa do espectro eletromagnético permite à ciência um melhor entendimento não apenas do funcionamento do Universo, sua formação e evolução, mas também da origem do próprio Sistema Solar e da vida na Terra. Também permite observações da atividade solar, como flares e ejeções de massa coronal, que contribuem no estudo de questões da física relacionadas a esses fenômenos, como armazenamento, liberação e transporte de energia (BENZ, 2017), e que também podem afetar satélites e astronautas em órbita, além da atividade humana em solo terrestre (OLIVEIRA; ZESTA, 2019). Não sendo exclusiva para explorar apenas objetos celestes apenas fora do Sistema Solar, a Radioastronomia é também útil em estudos de fenômenos terrestres, como a rotação do planeta, abalos sísmicos, entre outros (SCHUH; BEHREND, 2012).

Para viabilizar esses estudos, são utilizadas antenas chamadas radiotelescópios, que captam sinais no comprimento de onda de rádio. De modo geral, para uma dada frequência de operação, a resolução angular — ou seja, o detalhamento da imagem gerada por esses equipamentos — está diretamente relacionada ao comprimento de onda da radiação observada e inversamente ao diâmetro do paraboloide (THOMPSON et al., 2017). Assim, seriam necessárias antenas de dimensões impraticáveis para se obter resoluções comparáveis às de telescópios ópticos, ou para observar fontes de sinais fracos. Para contornar esse problema, os radioastrônomos utilizam o princípio da síntese de abertura. Isso permite que a área de uma antena de grandes dimensões seja amostrada, e conseqüentemente sintetizada, por um conjunto de antenas menores, utilizando a técnica de interferometria. Dessa forma, duas ou mais antenas, operadas simultaneamente em pares e com sincronismo, podem realizar observações de fontes rádio cujos sinais depois são combinados em coerência de fase, o que permite a obtenção de imagens dessas fontes com melhor resolução e sensibilidade.

Para que seja possível gerar imagens da fonte observada, utilizando-se os sinais das antenas de um interferômetro, é necessário que haja coerência de fase dos sinais de todas as antenas na entrada do correlacionador, já que para qualquer interferômetro instalado em solo, observando uma determinada fonte no céu, existe incoerência de fase intrínseca dos sinais entre as antenas devido à geometria do arranjo interferométrico. A fase dos sinais de cada antena possui duas componentes de atraso: a geométrica e a instrumental.

A primeira ocorre devido à posição da fonte observada no céu e das distâncias e posicionamentos entre as antenas de cada par de elementos que se está analisando, devendo ser caracterizada por *software*. Já a componente instrumental ocorre devido à diferença de caminho em que o sinal se propaga entre cada antena e a sala de controle, desde o foco - passando por todos os estágios do sistema receptor - até a entrada do correlacionador de sinais (TAYLOR et al., 1999). Esta componente deve ser determinada por meio da observação de fontes calibradoras adequadas - pontuais em relação ao feixe do instrumento e intensas o suficiente para que sejam detectadas pelo sistema receptor. Essas diferenças de fase, de origem instrumental e geométrica, devem ser determinadas e ajustadas para todos os elementos do arranjo e levadas em conta no momento de correlacionar os sinais de todas as antenas.

Além das componentes de atraso geométrica e instrumental, em interferômetros rádio existem outras que também podem alterar a fase do sinal de uma fonte rádio observada. Tanto a componente atmosférica quanto aquela devido a sinais de Interferência em Rádio Frequências (RFI) são capazes de causar variações na fase do sinal proveniente de uma fonte rádio observada no céu. São componentes que devem ser consideradas no ajuste de fase dos sinais de um interferômetro. A componente atmosférica, por exemplo, deve ser tratada por meio da observação regular de fontes calibradoras durante a seção de observação da fonte rádio de interesse. Normalmente, é mais importante para interferômetros de longas linhas de base - centenas a milhares de quilômetros - ou para intervalos nos quais as condições atmosféricas variam em uma escala temporal comparável àquela de duração da seção de observação.

No Brasil, a técnica de síntese de abertura é empregada no projeto *Brazilian Decimetric Array* (BDA), um interferômetro rádio composto por 26 antenas parabólicas de 4 metros de diâmetro cada, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com o apoio de outras instituições nacionais e internacionais. Localizado no campus do INPE em Cachoeira Paulista, no estado de São Paulo, o BDA tem como principal objetivo realizar observações de fenômenos solares energéticos

transientes, além de investigar fenômenos galáticos e extragaláticos, em frequências de 1,2 a 1,7 GHz (SAWANT et al., 2000).

O presente trabalho tem como foco o desenvolvimento instrumental do BDA. Cada linha de base possui um atraso instrumental e geométrico específico, e com isso devem ser individualmente caracterizados para que possa haver correções de fase no subsistema do correlacionador. Este trabalho tem como um dos seus objetivos a determinação/caracterização desses atrasos para configuração atual do instrumento.

1.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho é a determinação/caracterização dos atrasos de fase geométrico e instrumental do interferômetro rádio *Brazilian Decimetric Array* (BDA).

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os atrasos geométricos;
- Desenvolver um software para cálculo dos atrasos geométricos;
- Criar a sistemática do mapeamento de uma parte dos atrasos instrumentais de pares de antenas, baseado em medições dos sinais em suas respectivas fibras ópticas;
- Caracterizar os atrasos instrumentais.

1.3 Organização do trabalho

Esta dissertação está estruturada em Introdução, Fundamentação Teórica, Metodologia, Resultados e Conclusão.

A Introdução apresenta brevemente o que é Radioastronomia, mais especificamente na área de interferometria, as motivações e justificativas para se estudar essa ciência atualmente, e uma de suas aplicações no Brasil, mais especificamente no instrumento BDA para o estudo da heliofísica.

Na Fundamentação Teórica, é feita uma breve revisão de alguns tópicos relevantes ao projeto e apresentados diversos conceitos utilizados ao longo do trabalho, dentre eles: uma breve história de como surgiu a Radioastronomia; o princípio e fundamento básico de utilização da radiação eletromagnética em rádio para essas observações; o

princípio de funcionamento de um radiotelescópio, assim como de um interferômetro rádio; fundamentos de operação de um correlacionador e a importância de se ter caracterizado os atrasos de fase de um instrumento interferométrico.

Na Metodologia, são apresentados procedimentos, testes e atividades realizadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa, como revisão de diversas referências bibliográficas, manuais de referência e funcionamento dos dispositivos eletrônicos presentes no projeto. Também, a caracterização do subsistema correlacionador de sinais e, conseqüentemente, a metodologia de determinação dos atrasos de fase para o BDA.

No capítulo de Resultados, são apresentados os resultados obtidos até a defesa desta dissertação, principalmente relativo a caracterização das coordenadas da antena, alteração do sistema de coordenadas e resultados tanto do software de correção dos atrasos geométricos quanto do mapeamento de uma parte dos atrasos instrumentais, somente a contribuição da fibra óptica, entre os elementos do arranjo.

Já na Conclusão são sumarizados os resultados obtidos sobre as componentes de atraso geométrico e instrumental. Além disso, é apresentado o que pode ser concluído em termos da aplicabilidade prática desses resultados para a operação e funcionamento do interferômetro BDA, assim como trabalhos futuros a serem realizados no desenvolvimento do instrumento. Por fim, discute-se o impacto disso para o uso científico do BDA.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Radioastronomia

A Radioastronomia teve sua origem por volta de 1931 com Karl G. Jansky, enquanto trabalhava como engenheiro de rádio na companhia *Bell Telephone Laboratories* em Holmdel, Nova Jersey, e foi designado para estudar frequências de interferência em rádio provenientes de tempestades. Esse trabalho tinha o objetivo de auxiliar a desenvolver uma antena que fosse capaz de minimizar a estática, termo utilizado por engenheiros para se referir aos ruídos gerados por radiofrequências não moduladas, enquanto transmitia/captava sinais de radiotelefonia pelo oceano. (MILLER, 1998). Com o experimento, ele foi capaz de identificar a estática decorrente das tempestades, mas foi incapaz de identificar a procedência das outras fontes de ruído. Inicialmente, Jansky imaginou que a origem desse ruído seria o Sol, mas essa estática era observada quatro minutos mais cedo a cada dia que se passava, o que poderia ser explicado pela diferença entre “dias solares” e “dias siderais”, que ocasionam uma diferença de aproximadamente quatro minutos na duração do dia. Por fim, ele conseguiu determinar que a origem do sinal detectado era do centro galáctico.

Em 1937, Grote Reber deu continuidade às descobertas de Jansky, construindo um protótipo do rádio telescópio moderno no seu quintal. Após pouco sucesso na tentativa de observar radiação em comprimentos de onda menores, pois acreditava que seriam mais fortes e fáceis de detectar, Reber modificou a antena para observar radiações no comprimento de onda de 1,87 metros, e então captou fortes emissões ao longo do plano da Via Láctea. Ele também foi o primeiro a detectar emissão rádio proveniente do Sol. Em 1944 ele publicou os primeiros mapas estelares em rádio frequências e, até o final da Segunda Guerra Mundial, foi o único radioastrônomo no mundo (MILLER, 1998). Desde então, essa ciência passou por diversos aprimoramentos e novas descobertas, salientem-se as seguintes entre outras: a proposição do uso da síntese de abertura, a descoberta da radiação cósmica de fundo e a descoberta do pulsar.

2.2 Fundamentos da radioastronomia

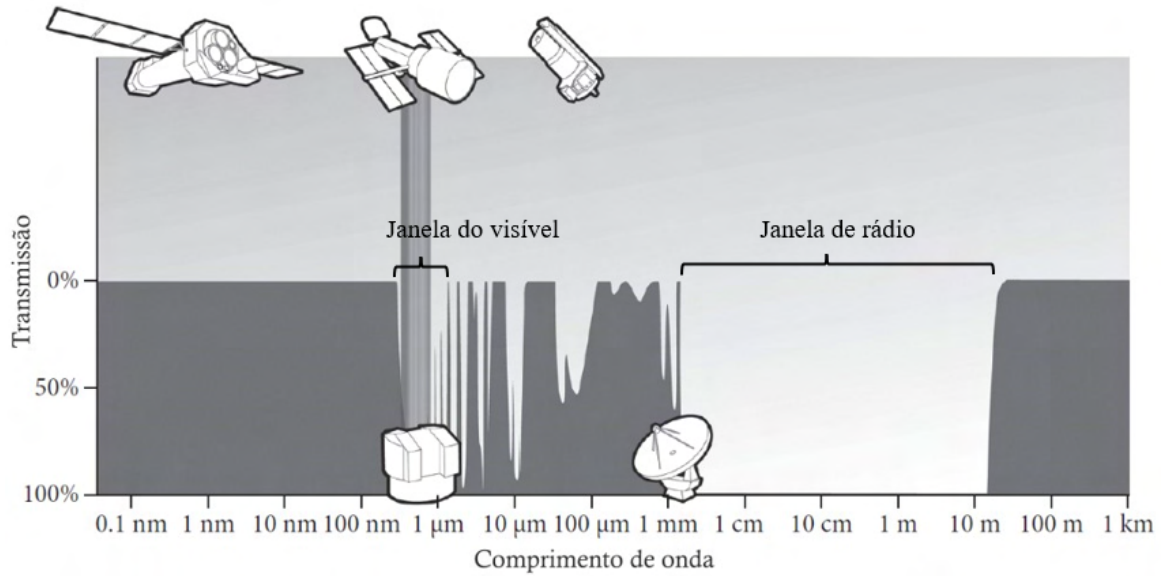
A Astronomia consiste da observação e estudo de objetos celestes, e os fenômenos físicos associados a estes. A astronomia óptica está historicamente interessada em observar fenômenos e objetos que emitem, refletem ou absorvem comprimentos de onda na faixa do espectro eletromagnético visível ao olho humano, pois esse é o primeiro e mais simples instrumento astronômico utilizado para observações desses

fenômenos.

Até o surgimento da radioastronomia, tinham-se somente observações de fenômenos celestes em comprimentos de onda do visível. Posteriormente, com o desenvolvimento de instrumentos em outras bandas espectrais, como raios-X, raios gama, ultravioleta e infravermelho foi possível se identificar novos processos físicos e fenômenos que não eram antes observados, permitindo novas possibilidades/linhas de pesquisa. Por exemplo, telescópios espaciais mais conhecidos, como o Hubble e o *James Web's Space Telescope*, são capazes de realizar observações em faixas do espectro eletromagnético maiores e menores que a luz visível, além das capacidades naturais do olho humano, ampliando o conhecimento humano acerca do Universo. No entanto, instrumentos espaciais são caros e de difícil manutenção, ainda mais por se encontrarem em um ambiente hostil e sem a proteção atmosférica terrestre.

Então, para cada banda do espectro eletromagnético são construídos e instalados instrumentos específicos, que dependem do tipo de fenômeno que se deseja observar, dos custos consequentes das características físicas e estruturais desses instrumentos e das janelas de transparência atmosféricas. Estas determinam quais comprimentos de onda não são totalmente absorvidos pela atmosfera terrestre e conseguem ser observados, sendo essencialmente frequências pertencentes ao espectro da luz visível e de rádio, como pode ser visto na Figura 2.1. Para realizar a detecção direta das radiações em outros comprimentos de onda, é necessário construir instrumentos capazes de operar em ambiente espacial.

Figura 2.1 - Janelas atmosféricas de absorção do espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Condon e Ransom (2016).

Em radioastronomia, a escolha do tipo de antena receptora está diretamente relacionada à faixa de frequência de operação, à sensibilidade requerida e ao tipo de observação científica pretendida. Em geral, as antenas utilizadas em telescópios de rádio podem ser classificadas em dois grupos principais: refletores parabólicos (ou “pratos”) e arranjos de elementos simples (como dipolos ou cornetas) (TAYLOR et al., 1999; CHENGALUR et al., 2009).

Os refletores parabólicos são amplamente empregados em observações na faixa de micro-ondas e ondas decimétricas, devido ao seu alto ganho, diretividade e capacidade de formar feixes estreitos. Essa configuração consiste em uma superfície refletora de geometria parabólica que concentra as ondas incidentes em um ponto focal, onde se posiciona o alimentador (*feed*), que pode ser uma corneta, dipolo ou sistema Cassegrain/Gregorian. A eficiência da antena depende da precisão da superfície refletora, da geometria do sistema de alimentação e das perdas por obstrução e *spillover* - a radiação do solo, além dos limites do refletor da antena, captada pelo alimentador em seu foco e medida pelo respectivo receptor de rádio, caracterizada como um ruído indesejável no sinal gerando redução de sensibilidade nas observações (THOMPSON et al., 2017). Em interferômetros, o uso de múltiplas antenas permite combinar coerentemente os sinais de cada elemento, aumentando a sensibilidade e resolução angular sem necessidade de grandes estruturas físicas individuais (WILSON et al., 2013).

Para frequências mais baixas, na faixa de dezenas a centenas de mega-hertz, as antenas do tipo dipolo tornam-se mais adequadas e apresentam um custo significativamente menor. Essas antenas possuem resposta de feixe mais ampla e menor ganho individual, mas permitem a formação de feixes sintéticos digitalmente através da combinação de múltiplos elementos (ELLINGSON, 2011). Tais configurações são utilizadas em instrumentos como o LOFAR (*Low Frequency Array*) e o LWA (*Long Wavelength Array*), onde o grande número de elementos proporciona sensibilidade suficiente para o estudo da emissão solar, das explosões em rádio e do meio interplanetário (BURKE; GRAHAM-SMITH, 2019).

Além dos refletores parabólicos e dipolos, sistemas híbridos, como cornetas refletoras (*horn-reflector*) e painéis planares, são empregados em faixas específicas da banda de rádio, oferecendo bom controle do feixe e baixo ruído de sistema (KRAUS et al., 1966). A integração entre a antena e o sistema receptor também é um fator determinante, uma vez que as perdas no caminho do sinal e o acoplamento de impedância afetam diretamente a temperatura de ruído total do sistema (WILSON et al., 2013).

O ganho (G) de uma antena é definido como a razão entre a potência irradiada (ou recebida) em uma direção específica e a potência que seria irradiada por uma antena isotrópica sob as mesmas condições de entrada. Em radioastronomia, antenas com alto ganho são preferíveis, pois concentram a recepção de energia proveniente de uma pequena região do céu, reduzindo a contribuição de ruído de fundo. Para uma antena parabólica, o ganho pode ser expresso como:

$$G = \eta_A \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right), \quad (2.1)$$

onde A é a área geométrica da antena, λ o comprimento de onda e η_A a eficiência de abertura (KRAUS et al., 1966; WILSON et al., 2013).

A largura de feixe a meia potência (HPBW, do inglês *Half-Power Beam Width*) determina a resolução angular da antena, ou seja, o tamanho da região do céu observada. Em refletores parabólicos, a largura de feixe pode ser aproximada por:

$$\theta_{\text{HPBW}} \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}, \quad (2.2)$$

em que D é o diâmetro do refletor. Assim, quanto maior o diâmetro físico da antena, menor será a largura de feixe e, portanto, maior a resolução angular obtida

(THOMPSON et al., 2017).

A eficiência de abertura η_A , é a fração da área geométrica da antena que contribui efetivamente para a coleta de sinal (KRAUS et al., 1966; WILSON et al., 2013). Essa eficiência é reduzida por fatores como perdas por difração, imperfeições de superfície, obstrução do alimentador e desajuste de impedância. Valores típicos para antenas parabólicas bem projetadas variam entre 0,5 e 0,8 (WILSON et al., 2013; BURKE; GRAHAM-SMITH, 2019).

Outro parâmetro crítico é a temperatura de ruído da antena (T_A), que expressa a potência equivalente de ruído associada à radiação recebida pelo sistema. Essa temperatura inclui contribuições do céu (T_{sky}), do solo, da atmosfera e de fontes artificiais *Radio Frequency Interference* (RFI) - interferência em frequências de rádio. O ruído do sistema total (T_{sys}) é então dado por:

$$T_{\text{sys}} = T_A + T_{\text{rx}}, \quad (2.3)$$

onde T_{rx} é a temperatura de ruído introduzida pelos estágios eletrônicos do receptor. O controle e a calibração dessa temperatura são essenciais para garantir medições precisas de intensidade de fluxo em radioastronomia (WILSON et al., 2013).

Por fim, destaca-se que todos esses parâmetros estão inter-relacionados: aumentar o ganho frequentemente implica reduzir a largura de feixe, enquanto ampliar a área (diâmetro) e a eficiência de abertura, bem como reduzir o ruído de sistema determinam o aumento da sensibilidade efetiva do instrumento. Esses compromissos de projeto são centrais no desenvolvimento de radiotelescópios solares e interferômetros como o BDA, nos quais estabilidade térmica, precisão de apontamento e controle de ruído são determinantes para o sucesso das observações.

Geralmente, radiotelescópios operando em micro-ondas e frequências mais altas são compostos de refletores parabólicos, que redirecionam a onda eletromagnética proveniente da fonte observada para um alimentador no foco da antena, mantendo a coerência de fase da onda incidente. A partir desse ponto, a energia dessa onda é convertida em um sinal elétrico que se propaga por toda a cadeia do sistema receptor, incluindo amplificação, conversão de frequência, detecção e outros processamentos de sinais. Em virtude da grande maioria das fontes de rádio apresentar emissão fraca, os radiotelescópios necessitam de áreas coletoras maiores para serem sensíveis o suficiente e detectar essas fontes (CHRISTIANSEN; HÖGBOM, 1987).

Outro detalhe importante é a resolução do telescópio que, de maneira simplificada, pode ser entendida como a capacidade de se distinguir dois objetos aparentemente muito próximos, e um conseqüente nível de detalhamento maior.

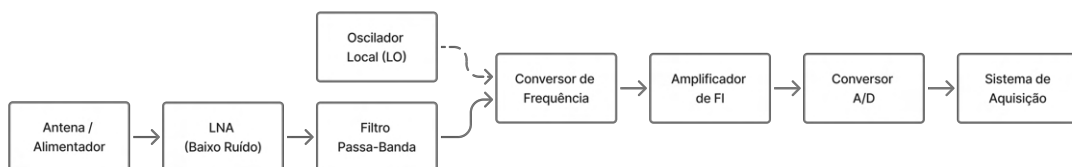
De maneira resumida, um receptor em rádio possui a seguinte cadeia de componentes e operações, na ordem de incidência da onda no alimentador até a gravação do sinal: amplificador de Rádio Frequência (RF), misturador (*mixer*) e oscilador local (LO), amplificador de Frequência Intermediária (FI), detector de lei quadrática, amplificador passa-baixa, integrador e gravador (KRAUS et al., 1966). Mais detalhes são apresentados a seguir.

2.3 Radiotelescópios

A antena é apenas o primeiro elo de uma complexa cadeia de aquisição de sinais em radioastronomia, cuja função é converter a radiação eletromagnética incidente em um sinal elétrico mensurável e processável. Como a tensão induzida equivalente à potência de emissão recebida de fontes astronômicas é extremamente baixa, da ordem de microvolts ou menos, torna-se necessário amplificar, filtrar, converter e digitalizar o sinal preservando ao máximo sua coerência de fase e sua relação sinal-ruído (WILSON et al., 2013; THOMPSON et al., 2017).

A Figura 2.2 apresenta um diagrama funcional simplificado dos principais blocos dessa cadeia eletrônica.

Figura 2.2 - Cadeia eletrônica típica de aquisição de sinais em radioastronomia.



2.3.1 Alimentador

O alimentador (*feed*) é responsável por acoplar a energia coletada pela antena (refletor parabólico, dipolo ou corneta) ao guia de ondas ou linha de transmissão do

sistema eletrônico. Ele define a polarização recebida e deve apresentar impedância casada à da antena, minimizando perdas por reflexão (KRAUS et al., 1966; THOMPSON et al., 2017).

2.3.2 Amplificador de Baixo Ruído (LNA)

O LNA (*Low Noise Amplifier*) é o estágio mais crítico em termos de sensibilidade do sistema. Usualmente, ele amplifica o sinal de entrada em até 40 dB, introduzindo o mínimo ruído térmico possível. O ruído adicionado nesse ponto define o limite inferior de sensibilidade do radiotelescópio. LNAs modernos empregam transistores *High electron mobility transistor* (HEMT) ou *Monolithic microwave integrated circuit* (MMIC) e frequentemente são criogenicamente resfriados para atingir temperaturas de ruído de poucos kelvins quando observando fontes rádio fracas (WILSON et al., 2013; BURKE; GRAHAM-SMITH, 2019). No caso do BDA, são usados LNAs de cerca de 37 dB de ganho e temperatura de ruído da ordem de 140 K.

2.3.3 Filtros e rejeição de interferência

Após a amplificação inicial, o sinal passa por filtros passa-banda que delimitam a faixa útil e rejeitam interferências RFI. Esses filtros, de cavidade ou micro-ondas, evitam a saturação dos amplificadores e preservam a linearidade do sistema (THOMPSON et al., 2017).

2.3.4 Conversão de frequência

A etapa de conversão translada o espectro do sinal de RF para uma FI, mais adequada para transmissão e amostragem. Essa operação é realizada por um *mixer* alimentado por um oscilador local de alta estabilidade. Em sistemas interferométricos, todos os LOs devem ser sincronizados em fase a uma referência de tempo comum, geralmente proveniente de um maser de hidrogênio, relógio de rubídio ou um oscilador disciplinado por GPS (THOMPSON et al., 2017; WILSON et al., 2013).

2.3.5 Amplificação de FI e controle de ganho

O sinal convertido é novamente amplificado para compensar perdas em cabos e ajustar o ganho total do sistema. Essa etapa garante que a potência de entrada no conversor A/D esteja dentro da faixa dinâmica ideal. Em sistemas com arranjos de antenas, como o BDA, essa compensação é essencial devido às longas distâncias entre antenas e o correlacionador, na ordem de dezenas a centenas de metros.

2.3.6 Conversão Analógico-Digital (ADC)

O sinal analógico é amostrado por um conversor A/D de taxa e resolução definidas pelos requisitos do instrumento. A precisão da digitalização determina o ruído de quantização e a coerência temporal. Em sistemas interferométricos, a sincronização dos ADCs é crítica para manter a fase relativa entre antenas (BURKE; GRAHAM-SMITH, 2019).

2.3.7 Correlacionador

O correlacionador é responsável pelo sinal de saída digitalizado de um receptor. Nos interferômetros, os sinais de todas as antenas são correlacionados para obter as visibilidades espaciais, base para a síntese de imagem. Tomando-se a Figura 2.2 como referência, o correlacionador se posicionaria como último estágio, em seguida ao sistema de aquisição de dados. Em radiômetros de feixe único, o subsistema atua como um espectrômetro digital, produzindo distribuições de potência em função da frequência. Implementações modernas utilizam *Field-Programmable Gate Array* (FPGA), que são circuitos eletrônicos adaptáveis e programáveis em linguagens de programação como Verilog e VHDL, e *Graphics Processing Unit* (GPU), permitindo correlações em tempo real (THOMPSON et al., 2017; KAPINCHEV et al., 2015). No caso do BDA, é utilizado um FPGA Stratix III da Altera, que é apresentado mais em detalhes na seção 2.8.

2.3.8 Referências de tempo e sincronização

Toda a cadeia eletrônica deve operar sob um sistema de tempo e frequência comum. A estabilidade de fase é garantida pelo oscilador local, que distribuí sinais de 10 MHz e pulsos de 1 PPS para todas as antenas (WILSON et al., 2013). Essa sincronização é fundamental para observações interferométricas coerentes. No caso do BDA, o padrão tempo-frequência utilizado é o de Rb Sync Server S650, da Microchip Technology, com precisão em frequência de 10^{-12} e sinal de referência padrão em 10 MHz.

2.3.9 Controle e monitoramento

Os módulos eletrônicos da cadeia são supervisionados por sistemas embarcados que monitoram temperatura, tensão e corrente, permitindo controle remoto e calibração automatizada. Essa infraestrutura garante estabilidade e confiabilidade operacional, especialmente em observações contínuas.

O desempenho de um sistema receptor depende do equilíbrio entre ganho total, ruído, faixa dinâmica e estabilidade temporal. O LNA, o oscilador, a área efetiva de cada antena, largura de banda, tempo de integração e o número de antenas são os principais elementos para a sensibilidade final. Em interferômetros como o BDA, a uniformidade entre canais e a coerência de fase no correlacionador determinam diretamente a qualidade das imagens obtidas. O projeto eletrônico deve, portanto, integrar os requisitos eletromagnéticos, térmicos e de sincronização de tempo, garantindo medições precisas e reproduzíveis de sinais astronômicos fracos.

2.3.9.1 Receptores de Rádio Frequências

Os receptores de rádio são dispositivos fundamentais na detecção e processamento de sinais eletromagnéticos provenientes de diferentes fontes, convertendo-os em formas úteis de informação, como áudio, imagem ou dados científicos. De modo geral, sua função básica consiste em captar um sinal de RF, amplificá-lo, selecionar a frequência desejada e, por fim, demodular o sinal, extraindo as informações contidas na modulação. A evolução histórica dos receptores levou ao desenvolvimento de diversas arquiteturas, que diferem essencialmente na forma como realizam a detecção e o processamento do sinal (HAYKIN; MOHER, 2011).

O receptor mais simples é o de detecção direta, também conhecido como receptor de cristal. Nesse tipo, o sinal de RF captado pela antena é retificado por um diodo e enviado diretamente a um transdutor, geralmente um fone de ouvido. Esse sistema não possui amplificação ativa, dependendo apenas da energia do próprio sinal recebido. Embora tenha sido amplamente utilizado nas primeiras experiências com radiocomunicação, sua sensibilidade e seletividade são extremamente limitadas, o que o torna inadequado para aplicações modernas (HAYKIN; MOHER, 2011).

Com o objetivo de aumentar a sensibilidade, surgiu o receptor regenerativo, desenvolvido por Edwin Armstrong em 1914. Esse tipo de receptor utiliza realimentação positiva para amplificar o sinal de RF, de modo que uma fração do sinal amplificado é reenviada à entrada do circuito, reforçando a amplitude total. Quando corretamente ajustado, o ganho se aproxima do ponto de oscilação, proporcionando alta seletividade e sensibilidade. No entanto, esse tipo de circuito é suscetível à instabilidade e tende a oscilar com facilidade, exigindo ajustes finos constantes (MAAS, 2013).

Posteriormente, o receptor de conversão direta (ou homódino) introduziu uma abordagem diferente, na qual o sinal de RF é misturado diretamente com o sinal de

um oscilador local de mesma frequência, de modo que o produto da mistura resulta em um sinal de base (ou baseband), que contém apenas a informação modulada. Essa arquitetura elimina a necessidade de uma etapa intermediária de frequência, reduzindo a complexidade do circuito. Apesar disso, apresenta dificuldades de isolamento entre o oscilador local e o sinal recebido, o que pode gerar interferências e instabilidades indesejáveis (KRAUS et al., 1966).

O grande avanço na tecnologia de recepção ocorreu com o desenvolvimento do receptor super-heteródino, também proposto por Edwin H. Armstrong em 1918. Esse tipo de receptor tornou-se o padrão dominante em radiocomunicações e radioastronomia por combinar alta sensibilidade, seletividade e estabilidade de frequência (MAAS, 2013; HAYKIN; MOHER, 2011). O princípio de funcionamento do super-heteródino baseia-se na conversão do sinal de RF para uma frequência intermediária. Para isso, o sinal de entrada é misturado com o sinal de um oscilador local, produzindo componentes em frequências correspondentes à soma e à diferença entre f_{RF} e f_{LO} . Seleciona-se então a diferença, $f_{FI} = |f_{RF} - f_{LO}|$, que é filtrada e amplificada antes da demodulação. Essa etapa de conversão permite que todo o processamento subsequente ocorra em uma frequência fixa, o que facilita o projeto de filtros e amplificadores altamente seletivos.

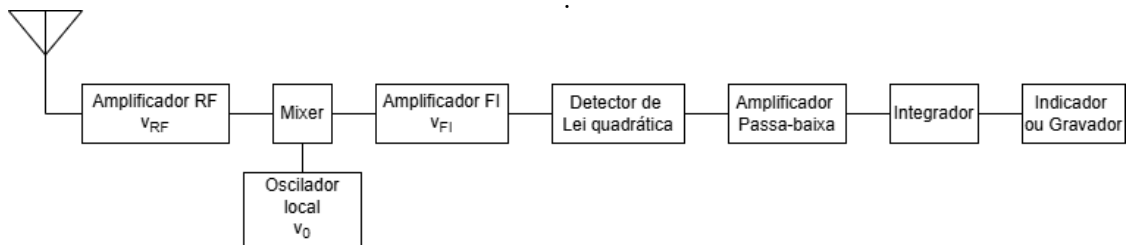
A estrutura típica de um receptor super-heteródino compreende as seguintes etapas: uma antena que capta o sinal; um amplificador de RF que aumenta sua intensidade; um misturador que realiza a conversão de frequência de RF para uma frequência de FI - tipicamente de dezenas a centenas de MHz, a partir do sinal de um oscilador de referência e um misturador; um filtro de FI que isola a banda de interesse; um amplificador de FI que eleva o nível do sinal; um detector que realiza a demodulação; e, finalmente, um amplificador que entrega o sinal ao estágio final (HAYKIN; MOHER, 2011). Essa arquitetura proporciona comparativamente uma baixa perda de sinal ao longo da cadeia receptora, bem como apresenta excelente desempenho em termos de seletividade e sensibilidade, além de estabilidade frente a variações de temperatura ou frequência, sendo ideal para recepção de sinais fracos em meio a ruído.

Na radioastronomia, o receptor super-heteródino é amplamente utilizado em radiotelescópios, especialmente em sistemas interferométricos, nos quais é essencial preservar a fase e a amplitude dos sinais provenientes de diferentes antenas para permitir a correlação coerente. Os sinais de rádio recebidos, frequentemente em faixas de GHz, são convertidos para uma frequência intermediária mais baixa (tipi-

camente dezenas ou centenas de MHz) antes da digitalização e do processamento. Essa etapa é crucial para reduzir a complexidade eletrônica, manter a estabilidade de fase entre os canais de recepção e garantir a baixa perda do sinal dentro do receptor (THOMPSON et al., 2017; KRAUS et al., 1966). No caso do interferômetro (BDA), por exemplo, os sinais observados entre 1,2 e 1,7 GHz são convertidos para uma frequência intermediária em torno de 70 MHz, o que facilita sua correlação e análise posterior.

Na Figura 2.3 é possível ver um diagrama representativo de um receptor super-heteródino.

Figura 2.3 - Diagrama representativo de um receptor super-heteródino



Fonte: Adaptado de Kraus et al. (1966).

Como apresentado na Equação 2.2, a resolução angular de um telescópio é representada pela largura de feixe a meia potência, ou seja, diretamente proporcional à razão entre o comprimento de onda observado e o diâmetro da abertura. Na faixa de rádio e micro-ondas do espectro eletromagnético tem-se comprimentos de onda consideravelmente grandes em relação ao restante do espectro eletromagnético, da ordem de milímetros até quilômetros e, com isso, seriam necessários diâmetros de dimensões impraticáveis para se obter resolução comparável a resolução no óptico. Para se ter uma ideia, imagine-se um telescópio óptico de um metro de diâmetro operando em 500 nanômetros, utilizando a Equação 2.2 obtém-se uma resolução espacial de aproximadamente 0,1 segundos de arco. Para uma resolução idêntica em rádio, um radiotelescópio operando na frequência de 30 GHz, seria necessário um paraboloide de cerca de 20 km de diâmetro. Por sua vez, para operação na frequência de 3 GHz o diâmetro do paraboloide deve ser de 200 km para se obter a mesma resolução angular.

Aumentando-se os diâmetros, tem-se a limitação física e estrutural da construção de

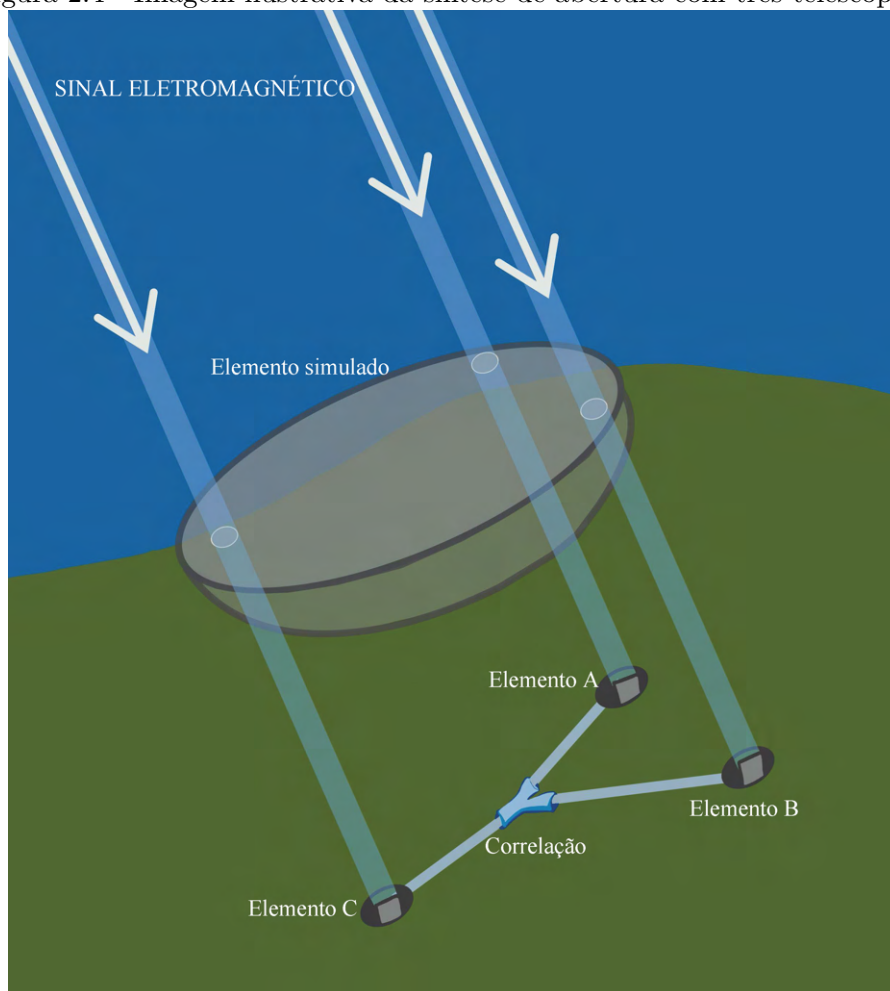
radiotelescópios capazes de observar fontes de emissão com estruturas de tamanho angular resolvíveis, já que seriam necessárias dimensões do prato estruturalmente inviáveis: irregularidades de superfície, dificuldades de construção, custos elevados, impossibilidade de realizar o rastreamento de uma fonte etc. As maiores antenas parabólicas guiáveis possuem cerca de 100 metros de diâmetro, e estão localizadas no *Green Bank Observatory* (GBO) na Virgínia Ocidental, Estados Unidos (REDMOND, K., 11 jan. 2024), e no *Effelsberg Observatory*, na Alemanha.

Os diâmetros de antenas com resolução angular comparável ou melhor do que a do óptico só podem ser sintetizados pela construção de interferômetros, como uma maneira de contornar esse problema dimensional, utilizando-se conjuntos de vários detectores - radiotelescópios relativamente pequenos - dispostos em uma determinada configuração geométrica e operando simultaneamente. Na prática, o princípio da interferometria se resume na técnica de síntese de abertura, usando-se muitos elementos relativamente pequenos, na qual é feita a amostragem da área de uma abertura de grandes dimensões que seria estruturalmente inviável de se construir

Na teoria, duas antenas são suficientes para se obter franjas de interferência e, sendo assim, já constituiriam um interferômetro (THOMPSON et al., 2017). No entanto, com apenas dois elementos não é possível se obter a distribuição bidimensional do brilho de uma fonte rádio no céu. Além disso, dependendo do diâmetro dessas antenas, apenas a observação de fontes muito fortes irá gerar algum resultado significativo. Portanto, na prática, tanto o número quanto a configuração do arranjo das antenas do interferômetro dependem de qual sensibilidade, resolução e nível de fidelidade da imagem que se espera obter - ou seja, a ciência que se espera fazer - com a construção do instrumento. É também necessário considerar os recursos disponíveis ou custo do instrumento.

Na Figura 2.4 tem-se uma ilustração mais simples do princípio da interferometria, em um arranjo com somente três elementos, na qual um sinal eletromagnético é recebido por cada telescópio - A, B e C - separados por uma certa distância, e que combinando-se os sinais dos três é possível se obter o resultado de certa forma equivalente a um telescópio sintetizado de dimensões maiores.

Figura 2.4 - Imagem ilustrativa da síntese de abertura com três telescópios.



Com isso, se torna possível a construção de imagens com maior resolução espacial e, portanto, maior discernimento entre estruturas menores de um objeto celeste, sendo possível obter informações mais detalhadas e precisas de regiões ativas do Sol, associadas às manchas solares, assim como estrelas, galáxias, planetas ou outros objetos de interesse astrofísico.

Os interferômetros, no geral, podem operar nas bandas do óptico, infravermelho e rádio, este último sendo o estudado neste trabalho. Trata-se de um instrumento de dimensões extensas e de alta complexidade, composto por diversos elementos e subsistemas integrados funcionando em sincronismo, em relação a uma referência, e com os sinais das antenas estando coerentes em fase. A interferometria se caracteriza pelo desenvolvimento de uma infraestrutura que supere a limitação em determinada resolução espacial e/ou sensibilidade. A técnica é detalhada nas próximas seções.

2.4 Interferometria em Rádio Frequência

Na interferometria rádio, o arranjo do radiotelescópio se constitui em um conjunto de antenas, dispostas em uma determinada configuração geométrica, para a detecção da radiação eletromagnética emitida pela fonte de rádio nas frequências espaciais fornecidas pelo instrumento, e então a sua conversão em sinal de voltagem.

2.4.1 Frequências espaciais

Em interferometria e processamento de sinais, frequências espaciais são grandezas que descrevem como uma determinada propriedade de uma onda ou imagem varia no espaço, de maneira análoga ao que as frequências temporais representam em relação à variação no tempo.

Matematicamente, a frequência espacial indica quantas variações (ou ciclos) de uma determinada característica — como intensidade, fase ou brilho — ocorrem por unidade de distância. Assim como a frequência temporal é expressa em hertz (ciclos por segundo), a frequência espacial é expressa em ciclos por metro (ou, mais comumente, em radianos por metro).

Podemos imaginar uma onda senoidal no espaço, representando, por exemplo, a variação da intensidade luminosa ao longo de uma linha. Se essa onda tem comprimento de onda λ , sua frequência espacial é:

$$\nu_s = \frac{1}{\lambda} \quad (2.4)$$

ou, em termos angulares,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

onde k é o número de onda.

No contexto da interferometria de rádio, as frequências espaciais têm um papel central. Quando duas antenas de um interferômetro observam uma fonte celeste, elas formam uma linha de base (*baseline*) com comprimento B . Essa linha de base, quando projetada na direção da fonte, define uma frequência espacial proporcional à separação angular entre as antenas em unidades de comprimento de onda (λ):

$$(u, v) = \left(\frac{B_x}{\lambda}, \frac{B_y}{\lambda} \right) \quad (2.6)$$

Essas coordenadas (u, v) representam as frequências espaciais medidas pelo interferômetro. O conjunto de todas as linhas de base do arranjo de antenas de um interferômetro — e, portanto, de todas as visibilidades medidas por ele — quando projetadas no plano perpendicular à linha de visada, define as componentes de seu chamado plano UV (TAYLOR et al., 1999).

O conjunto de todas as medidas de (u, v) obtidas por diferentes pares de antenas (ou por rotação da Terra, no caso de um interferômetro terrestre) permite reconstruir aproximadamente a distribuição de brilho da fonte celeste $I(l, m)$ — ou seja, sua imagem. Essa relação é formalizada pela Transformada de Fourier bidimensional:

$$V(u, v) = \iint I(l, m) \cdot e^{-2\pi i(ul + \nu m)} \cdot dl \cdot dm \quad (2.7)$$

onde, $V(u, v)$ é a visibilidade complexa, ou seja, o sinal medido pelo interferômetro; $I(l, m)$ é a distribuição de brilho da fonte em coordenadas angulares; e (u, v) são as frequências espaciais, ou componentes espaciais da frequência. Em outras palavras, o interferômetro mede o espectro de frequências espaciais da fonte celeste, e a imagem é obtida pela transformada inversa de Fourier dessas medidas (THOMPSON et al., 2017).

Então, altas frequências espaciais correspondem a estruturas pequenas e detalhadas da imagem (alta resolução angular), enquanto que baixas frequências espaciais correspondem a estruturas grandes e difusas (baixa resolução). Por isso, interferômetros com grandes separações entre antenas (grandes linhas de base) são sensíveis às altas frequências espaciais, enquanto os com antenas próximas captam as baixas frequências espaciais.

Toda e qualquer imagem pode ser decomposta em suas componentes ou frequências espaciais, e todas as componentes ou frequências espaciais podem ser usadas para reconstruir/compôr uma imagem (BOREMAN, 2001). As diferentes linhas de base em um interferômetro se traduzem em frequências espaciais distintas da fonte observada, e cada uma dessas corresponde a uma componente elementar na formação da imagem da fonte. Portanto, o conjunto de todas as componentes elementares obtidas pelo instrumento permite a construção da imagem aproximada da fonte (TAYLOR

et al., 1999).

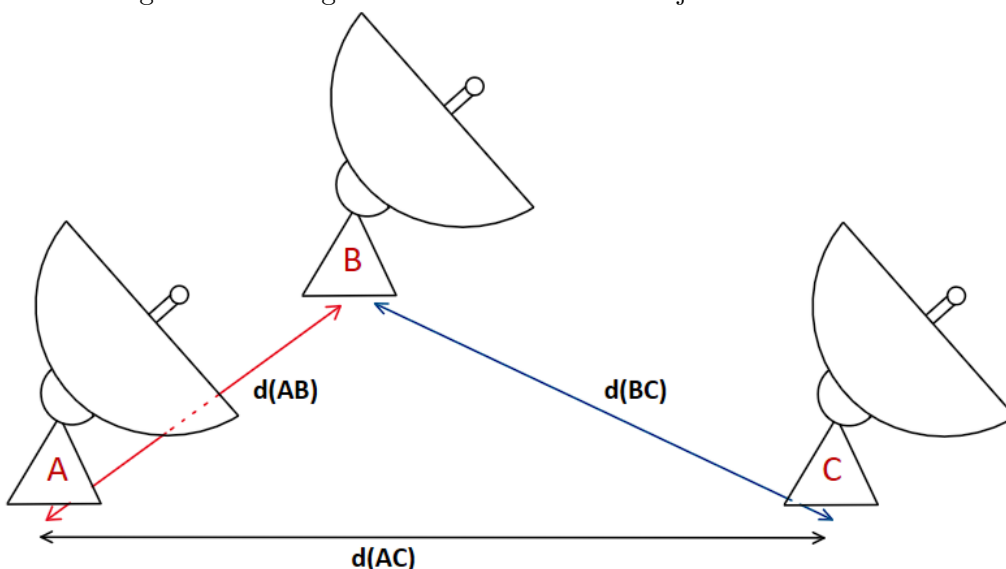
Como a área de uma abertura sintética de um interferômetro é amostrada com elementos discretos obtém-se um número finito de componentes, com respectivas frequências espaciais, que serão usadas na reconstrução da imagem - ou distribuição de brilho rádio - da fonte. Por este motivo a imagem produto é uma aproximação da imagem real da fonte. Logo, quanto maior o número de linhas de base distintas maior o número de componentes e conseqüentemente melhor a representação da imagem real da fonte.

2.4.2 Interferômetros

Então, dispor antenas em um arranjo específico permite obter-se uma maior variedade de linhas de base e, conseqüentemente, mais componentes de frequências espaciais.

Cada par distinto de elementos do arranjo de antenas apresenta uma distância específica entre elas, chamada de linha de base. Por exemplo, utilizando-se um arranjo simplificado como o da Figura 2.5, tem-se três antenas distintas, com diferentes distâncias entre elas. Os valores $d(AB)$, $d(BC)$ e $d(AC)$ representam as linhas de base entre as antenas AB, BC e AC, respectivamente.

Figura 2.5 - Imagem ilustrativa de um arranjo de três antenas.



A disposição física das antenas determina diretamente a distribuição de amostras no plano UV, e, portanto, a qualidade da síntese de imagem. Para otimizar o número e a distribuição das componentes de frequências espaciais (ou seja, dos pontos amostrados no plano UV), busca-se um arranjo que:

- Maximize o número de linhas de base independentes (com N antenas obtém-se $N(N - 1)/2$ linhas de base únicas);
- Proporcione uma cobertura UV uniforme, minimizando lacunas e redundâncias;
- Atenda aos requisitos científicos do instrumento, como resolução angular desejada, campo de visão e sensibilidade a escalas específicas de estrutura da fonte (TAYLOR et al., 1999).

Além disso, a rotação da Terra é usada como um recurso natural para preencher o plano UV, pois à medida que o objeto observado se desloca no céu, as projeções das linhas de base variam, cobrindo novas regiões do plano UV — técnica conhecida como síntese por rotação terrestre (*Earth Rotation Synthesis*) (THOMPSON et al., 2017).

Os arranjos de antenas podem assumir diferentes geometrias, cada uma com vantagens e desvantagens específicas:

- Linear (em linha reta): simples de implementar e de expandir, fornece boa resolução em uma direção, mas cobertura UV limitada — o que resulta em imagens alongadas.
- *Y-shaped* (em forma de “Y”): oferece boa cobertura UV bidimensional e é usado em grandes interferômetros.
- Circular: fornece cobertura UV simétrica e homogênea, ideal para reconstrução de imagens isotrópicas, mas mais complexo logisticamente.
- Reconfigurável ou híbrido: combina diferentes geometrias, permitindo flexibilidade na cobertura UV.
- *T-shaped* (em forma de “T”): trata-se de uma configuração de implementação relativamente simples, com cobertura UV melhor do que no caso linear. É o caso do arranjo de antenas do BDA.

A escolha do arranjo depende do objetivo científico e das restrições práticas, como terreno, orçamento, largura de banda, e faixa de frequências observadas (THOMPSON et al., 2017).

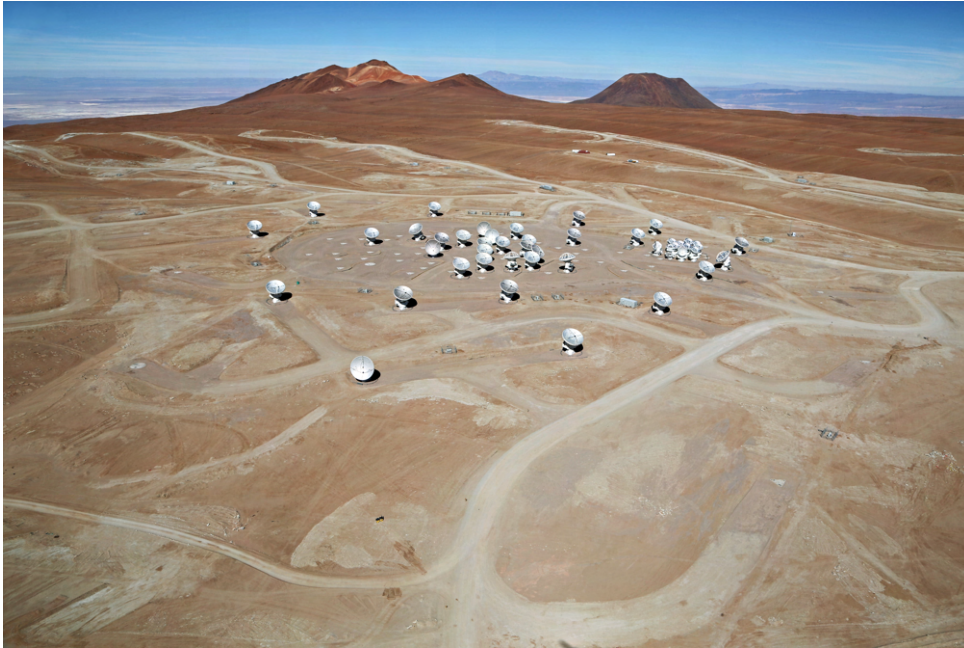
Dois exemplos de interferômetros rádio mais conhecidos são o *Very Large Array* (VLA), que possui um arranjo com geometria *Y-shaped*, como é mostrado na Figura 2.6, e o *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA), que tem uma disposição de antenas mais aleatória - matriz distribuída - e sua vista aérea é apresentada na Figura 2.7.

Figura 2.6 - Vista aérea do VLA.



Fonte: NRAO (s.d).

Figura 2.7 - Vista aérea do ALMA.



Fonte: ALMA OBSERVATORY (s.d).

2.5 Atrasos de fase

Para realizar uma observação com um rádio interferômetro, o objeto observado deve estar distante o suficiente do arranjo para que se possa assumir a aproximação de frente de onda plana, uma das garantias necessárias para que a distância percorrida pela onda desde a reflexão com a superfície coletora até o alimentador/foco sejam as mesmas e, conseqüentemente, estejam em fase. Essa distância mínima (d) é chamada de *far-field* do instrumento, e pode ser encontrada através da Equação 2.8, conhecida como Distância de Fraunhofer (BALANIS, 2015).

$$d = \frac{2.D^2}{\lambda} \quad (2.8)$$

A coerência de fase dos sinais de todas as antenas no momento de sua correlação é o que garante o funcionamento do instrumento como um interferômetro e pode ser obtida pelo ajuste do atraso das fases da onda de rádio incidindo sobre as antenas, em relação a um ponto interno do interferômetro tomado como referência. Isso deve ser obtido tanto pelo ajuste dos atrasos geométricos, quanto pelo atraso de fase instrumental dos sinais de cada antena, passando por toda a cadeia de componentes eletrônicos e cabeamento do respectivo receptor, até a entrada do subsistema

correlacionador de sinais (PERLEY et al., 1989). Esses atrasos são detalhados na sequência.

2.5.1 Atraso geométrico

Inicialmente, assume-se um sistema interferométrico simples de somente duas antenas, uma linha de base, para que seja discutida a problemática do atraso geométrico de forma mais simples. Posteriormente, a solução do problema será expandida para um arranjo maior e mais complexo de radiotelescópios.

Como pode ser visto na Figura 2.8, e também já fora brevemente discutido na Seção 2.4, existe uma componente de tempo τ_g correspondente à diferença de percurso da frente de onda proveniente da fonte observada, entre o sinal de uma das antenas em relação à outra de referência. Isso se deve pela diferença de tempo em que a radiação eletromagnética leva para atingir a segunda antena, após ter sido detectada pela primeira. Esse atraso depende diretamente da posição da fonte no céu, assim como da configuração do arranjo de antenas do instrumento interferométrico. Além disso, depende da também frequência de observação pois, a diferença de tempo dos sinais pode corresponder a uma maior ou menor diferença de fase, dependendo da frequência observada. (TAYLOR et al., 1999).

Dessa forma, para que seja garantida a coerência de fase dos sinais de todos os pares de antenas do arranjo, deve-se tanto desenvolver um *software* que realize os cálculos dos atrasos de fase geométricos para cada linha de base ao longo de todos os instantes de observação da fonte, quanto medir, determinar e monitorar os atrasos instrumentais da cadeia receptora de cada antena.

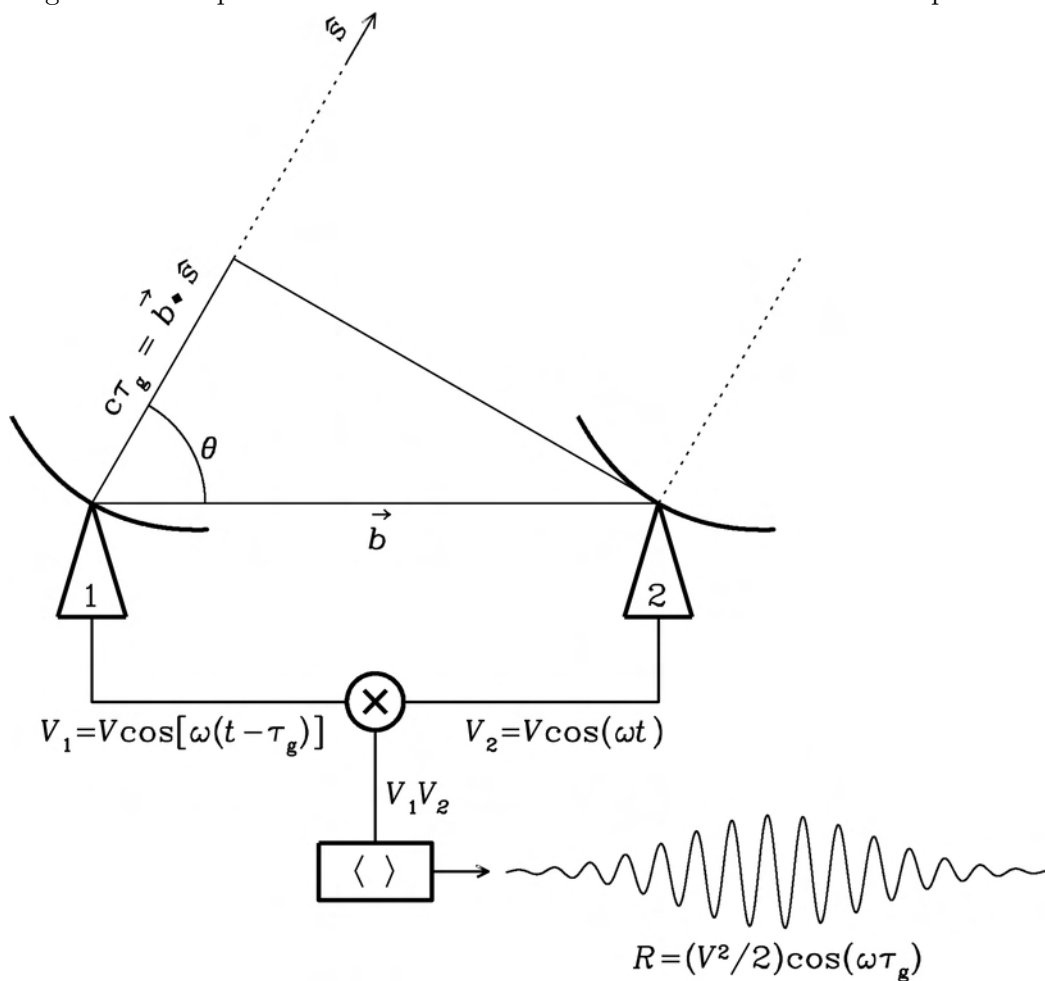
Para um melhor entendimento do princípio de funcionamento de um interferômetro, na Figura 2.8 é representado um esquemático simplificado de interferômetro básico multiplicador quasi-monocromático, com somente um par de antenas, observando uma banda estreita de frequência ($\Delta\nu \ll \nu$) de rádio centrada em $\nu = \omega/(2\pi)$, onde ω é a frequência angular. A letra \hat{s} representa o vetor unitário na direção do centro de fase da fonte celeste observada, \vec{b} é o vetor da linha de base apontando da antena 1 para 2, e “c” é a velocidade da luz. As voltagens das antenas 1 e 2 são dadas pelas Equações 2.9 e 2.10, respectivamente.

$$V_1 = V_0 \cos[\omega(t - \tau_g)] \quad (2.9)$$

$$V_2 = V_0 \cos[\omega t] \quad (2.10)$$

Na qual τ_g representa o atraso geométrico, o tempo a mais que a onda eletromagnética plana deve percorrer do momento que ela incide em uma antena até incidir na seguinte, V_0 é a amplitude do sinal e θ define o ângulo de inclinação da fonte (\hat{s}) em relação ao vetor de linha de base (\vec{b}), ou $\gamma = 90^\circ - \theta$ em relação ao vetor normal da superfície do solo, que não está representada na figura.

Figura 2.8 - Esquemático do funcionamento de um interferômetro multiplicador.



Fonte: Condon e Ransom (2016).

Como consequência do movimento de rotação da Terra em torno do seu próprio eixo, os objetos celestes observados possuem uma posição variável no céu terrestre

relativa a cada elemento do instrumento. Desta forma, é normal que estes objetos se encontrem em posições em que a frente de onda plana não seja detectada ao mesmo tempo por todas as antenas constituintes do arranjo interferométrico, como pode ser visto na Figura 2.8. Dessa forma, existe uma diferença de distância que o sinal deve percorrer entre ser captado por uma antena e pela seguinte, representado por $c\tau_g$. Esta diferença deve ser levada em consideração para se obter uma coerência de fase dos sinais e é analisada como um atraso de fase geométrico (CONDON; RANSOM, 2016).

2.5.2 Atraso instrumental

O atraso instrumental pode ser considerado um atraso de fase residual, decorrente do caminho eletrônico diferente que o sinal percorre entre cada antena e a entrada do correlacionador (TAYLOR et al., 1999). Esse tipo de atraso de fase também não é fixo, podendo variar ao longo de uma observação, a depender da temperatura, frequência de observação, polarização, erro de apontamento, instabilidade do LO etc. Uma das maneiras mais usuais de realizar a calibração dessa diferença é observar uma fonte pontual ao feixe do instrumento, forte e isolada, e realizar ajustes do atraso de fase, subtraindo-se a fase da fonte calibradora da fase do objeto observado, até que a máxima coerência do instrumento seja obtida (TAYLOR et al., 1999; THOMPSON et al., 2017). Assim, a fonte calibradora deve ser observada em intervalos regulares determinados, intercalado com a observação da fonte de interesse para se realizar os ajustes necessários.

Os sinais V_1 e V_2 obtidos na saída do receptor de cada par de antenas, desde que ajustado o atraso relativo de fase entre eles, devem ser processados para se obter amplitude e fase das componentes espaciais - visibilidades complexas - da fonte rádio observada. O sistema responsável pelo processamento de todos esses sinais é designado por correlacionador. Na sua saída obtém-se a amplitude e fase dos sinais de todos os pares de antenas, ou seja, a visibilidade para todas as linhas de base, dadas pela relação da Equação 2.11 que são proporcionais à densidade de fluxo da fonte e cuja fase $\omega\tau_g$ depende do atraso geométrico e da frequência (THOMPSON et al., 2017).

$$R = \langle V_1 V_2 \rangle = (V^2/2) \cos(\omega\tau_g) \quad (2.11)$$

Esses sinais são “limpos”, removendo-se componentes que possuam sinais de ruído e interferência eletromagnética de outras fontes, e calibrados em amplitude e fase a

partir dos sinais obtidos pela observação de uma fonte calibradora. Essa calibração tem como objetivo corrigir os efeitos instrumentais e atmosféricos que alteram a amplitude e a fase das visibilidades medidas, assegurando que os dados correspondam fielmente às propriedades físicas da fonte astronômica real. Em seguida, os sinais são processados em uma plataforma de imageamento para a produção da imagem rádio da fonte observada (CONDON; RANSOM, 2016). O funcionamento mais detalhado desse sistema correlacionador será discutido na Seção 2.6.

Uma fonte rádio calibradora deve apresentar certas características essenciais para garantir a confiabilidade do processo de calibração interferométrica. Em geral, essas fontes devem ser:

- Pontuais/compactas (não resolvidas) pelo arranjo interferométrico, de modo que todas as linhas de base meçam a mesma fase e amplitude — ou seja, a visibilidade deve ser constante em todo o plano u, v ;
- Estáveis no tempo, tanto em intensidade quanto em estrutura, permitindo sua reutilização em diferentes campanhas de observação sem variação significativa dos parâmetros medidos;
- De fluxo conhecido e bem determinado, possibilitando a calibração absoluta da amplitude das visibilidades;
- Suficientemente brilhantes, para garantir alta relação sinal-ruído mesmo em curtos intervalos de integração;
- Isoladas de outras fontes próximas, evitando contaminação por emissão difusa ou por fontes vizinhas no campo de visão;
- Bem posicionadas no céu em relação à fonte científica observada, de modo a minimizar diferenças de refração atmosférica, atraso ionosférico e variações de ganho entre observações sucessivas.

Na prática, diferentes catálogos de fontes calibradoras são mantidos para cada interferômetro e faixa de frequências (TAYLOR et al., 1999; THOMPSON et al., 2017). O BDA possui algumas fontes rádio de referência para serem usadas como calibradoras, mas ainda não possui um catálogo de calibradores.

2.6 Correlacionador de sinais

Normalmente utiliza-se um correlacionador de sinais por interferômetro. Tais dispositivos podem ser vistos, de maneira simplificada, como um multiplicador e integrador de sinais provenientes de cada par de antenas. Na prática, para a correlação dos dados de cada linha de base, o correlacionador precisa das componentes real e imaginária do sinal de cada antena para se obter as informações de amplitude e fase, e esse sistema deve ser do tipo complexo. O correlacionador deve processar esses sinais complexos por meio das seguintes operações: amostragem, digitalização, quantização, multiplicação e média temporal. O mesmo procedimento é efetuado para todas as outras antenas do arranjo, excluindo-se os pares que se repetem. Todos os sinais, assim gerados na saída do correlacionador, correspondem aos dados interferométricos de todas as frequências espaciais registradas da fonte rádio observada (PERLEY et al., 1989).

Os correlacionadores podem ser do tipo de *hardware*, em que há um dispositivo eletrônico físico, circuito impresso com microprocessador, ligado ao rádio interferômetro e que realiza o processo de correlação; ou de *software*, no qual todo processo é realizado somente através de processamento computacional. Dentro da categoria de hardware existem os do tipo *Application Specific Integrated Circuit* (ASIC), que já são desenvolvidos e fabricados para um propósito específico e determinado, e do tipo FPGA, que oferecem uma solução ótima com possibilidade de customização e um baixo orçamento. (ASIF et al., 2017).

Os correlacionadores são construídos com um determinado número de bits de digitalização, seja 1, 2, 3 ou mais bits, sendo os mais simples construídos com digitalizador de 1 bit. O digitalizador tem a função de receber as componentes analógicas dos sinais e transformá-las para um sinal digital de valores “alto” e “baixo”, ou 1 e 0, respectivamente.

Antes de se discutir o procedimento de um interferômetro de multiplicação complexa, é interessante recordar a multiplicação entre dois números complexos quaisquer, z_1 e z_2^* , o segundo representando o complexo conjugado do número z_2 . Tem-se que o produto entre eles se dá pela multiplicação das Equações 2.12 e 2.13 originando a relação 2.15.

$$z_1 = a + bi \tag{2.12}$$

$$z_2^* = c - di \quad (2.13)$$

Nas quais, “ a ”, “ b ”, “ c ” e “ d ” são números reais e constantes, e “ i ” representa o imaginário $\sqrt{-1}$.

$$z_1 z_2^* = (a + bi)(c - di) \quad (2.14)$$

$$z_1 z_2^* = (ac + bd) + (bc - ad)i \quad (2.15)$$

Para um correlacionador de multiplicação complexa, com as componentes real e imaginária de um sinal recebido, estas são representadas por cossenos e senos, respectivamente. Nas Equações 2.16 e 2.17 são representadas as saídas do correlacionador de 1 bit para correlação das componentes de cossenos, C_1 e C_2 , e senos, S_1 e S_2 . Nelas, o símbolo \oplus representa o operador lógico Ex-OR (*Exclusive OR*), e $\bar{\oplus}$ o operador lógico Ex-NOR (*Exclusive NOR*). (RAMESH et al., 2006).

$$C_1 \oplus C_2 + S_1 \oplus S_2 \quad (2.16)$$

$$C_1 \oplus S_2 + S_1 \bar{\oplus} C_2 \quad (2.17)$$

Como os sinais já foram amostrados pelo digitalizador, as operações são representadas na Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4.

Tabela 2.1 - Operador Ex-OR para as componentes C_1 e C_2 .

C_1	C_2	$C_1 \oplus C_2$
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Tabela 2.2 - Operador Ex-OR para as componentes S_1 e S_2 .

S_1	S_2	$S_1 \oplus S_2$
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Tabela 2.3 - Operador Ex-OR para as componentes C_1 e S_2 .

C_1	S_2	$C_1 \oplus S_2$
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

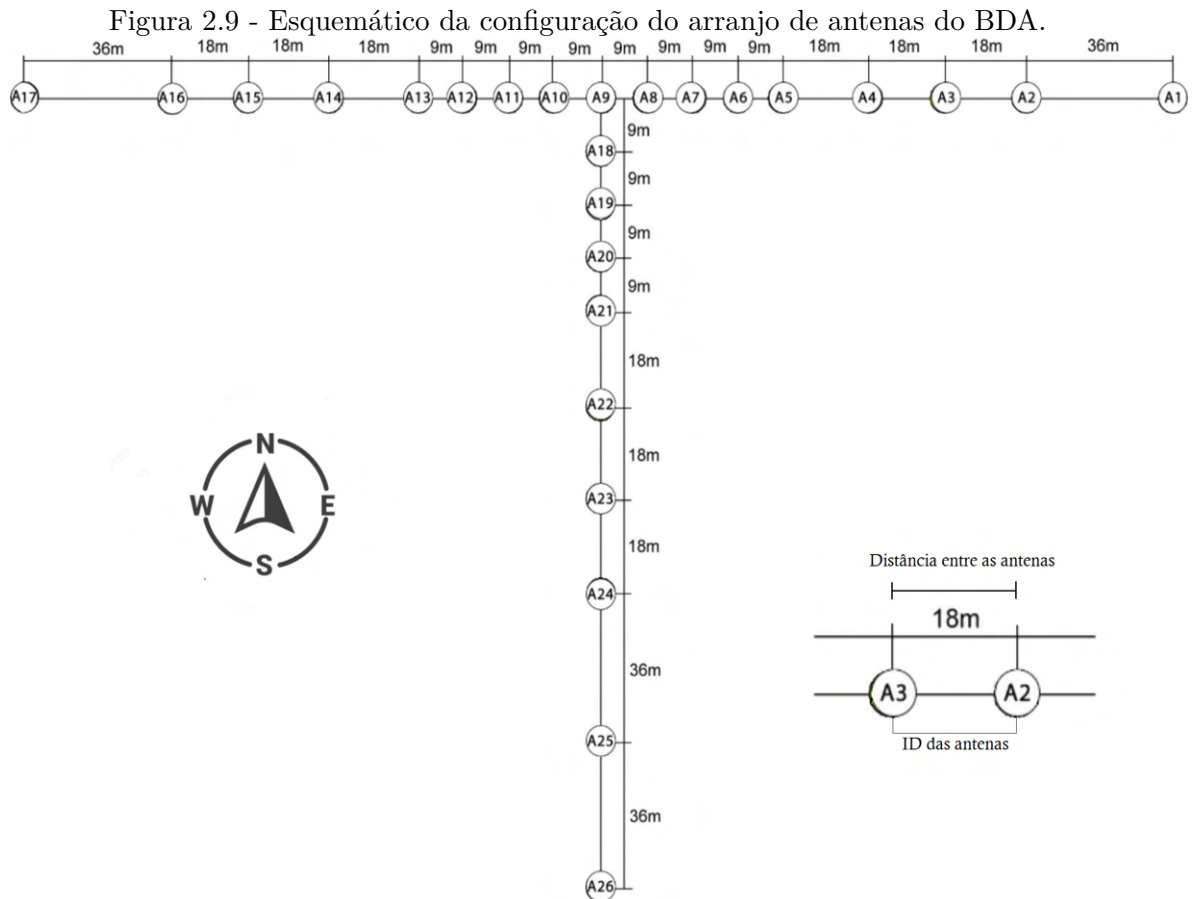
Tabela 2.4 - Operador Ex-NOR para as componentes S_1 e C_2 .

S_1	C_2	$S_1 \oplus \overline{C_2}$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	1

2.7 *Brazilian Decimetric Array*

O rádio interferômetro estudado neste trabalho, BDA, está localizado dentro do INPE, na cidade de Cachoeira Paulista, estado de São Paulo, e é composto por um conjunto de 26 antenas parabólicas de 4 metros de diâmetro, em malha, com uma área efetiva de 7,5 metros quadrados. O arranjo de antenas tem uma configuração em forma de “T”, como pode ser visto no esquemático da Figura 2.9 e na vista aérea da Figura 2.10, com linhas de base de 252 metros na direção Leste-Oeste e 162 metros na direção Sul. O BDA é capaz de realizar observações em frequências entre 1200 MHz e 1700 MHz, com sensibilidade de 3 Jy/feixe para um segundo e resoluções temporal maior ou igual a 0,1 segundos e angular de até 2,5 minutos de arco (em 1700 MHz) (SAWANT et al., 2000). Essa configuração foi selecionada por

questões de maior simplicidade de implementação e menor custo. No entanto, existe a intenção de estender a banda de operação futuramente, incluindo as frequências de 2,8 e 5,6 GHz.



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2022).

Figura 2.10 - Vista de satélite da configuração do arranjo de antenas do BDA.



Fonte: Adaptado de Google (2022).

Na Figura 2.11 é possível visualizar, do nível do solo *in situ*, as linhas de base leste/oeste e sul do arranjo apresentadas nas vistas aéreas. Deve ser mencionado que, a despeito do arranjo estar instalado no vale do Ribeirão das Pitas, o qual margeia as linhas de base Oeste e Sul, existem direções em torno do arranjo sem obstáculo natural algum, o que pode torná-lo mais suscetível a interferências de rádio advindas de diversas fontes nos arredores, como torres de comunicação, televisão, micro-ondas, redes de alta tensão e outros dispositivos geradores de frequência no espectro de rádio. Por isso, são importantes meios de proteção do espectro ou mitigação de sinais interferentes que garantam faixas de frequências reservadas à radioastronomia, como prevê o “Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil”, referenciado em [Anatel \(2020\)](#).

Figura 2.11 - Vista a nível do solo *in situ* das linhas de base do BDA.



Na Tabela 2.5 são apresentadas as características resumidas do BDA.

Tabela 2.5 - Características gerais do BDA.

Número de antenas	26
Diâmetro das antenas	4 m
Configuração do arranjo	Leste-Oeste-Sul em “T”
Frequências de observação	1.2 a 1.7 GHz
Resolução temporal	≥ 0.1 s
Linha de base mínima	9 m
Linha de base máxima	252 m (Leste-Oeste) 162 m (Norte-Sul)
Campo de visão	$\sim 4^\circ \times 4^\circ$ (em 1.2 GHz)
Número de linhas de base	325
Resolução angular	~ 2.8 arc min (em 1.4 GHz)
Sensibilidade	~ 3 Jy/feixe (em 1.4 GHz, 1 s)
Cobertura de rastreo	Azimute: 340° e Elevação: 160°
Acurácia de apontamento/rastreo	< 3 arc min
Modos de observação	<i>Snapshot</i> , Trânsito, Rastreo

2.8 Correlacionador de sinais do BDA

No caso do BDA, o correlacionador utilizado no projeto tem como constituinte uma placa do tipo FPGA, do modelo Altera Stratix III (EP3SL150F1152C3), como mostrado na Figura 2.12, e está sendo programada em linguagem Verilog. Em 2015, a empresa Altera foi adquirida pela Intel e, desde então, os *softwares* programadores das FPGAs desta família são desenvolvidos e atualizados por esta companhia. Durante a escrita deste trabalho, o BDA ainda se encontra em fase de desenvolvimento e é possível ver uma imagem do correlacionador, que opera com 1 bit, em teste de bancada na Figura 2.13, na qual estão representados: (1) placa de FPGA; (2) Programador FPGA (Ethernet Blaster II); (3) Digitalizador.

Figura 2.12 - Imagem do FPGA utilizado no correlacionador do BDA.

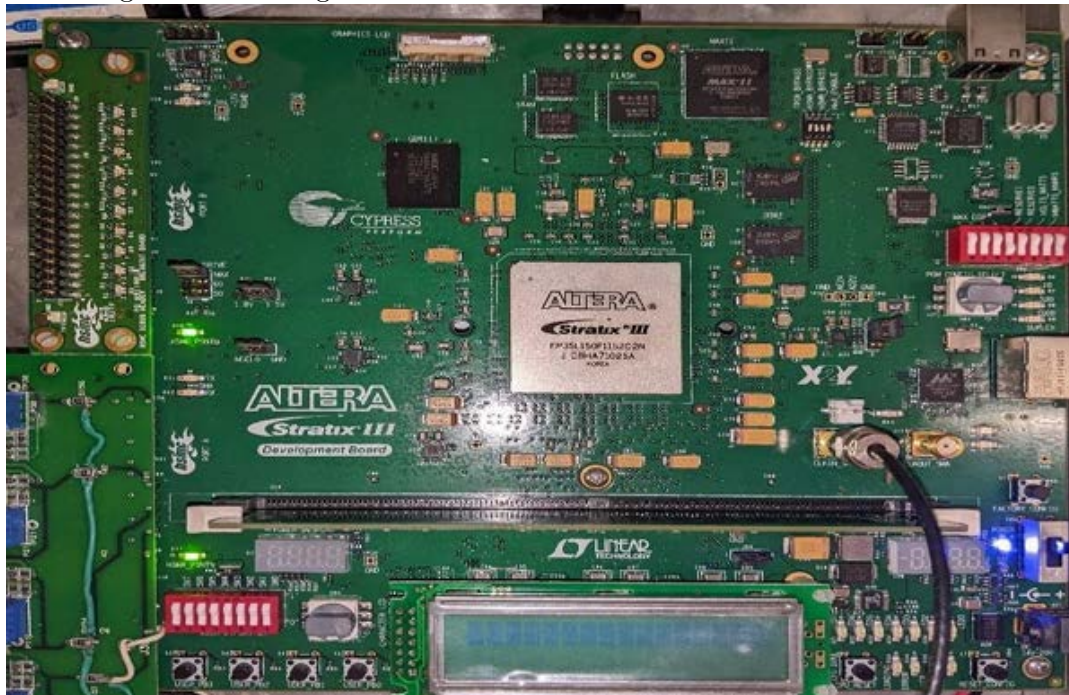
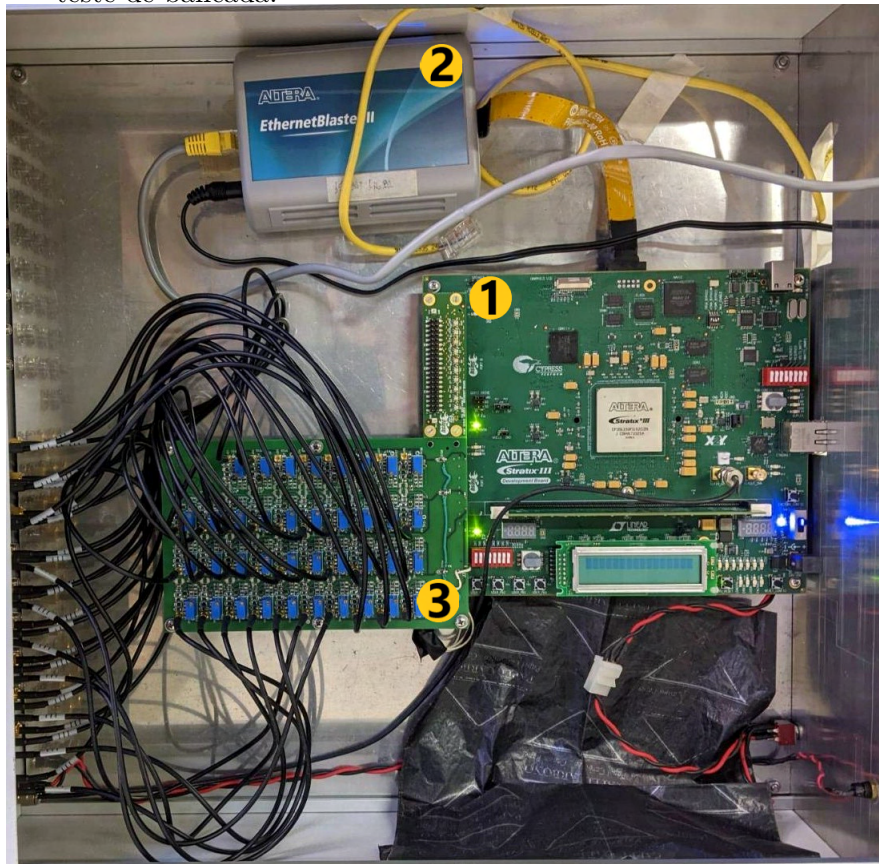


Figura 2.13 - Imagem do *hardware* do correlacionador do BDA, com a caixa aberta, em teste de bancada.



Na imagem, o componente (1) representa a placa de FPGA, (2) Internet Blaster II e (3) o Digitalizador.

Alguns dados relevantes da placa FPGA podem ser vistos na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Características relevantes da placa FPGA Altera Stratix III.

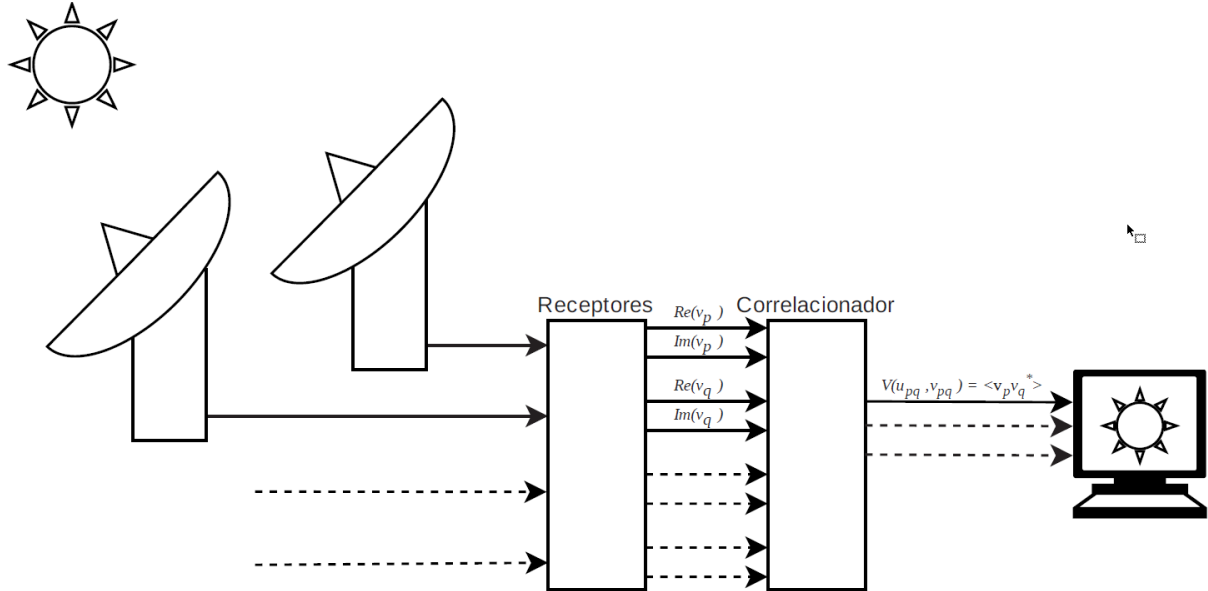
Linguagem FPGA	Verilog
Níveis de digitalização	2
Taxa de amostragem	10 MHz
Frequência de <i>Clock</i>	50 MHz
Tempo de integração	100 ms
Antenas (máximo estimado)	50

Fonte: Adaptado de Strauss et al. (2022).

O sistema de funcionamento do correlacionador, associado ao restante do equipa-

mento, pode ser exemplificado no esquemático da Figura 2.14.

Figura 2.14 - Esquemático simplificado do subsistema correlacionador de sinais do BDA.



Fonte: Strauss et al. (2022).

Sejam duas antenas, P e Q , formando uma linha de base no sistema. O sinal da fonte observada recebido pelas antenas é amplificado pelos receptores, sendo a componente real das antenas P e Q representados por $Re(v_p)$ e $Re(v_q)$, respectivamente. A componente imaginária é obtida a partir da componente real aplicando-se uma quadratura em fase, com defasagem de 90° , e obtém-se os sinais complexos representados por $Im(v_p)$ e $Im(v_q)$. O correlacionador então calcula a visibilidade da linha de base, que representa a média da multiplicação da voltagem da antena P , v_p , com o conjugado da voltagem da antena Q , v_q^* , de acordo com a Equação 2.18, aplicando-se os respectivos ajustes de atrasos geométrico e instrumental, previamente determinados, para garantir a coerência de fase de todos os sinais nos dados das visibilidades de saída. Desta forma, é gerado o conjunto de visibilidades de todas as linhas de base do interferômetro. O computador então, tendo recebido essas visibilidades complexas, processa esse conjunto usando uma plataforma de imageamento interferométrico - estando planejado o uso da plataforma *Common Astronomy Software Application* (CASA) - para produção da imagem da distribuição de brilho da fonte astronômica (The CASA Team et al, 2022).

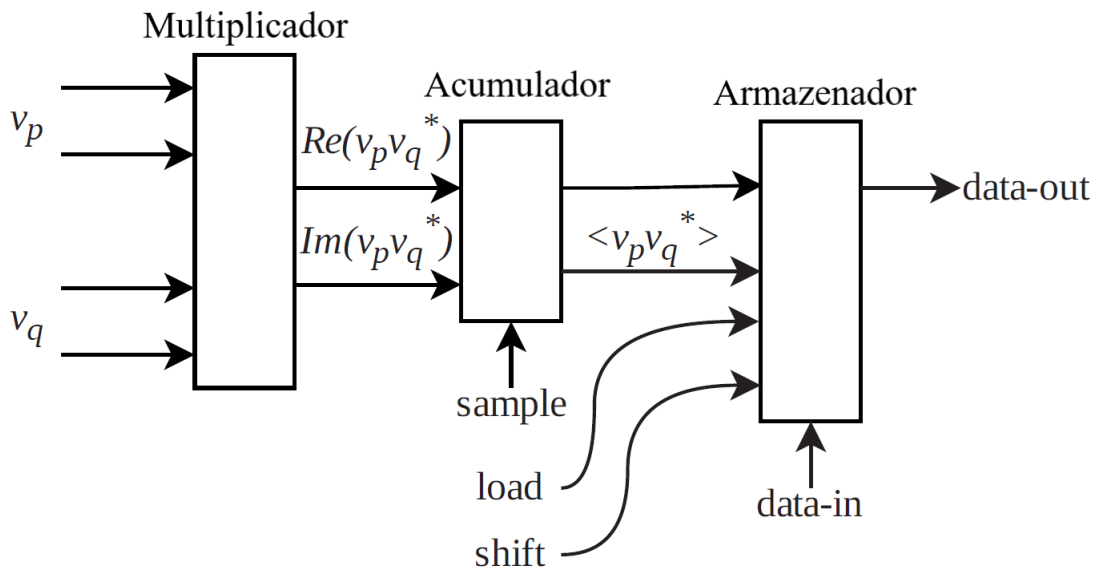
$$V(pq) = \langle v_p \cdot v_q^* \rangle \quad (2.18)$$

Para entender melhor o funcionamento do correlacionador apresentado na Figura 2.13, tem-se que os sinais recebidos das antenas, já em componentes real e complexa, entram na placa digitalizadora, representada em (3), que tem a função de transformar o sinal analógico para digital de dois níveis - para o correlacionador de 1 bit. O FPGA, representado em (1), realiza todos os cálculos em paralelo e o programador, Ethernet Blaster II representado em (2), permite atualizar o *software* do FPGA.

A célula de correlação, desenvolvida em Verilog e programada no FPGA, consiste na multiplicação dos sinais. O acumulador calcula a média das voltagens e são armazenadas no bloco chamado de armazenador, para posteriormente serem descarregadas. O sinal de *sample* tem o objetivo de produzir a cadência de amostragem, no caso de 20 MHz, e os sinais de *load* e *shift* servem para realizar o descarregamento dos dados armazenados no acumulador, sendo o *load* enviado ao final do período de integração, e o *shift* para deslocar os dados para saída (STRAUSS et al., 2022).

O esquemático do *software* de funcionamento da célula correlacionadora pode ser visto na Figura 2.15.

Figura 2.15 - Esquemático do *software* da célula de correlação.



Fonte: Adaptado de Strauss et al. (2022).

A multiplicação complexa, que é realizada no *software* da célula de correlação, é baseado nas Equações 2.19, 2.20 e 2.21.

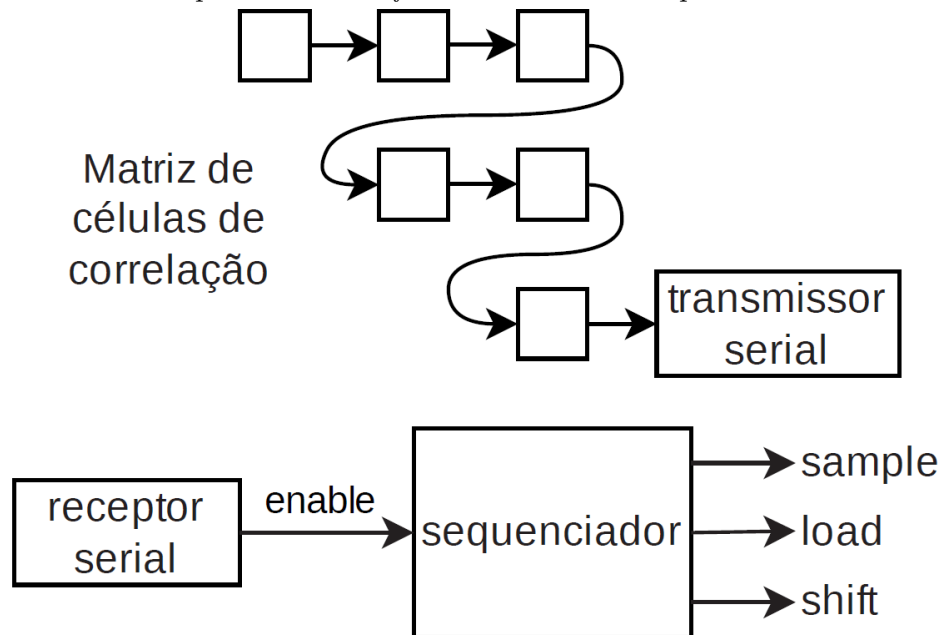
$$v_p v_q^* = [Re(v_p) + i.Im(v_p)].[Re(v_q) - i.Im(v_q)] \quad (2.19)$$

$$Re(v_p v_q^*) = Re(v_p)Re(v_q) + Im(v_p)Im(v_q) \quad (2.20)$$

$$Im(v_p v_q^*) = Im(v_p)Re(v_q) - Re(v_p)Im(v_q) \quad (2.21)$$

As células de correlação são então organizadas em cadeia dentro de uma matriz, com todas as combinações P e Q de linhas de base, com um transmissor serial ao final para transmitir os dados para o computador. Então, o sinal é recebido pelo receptor serial e o sequenciador então envia os sinais de *sample*, *load* e *shift* para serem recebidos em etapas mostradas anteriormente (STRAUSS et al., 2022). O esquemático do *software* do circuito completo do correlacionador pode ser visto na Figura 2.16.

Figura 2.16 - O esquemático do *software* do circuito completo do correlacionador.



Fonte: Strauss et al. (2022).

3 METODOLOGIA

Um sinal radioastronômico pode ser representado de forma simplificada como uma onda harmônica, cuja amplitude, frequência angular e fase descrevem a variação temporal do campo elétrico recebido por uma antena. Assim, a voltagem induzida em uma antena por uma onda plana proveniente de uma fonte celeste pode ser expressa nas Equações 2.9 e 2.10. A fase representa a posição instantânea da oscilação no ciclo da onda e está diretamente relacionada à evolução temporal do fenômeno físico que gerou a radiação. Em outras palavras, fases distintas correspondem a instantes distintos na evolução da emissão da fonte. Dessa forma, para que um interferômetro consiga registrar corretamente a evolução temporal de um fenômeno astrofísico, é essencial que os sinais recebidos por todas as antenas mantenham coerência de fase — isto é, que cada antena registre o mesmo instante do fenômeno de forma sincronizada em fase.

Como uma das garantias de que os sinais estarão chegando em fase no correlacionador de sinais, os atrasos de fase geométrico e instrumental devem ser caracterizados. Para o primeiro, é necessário saber a posição geográfica de cada antena, para que se possa, então, calcular os vetores das linhas de base e realizar o produto escalar com o vetor posição de uma fonte observada no céu. Já no segundo tipo, deve-se avaliar a diferença de fase entre sinais de cada par de antenas, devido às diferenças de caminho elétrico/eletrônico entre cada antena e a entrada do correlacionador.

3.1 Ajuste do atraso geométrico

Para o atraso geométrico, característico do arranjo e da posição da fonte no céu em determinados horários de observação, as coordenadas geográficas das antenas primeiro devem ser mapeadas com precisão, assim como suas respectivas altitudes. Isso se faz necessário pois, apesar do projeto do BDA ser um arranjo em forma de “T”, é comum que ocorram imprecisões na execução e construção, mesmo que em alguns casos na ordem de centímetros (ou milímetros), e as antenas fiquem desalinhadas em relação a linha norte-sul e/ou leste-oeste, assim como em altura.

Com isso, são utilizadas medidas de equipamento de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) - Sistema de Navegação Global via Satélite - para definir com precisão a posição de cada antena, em relação ao centro terrestre. Esses dados serão apresentados em forma de tabela e, então, lidos como parâmetros para se calcular os valores dos vetores posição de cada linha de base pelo software responsável pelo cálculo dos atrasos geométricos.

Caso as coordenadas da fonte observada sejam utilizadas no sistema Equatorial Celeste, ascensão reta e declinação, pode-se utilizar as coordenadas do GNSS como estão. Caso sejam utilizadas coordenadas no sistema horizontal, azimute e elevação, é necessário realizar a conversão das coordenadas das antenas para um sistema local, centrado em algum ponto de referência interno do interferômetro.

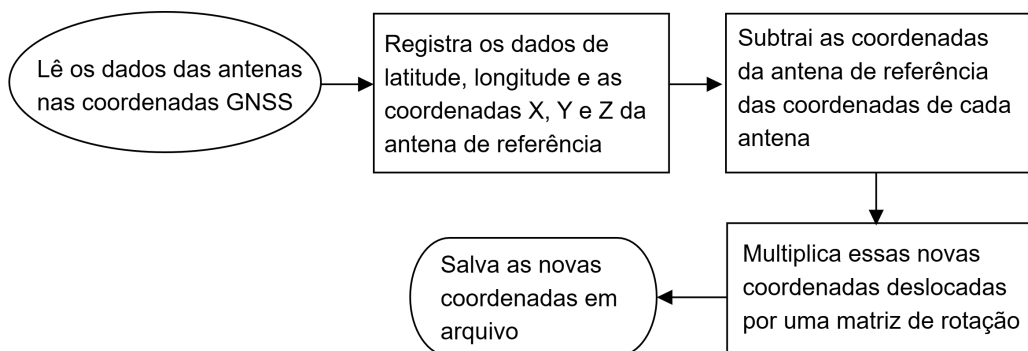
Para a conversão das coordenadas das antenas para um sistema local de referência foi utilizado o procedimento elaborado por Subirana et al. (2011), que é a transformação entre coordenadas ECEF (*Earth Centred Earth Fixed*) - centrado e fixado na Terra - e ENU (*East North Up*) - leste, norte e zênite. Inicialmente, escolhe-se um sistema centrado na antena A9, mas podendo-se escolher outra antena/ponto como referência.

Então, foi desenvolvido um software em Python que opera da seguinte maneira: lê os dados de GNSS das antenas; coleta os dados de coordenadas X, Y e Z da antena 9 (x_{ant_9} , y_{ant_9} , z_{ant_9}); cria um vetor com todas as coordenadas X, Y e Z de cada antena subtraídas dos respectivos valores das coordenadas de referência; esses valores então são multiplicados por uma matriz de rotação, Equação 3.1, em função da latitude (φ) e longitude (λ) da antena de referência; com isso, o programa retorna as coordenadas das antenas corrigidas para o sistema de coordenadas local.

$$\begin{bmatrix} x_{rot} \\ y_{rot} \\ z_{rot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -sen\lambda & -cos\lambda sen\varphi & cos\lambda cos\varphi \\ cos\lambda & -sen\lambda sen\varphi & sen\lambda cos\varphi \\ 0 & cos\varphi & sen\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

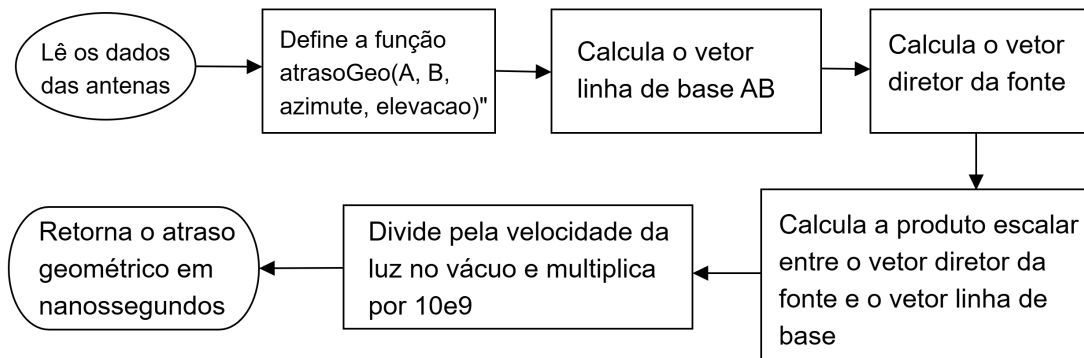
O fluxograma de funcionamento desse software pode ser visto na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxograma de funcionamento do software de conversão das coordenadas.



O desenvolvimento do software para determinação do atraso geométrico, sendo um dos propósitos deste trabalho, consiste em: definir uma função que lê os dados de um par de antenas, chamadas “A” e “B”, e o azimute e altura de uma fonte; calcula o vetor posição da linha de base do par; calcula o vetor posição de uma determinada fonte baseado no azimute e elevação; e calcula o produto escalar entre os dois vetores citados, ou seja, a projeção da linha de base na direção da fonte. A partir do tamanho dessa projeção e considerando-se que o sinal se propaga na velocidade da luz local, obtém-se o respectivo tempo de atraso de fase entre o sinal em uma antena em relação ao sinal de mesma fase na outra antena e, portanto, o atraso geométrico para a respectiva linha de base. Na Figura 3.2 é apresentado o fluxograma de funcionamento do software.

Figura 3.2 - Fluxograma de funcionamento do software de atraso geométrico.



Como uma fonte celeste altera seu azimute e elevação ao longo de uma observação, o código de cálculo do atraso geométrico pode ser utilizado a quantidade de vezes que for necessária, no intervalo de tempo que for mais adequado para o ajuste dos atrasos de fase geométricos da observação realizada, para cada linha de base do arranjo interferométrico.

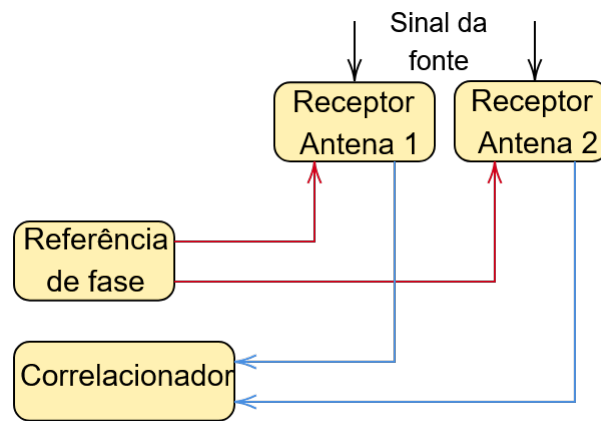
3.2 Ajuste do atraso instrumental

Quanto ao atraso instrumental, deve ser considerado o trajeto do sinal desde a entrada no alimentador posicionado no foco de cada antena do instrumento até a entrada no correlacionador. Dessa forma, por mais idênticos que sejam os elementos de um arranjo interferométrico, é normal que existam diferenças de fase entre as antenas de cada par do arranjo, devido aos caminhos efetivamente distintos dos

sinais de cada antena. Isto porque, no caso do BDA, nesse caminho do alimentador à entrada do correlacionador se incluem componentes eletrônicos diversos - amplificadores, filtros, osciladores, misturadores - cabos coaxiais, conversores eletro-óptico, bem como óptico-elétrico, além de fibras ópticas, cada um apresentando ou não alguma componente de fase. Além disso, a maior parte dessa cadeia está sujeita às condições ambientais, principalmente de temperatura.

Na Figura 3.3 é apresentado um esquema simplificado do processo de aquisição de sinais de fontes celestes por um par de antenas, levando em conta somente o envio do sinal da referência de fase e a chegada do sinal no correlacionador.

Figura 3.3 - Setup instrumental de operação para duas antenas.



Tendo isso em mente, a metodologia elaborada para a medição dos respectivos atrasos de fase, relativos à composição elétrica/eletrônica do instrumento, é constituída por duas componentes: atraso devido ao comprimento das fibras e atraso devido à eletrônica do sistema receptor. No entanto, neste trabalho só será realizada a caracterização da componente das fibras.

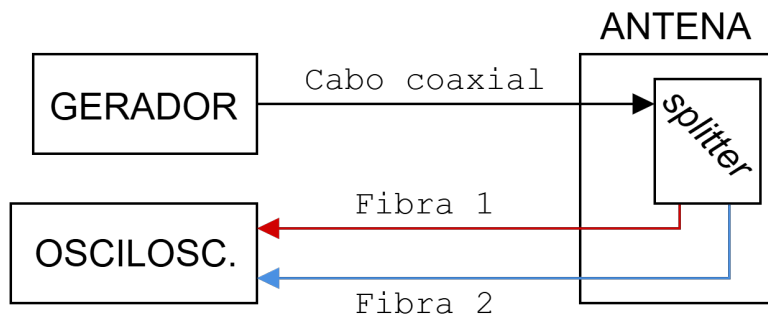
3.2.1 Montagens para aquisição

A ligação entre cada antena e a sala de controle é composta por duas fibras ópticas e um cabo coaxial. Com isso, deve-se caracterizar primeiramente o atraso de fase instrumental relativo a diferença de comprimento entre as duas fibras na mesma antena, que espera-se que não tenham o mesmo tamanho. Dessa forma, segue-se o procedimento, a ser realizado para cada antena mencionada anteriormente:

- Enviar um sinal, com um gerador de sinais, da sala de controle em direção a uma antena, através do cabo coaxial;
- O sinal é dividido por meio de um *splitter* e retorna para sala de controle através das duas fibras;
- É medida a diferença de fase entre os dois sinais recebidos por cada fibra.

O diagrama representativo desse procedimento pode ser visto na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Diagrama do teste de diferença entre fibras na mesma antena.

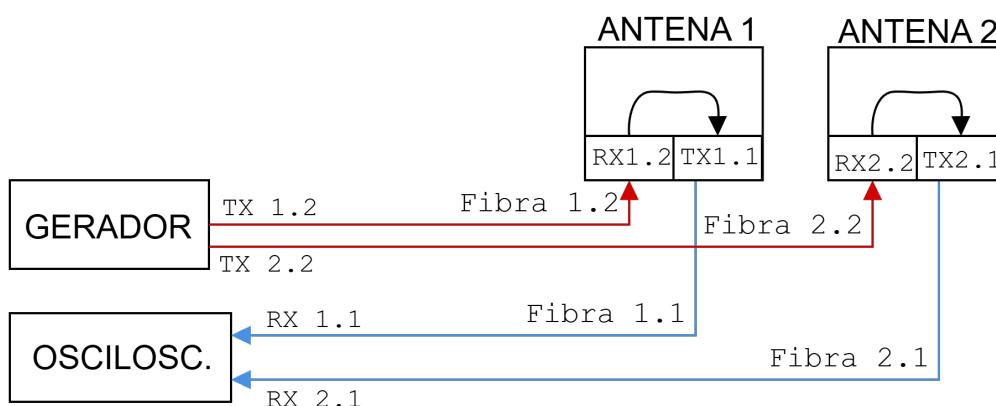


No entanto, o interesse final é na diferença de fase entre duas antenas diferentes. Considerando as portas de transmissão e recepção de sinais para cada fibra como TX e RX, respectivamente, o seguinte procedimento é executado:

- O sinal é produzido pelo gerador e é dividido por um *splitter*, e então enviado pelo TX 1.2 e TX 2.2 da fibra individual de cada antena;
- O sinal é recebido na base da antena, no RX 1.2 e RX 2.2, e redirecionado para o TX 1.1 e TX 2.1 da fibra de retorno, que é direcionada para sala de controle;
- O sinal da fibra de cada antena é recebido no RX 1.1 e RX 2.1, registrado no osciloscópio e é medido o atraso entre cada fibra.

O diagrama representativo desse procedimento pode ser visto na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Diagrama do teste de diferença entre duas antenas.

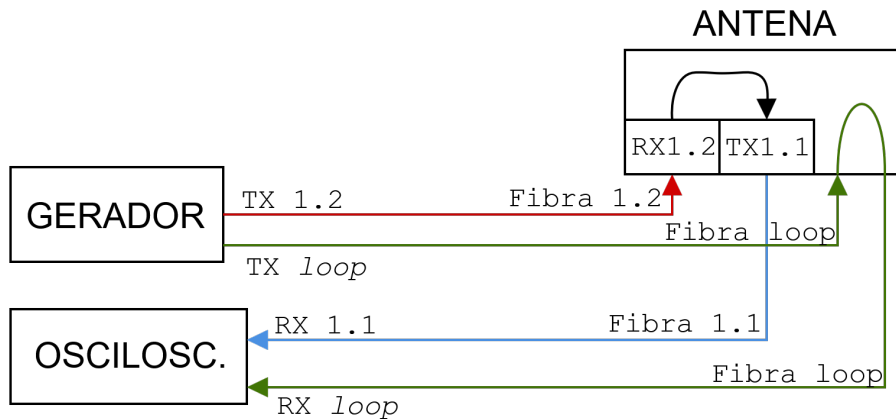


Ao longo de uma observação, podem ocorrer alterações nas condições das fibras e da eletrônica de recepção das antenas, por isso é importante que exista um monitoramento dos fatores ambientais e climáticos que podem acarretar nessas alterações. Além disso, é comum que sejam realizadas calibrações no decorrer de uma observação exatamente para que se possa corrigir essas alterações.

Os dois métodos anteriormente descritos permitem uma caracterização inicial dos atrasos instrumentais, mas não viabilizam esse monitoramento ao longo de uma observação. Então, um terceiro método de caracterização deve ser estabelecido, que seja capaz de permitir o monitoramento da variação do atraso no decorrer uma observação.

Para esse terceiro método, uma nova fibra será disponibilizada para cada antena e funcionará como um “loop” entre sinal que é enviado e o recebido, sem haver uma conversão TX/RX. O diagrama representativo dessa instalação com o “loop” pode ser visto na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Diagrama do teste de diferença entre fibras na mesma antena.



A ideia é avaliar se a diferença observada entre a fibra de *loop* entre cada antena é comparável à diferença observada utilizando o segundo método. Caso sim, tem-se uma fibra dedicada para monitoramento da variação do atraso instrumental ao longo de uma observação.

3.2.2 Software para cálculo da amplitude e fase

Após realizada a aquisição de dados para cada uma das configurações anteriores, os dados serão utilizados em uma função em Python denominada “inst_delay” que estima a diferença de fase e a amplitude normalizada de correlação entre dois sinais de entrada, em uma frequência específica padrão de 70 MHz. Resumidamente a função opera da seguinte maneira:

- Recebe como argumentos os dados de dois canais do osciloscópio que realizou a aquisição dos sinais, CH1 e CH2, um vetor temporal “t” e a frequência para comparação de fase, por padrão em 70 MHz;
- Realiza a demodulação complexa de cada sinal para banda base;
- Segmenta essa banda em intervalos de tamanho “nmean” e realiza a média para cada intervalo para aprimorar a relação sinal-ruído;
- Calcula a multiplicação complexa-conjugada dos dois termos;
- Retira a fase da média do resultado dessa multiplicação;

- Normaliza a magnitude do resultado da multiplicação pela potência da raiz quadrada média, que fornece a amplitude da correlação.

Para este trabalho, são realizadas somente as medidas dos atrasos instrumentais das antenas 12, 13, 20 e 21, pois nas demais ainda é necessária a instalação da fibra óptica adicional para se realizar os testes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos referentes à caracterização dos atrasos de fase geométrico e instrumental do interferômetro rádio BDA. Primeiro, é apresentada uma análise mais detalhada e crítica sobre a configuração da posição de cada uma das antenas do arranjo com relação às direções Leste-Oeste e Sul, comparando-se as posições esperadas de projeto com as posições reais medidas por GNSS. Em seguida, apresenta-se a caracterização do atraso geométrico, realizada através de um software desenvolvido e as medidas do GNSS. Por fim, apresenta-se parcialmente a caracterização do atraso instrumental das antenas 12, 13, 20 e 21 com as medidas realizadas, a partir da metodologia e montagens descritas no Capítulo 3, e a análise temporal referente às variações somente na fibra, não incluindo a parte de receptores das antenas.

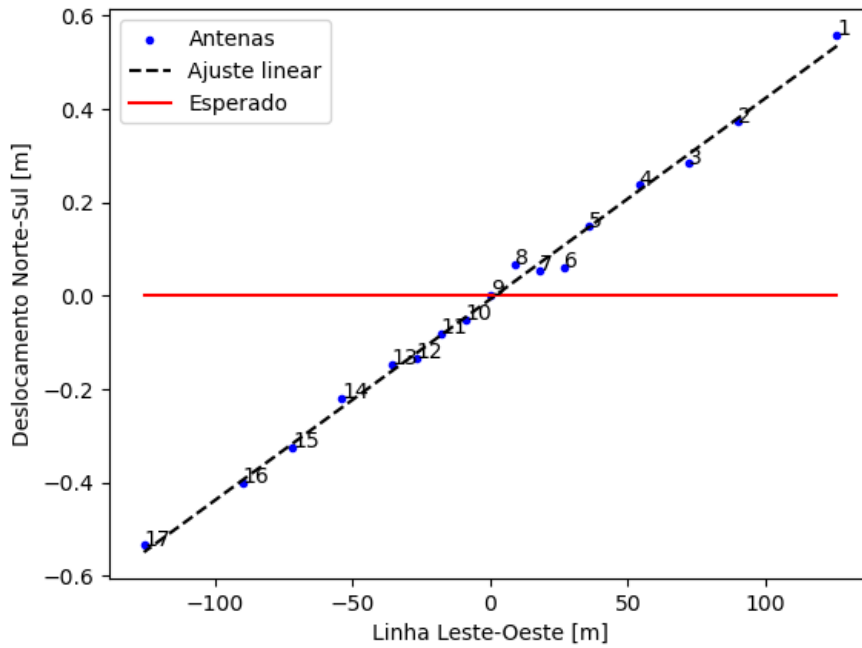
4.1 Disposição do arranjo

Para que a caracterização da componente geométrica dos atrasos de fase dos sinais entre pares de antenas seja feita de forma correta, é importante avaliar a real disposição das antenas após a construção e fixação dessas, tendo em vista que é normal e esperado que hajam leves desvios das posições das antenas planejadas em projeto.

Utilizando os dados medidos com o GNSS em 2015, que fornecem as coordenadas geográficas das antenas, aplicou-se o algoritmo apresentado no fluxograma da Figura 3.1 para a conversão de coordenadas das antenas, fixando a antena 9 como referência do sistema de coordenadas locais. Então, é possível visualizar na Figura 4.1 a disposição das antenas do segmento Leste - Oeste (antenas de 1 a 17), com um deslocamento presente na direção da linha Norte - Sul, na ordem de grandeza de centímetros.

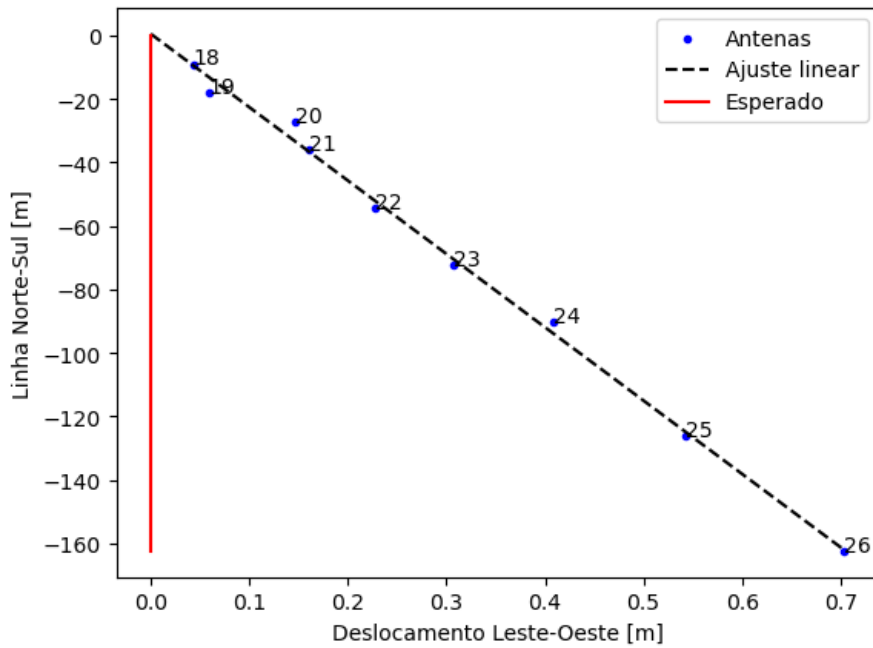
É importante destacar que na coordenada ortogonal à linha de base analisada as variações de disposição para cada gráfico estão na ordem de décimos de metros, e as linhas de base estão na ordem de dezenas e centenas de metros, então a leitura dos gráficos de dispersão visualmente aparentam ser mais expressivas do que realmente são.

Figura 4.1 - Deslocamento das antenas da linha Leste - Oeste em relação ao planejado de projeto.



Como pode ser observado na Figura 4.1, existe uma disposição relativamente linear das antenas da direção Leste-Oeste, porém com uma aparente rotação no sentido anti-horário do sistema local. Então, foi feita também a mesma análise para a linha Norte - Sul, apresentada na Figura 4.2, na qual percebe-se também uma disposição relativamente linear das antenas, e deslocamentos entre a posição real e a linha de referência Norte - Sul.

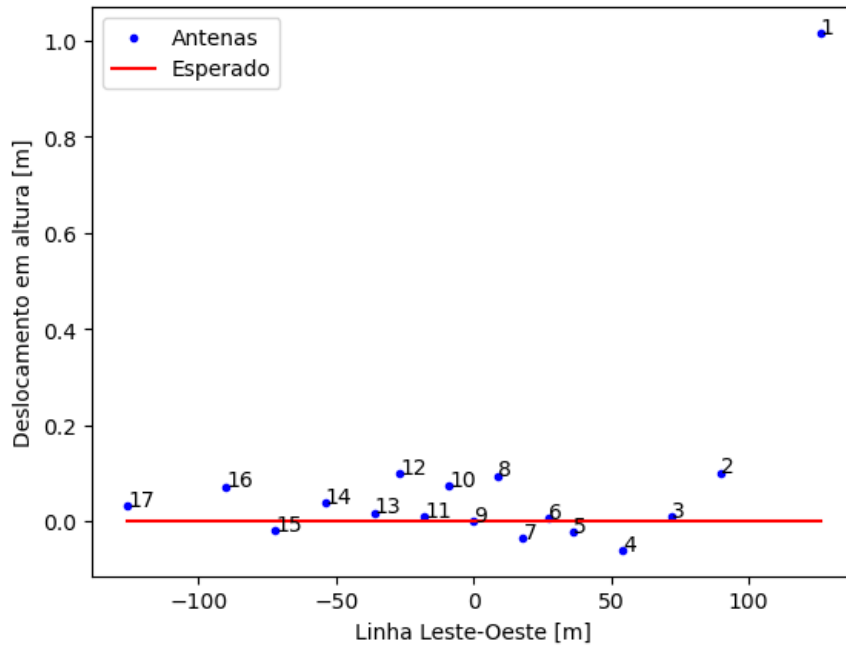
Figura 4.2 - Deslocamento das antenas da linha Norte - Sul em relação ao esperado de projeto.



Com as duas análises anteriores, é possível perceber que, apesar de pequena, existe uma rotação do arranjo em “T” real em relação ao planejado de projeto, de magnitude inferior a 0.3° .

Até então, as visualizações e análises foram feitas tomando-se como base uma vista aérea do arranjo, que desconsidera as diferenças de altura entre cada antena, mas que também são essenciais para caracterizar a correção do atraso geométrico. Portanto, na Figura 4.3 é possível representar uma vista em solo do arranjo, com direção perpendicular à linha Norte - Sul.

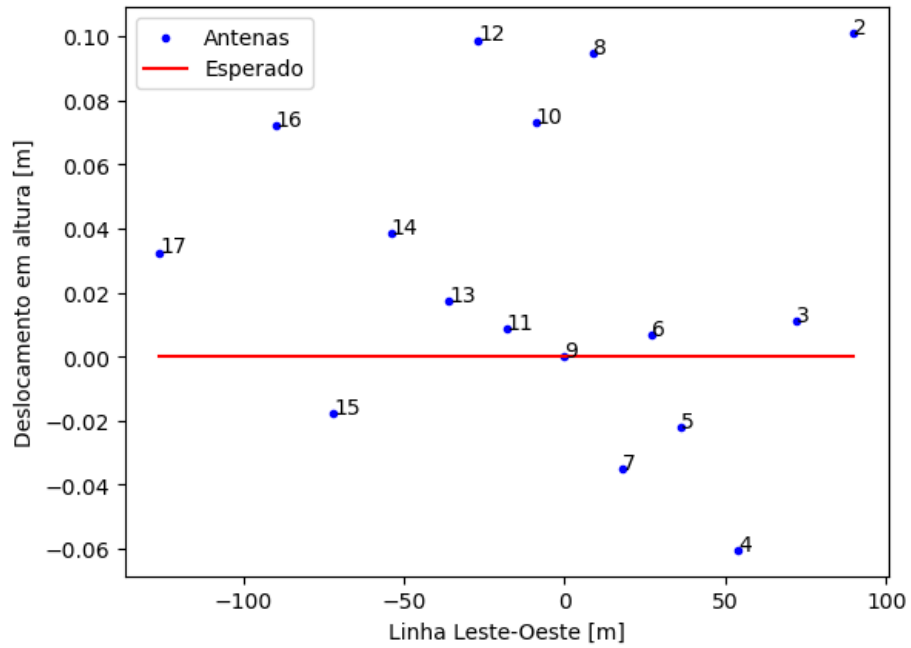
Figura 4.3 - Deslocamento em altura entre as antenas da linha Leste - Oeste, utilizando a altura da antena 9 como referência.



Contudo, nessa primeira abordagem é visível a maior diferença entre a altura da antena 1 com as demais, o que prejudica a escala de visualização da representação. Essa discrepância se deve ao fato dessa antena ter sido propositalmente construída mais elevada, por conta da presença natural de uma pequena quantidade de água no local.

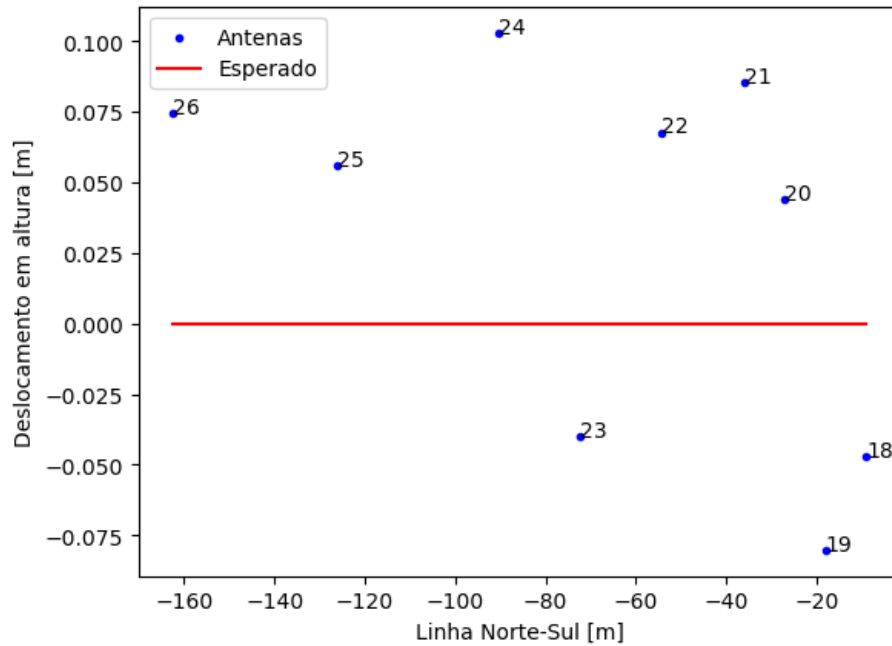
Então, sem contabilizar a presença da antena 1, foi gerada uma nova visualização em solo da linha Leste - Oeste, na qual é possível ver com maior clareza a diferença/dispersão das antenas em relação a altura de referência da antena 9.

Figura 4.4 - Deslocamento em altura entre as antenas da linha Leste - Oeste, utilizando a altura da antena 9 como referência e desconsiderando a antena 1.



Por fim, na Figura 4.5 é possível observar a diferença de altura entre as antenas da linha Norte - Sul, com referência a altura da antena 9.

Figura 4.5 - Deslocamento em altura entre as antenas da linha Norte - Sul, utilizando a altura da antena 9 como referência.



4.2 Atraso geométrico

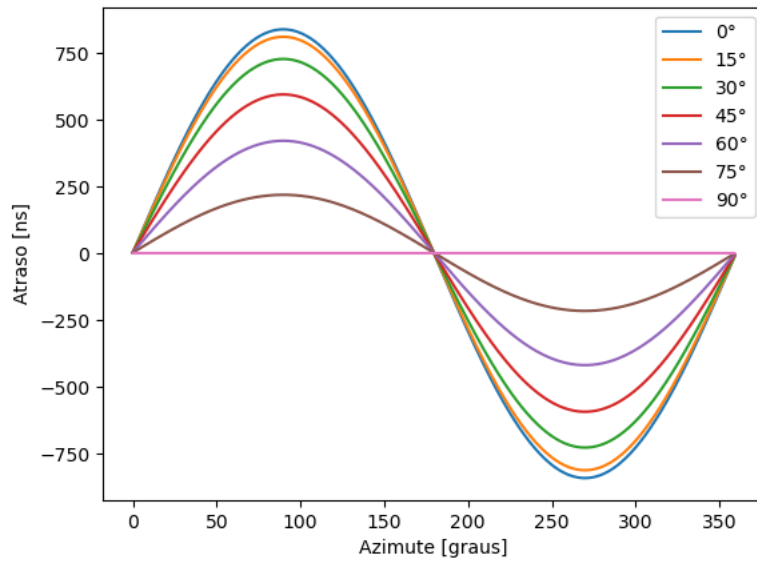
A componente geométrica normalmente é tratada determinando-se os atrasos, para todos os pares de antenas do arranjo e para cada instante, tomando-se um ponto como referência e a distância entre as antenas de cada par projetada na direção da fonte no céu. Neste caso, o ponto de referência escolhido foi a antena central do “T” do arranjo, a antena 9.

O software desenvolvido é capaz de gerar uma tabela com atrasos entre todas as antenas, para medidas de azimute de 0° a 360° , e medidas de elevação de 0° a 90° . Isto permitirá que se calcule a componente geométrica de atraso de todos os pares de antenas e para cada instante das observações da fonte no céu. No entanto, por questões de visualização, são apresentados alguns gráficos contendo os atrasos geométricos entre as antenas 1-17, 1-26, 17-26, 12-13, 12-20, e 13-21, realizando uma varredura de 0° a 360° de azimute, e de 0° a 90° de elevação com passo de 15° .

Na Figura 4.6 é apresentado o gráfico dos atrasos geométricos entre as antenas 1 e 17, para uma fonte variando no céu de 0° a 360° de azimute, e de 0° a 90° de elevação com passo de 15° . Como esperado, a medida em que a fonte tem elevações maiores no céu, o atraso entre as antenas diminui, e existe um plano teórico perpendicular à linha

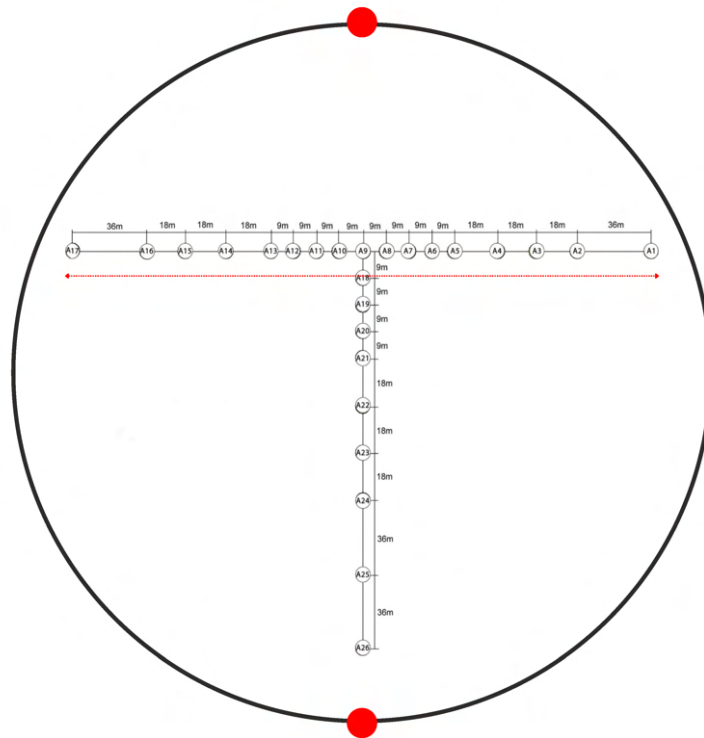
Leste-Oeste em que o atraso será zero independentemente da elevação, mostrados na Figura 4.7.

Figura 4.6 - Atraso de fase geométrico entre as antenas 1 e 17.



Cada curva representa um valor diferente de elevação da fonte observada, para um intervalo de 0° a 360° de azimute.

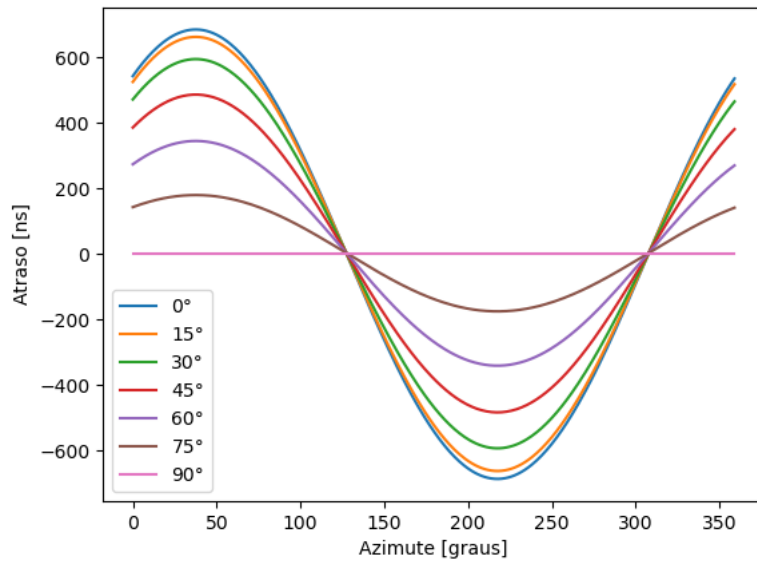
Figura 4.7 - Posições de uma fonte no céu para atrasos geométricos nulos entre as antenas 1 e 17.



O círculo em preto representa a variação em azimute do caminho de uma fonte fictícia no céu. A linha em vermelho representa a linha de base entre as antenas 1 e 17. Os pontos em vermelho representam valores de azimute próximos a 0° e 180° , nos quais o atraso será teoricamente zero para essa linha de base.

Na Figura 4.8 é apresentado o gráfico dos atrasos geométricos entre as antenas 1 e 26, para uma fonte variando no céu de 0° a 360° de azimute, e de 0° a 90° de elevação com passo de 15° . Nesse caso, também foi observada a redução no valor dos atrasos geométricos a medida que a fonte aumentava sua elevação no céu.

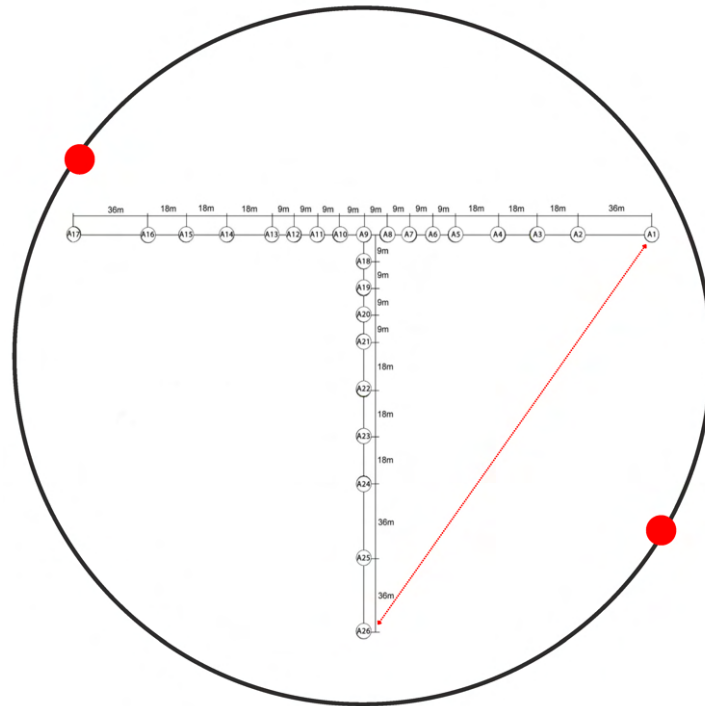
Figura 4.8 - Atraso de fase geométrico entre as antenas 1 e 26.



Cada curva representa um valor diferente de elevação da fonte observada, variando-se de 0° a 90° com passo de 15° , para um intervalo de 0° a 360° de azimute.

Da mesma forma que na imagem anterior, existem dois pontos de azimute em que o atraso será teoricamente zero independentemente da elevação, mostrados na Figura 4.9.

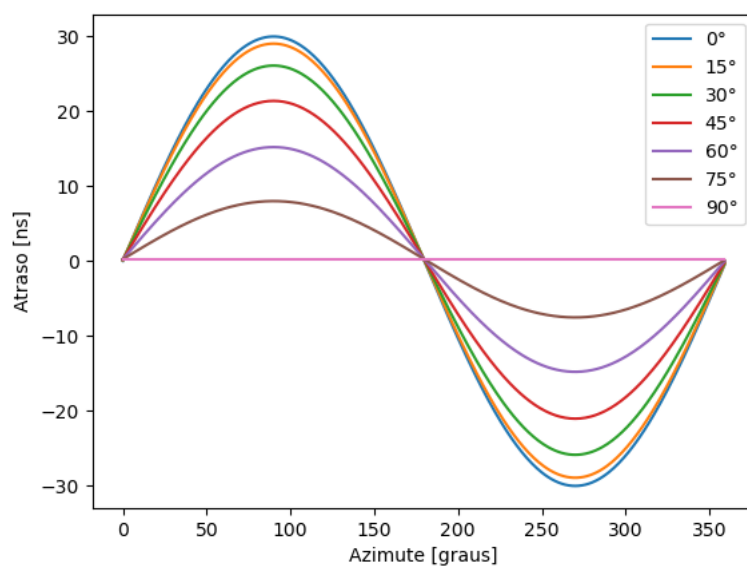
Figura 4.9 - Posições de uma fonte fictícia no céu para atrasos geométricos nulos entre as antenas 1 e 26.



O círculo em preto representa a variação em azimute do caminho de uma fonte fictícia no céu. A linha em vermelho representa a linha de base entre as antenas 1 e 26. Os pontos em vermelho representam valores de azimute teóricos em que o atraso será zero para essa linha de base.

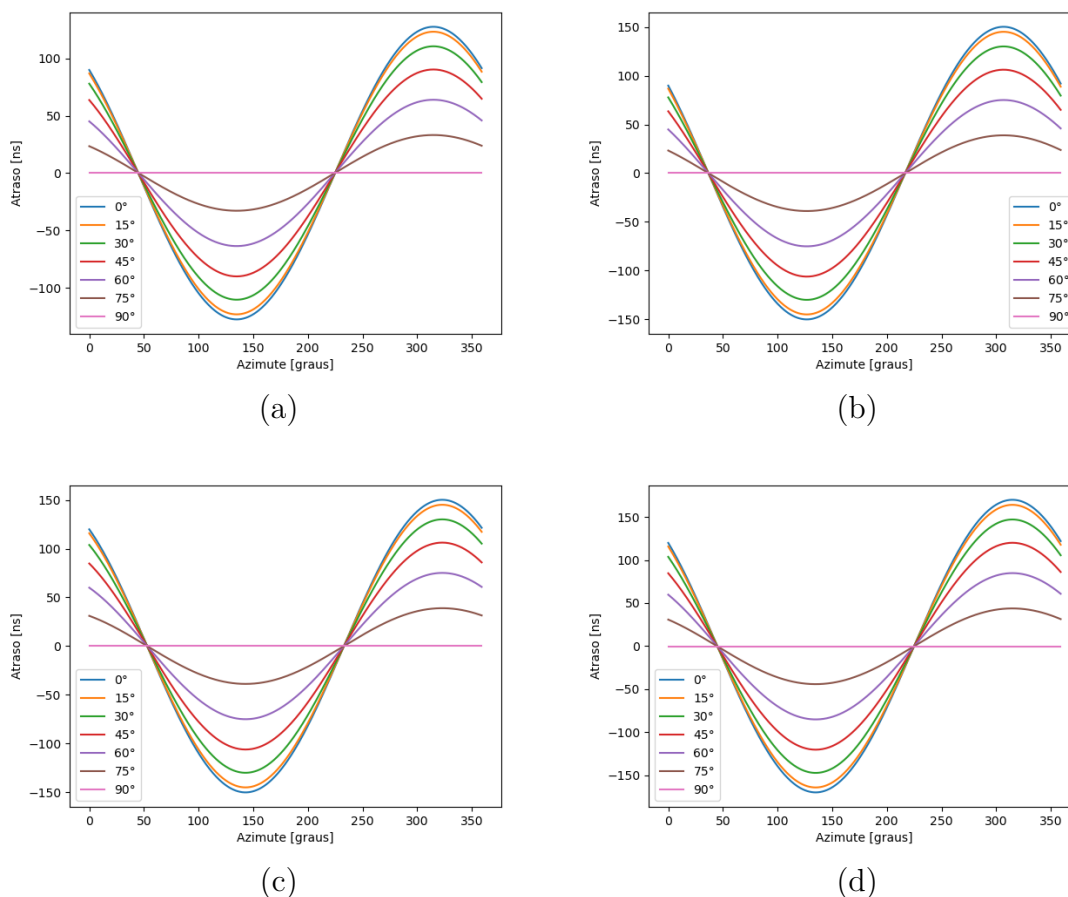
É importante ressaltar que são teóricos esses valores de azimute que implicam em atrasos geométricos nulos, e que variam a depender das imperfeições do arranjo, ou mesmo da eventual rotação deste em relação ao esperado de projeto. Os valores reais só podem ser determinados com observações reais de objetos celestes, realizando-se as calibrações necessárias.

Figura 4.10 - Atraso de fase geométrico entre as antenas 12 e 13.



Cada curva representa um valor diferente de elevação da fonte observada, para um intervalo de 0° a 360° de azimute.

Figura 4.11 - Atrasos geométricos entre as antenas 12, 13, 20 e 21 do arranjo.



Na figura são apresentados os atrasos geométricos entre as antenas 12, 13, 20, 21 do arranjo, variando-se a elevação de 0° a 90° com passo de 15° , representada em cores diferentes. Tem-se o atraso entre as antenas (a) 12 e 20, (b) 13 e 20, (c) 12 e 21, (d) 13 e 21.

Para uma linha de base do interferômetro, o atraso geométrico pode ser medido com o seguinte: toma-se o sinal de uma fonte calibradora em determinadas posições no céu; calcula-se o atraso por meio do *software* que foi criado; insere-se os sinais de cada antena no correlacionador ajustando-se o atraso calculado pelo *software* e; varia-se gradualmente e diferencialmente o valor do atraso de fase de uma antena, tomando-se outra como referencia, dentro do correlacionador até que se obtenha o maior valor da correlação. Desta forma, o atraso pelo *software* é o valor grosseiro do atraso, e o erro existente é determinado por meio da máxima correlação dos sinais de ambas as antenas no correlacionador.

Dependendo da diferença de altura entre as antenas, da posição da fonte no céu e da frequência de observação, pode existir uma diferença de fase bem significativa entre os dois atrasos de fase: calculado pelo *software* assumindo as antenas coplanares e considerando-se a diferença de alturas nos cálculos. Os atrasos geométricos obtidos devem ser usados no momento em que se combina os sinais de todas as antenas no correlacionador.

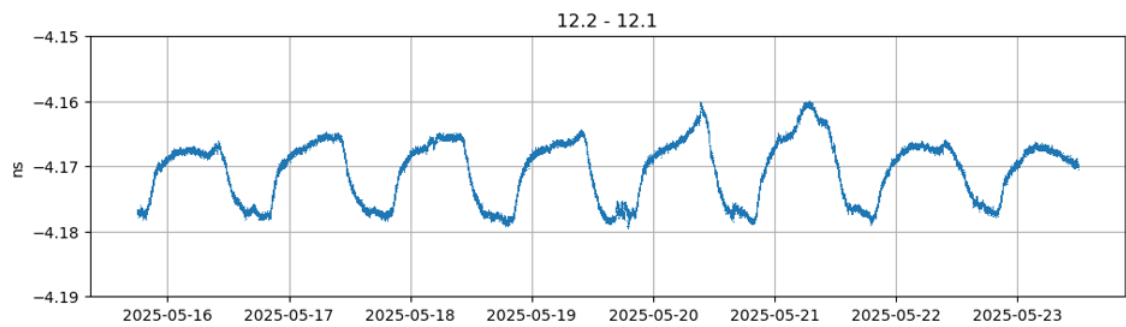
Além disso, a ligeira rotação do arranjo “T” em relação às direções leste-oeste e sul, bem como a diferença em altura entre as antenas do arranjo, fazem com que o atraso de fase nulo para as linhas de base não seja obtido na posição esperada teoricamente assumindo-se os posicionamentos exatos leste-oeste e sul das linhas de base do interferômetro.

4.3 Atraso instrumental

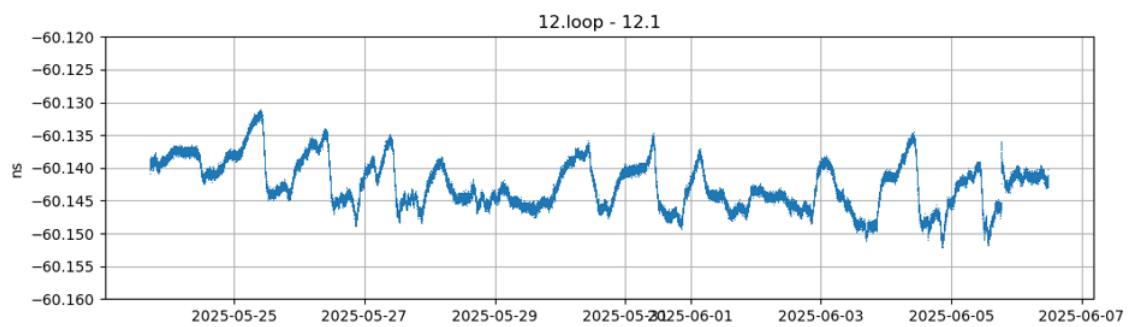
Com relação à componente instrumental, foram criados alguns métodos para o mapeamento, por meio de medições da evolução da componente de fase instrumental, da fração referente ao atraso nas fibras ópticas das antenas 12, 13, 20 e 21 do arranjo. As medições variaram de 3 a 14 dias, tanto para cada antena quanto para pares das antenas. De modo geral, os resultados obtidos mostraram claramente que esta fração do atraso de fase instrumental apresenta uma variação com padrão cíclico, ao longo do tempo com um período aproximado de 1 dia. O padrão observado difere de elemento para elemento. Com relação aos valores medidos, as amplitudes de variação observadas encontram-se na casa dos décimos a centésimos de nanossegundo.

Como as fibras ópticas dos receptores encontram-se em dutos pouco abaixo do nível do solo, em campo, as variações observadas devem estar associadas à variação das condições ambientes. E o fator responsável mais provável deve ser a variação de temperatura ambiente durante o mesmo período.

Figura 4.12 - Atrasos instrumentais na antena 12, na configuração normal e em *loop*.



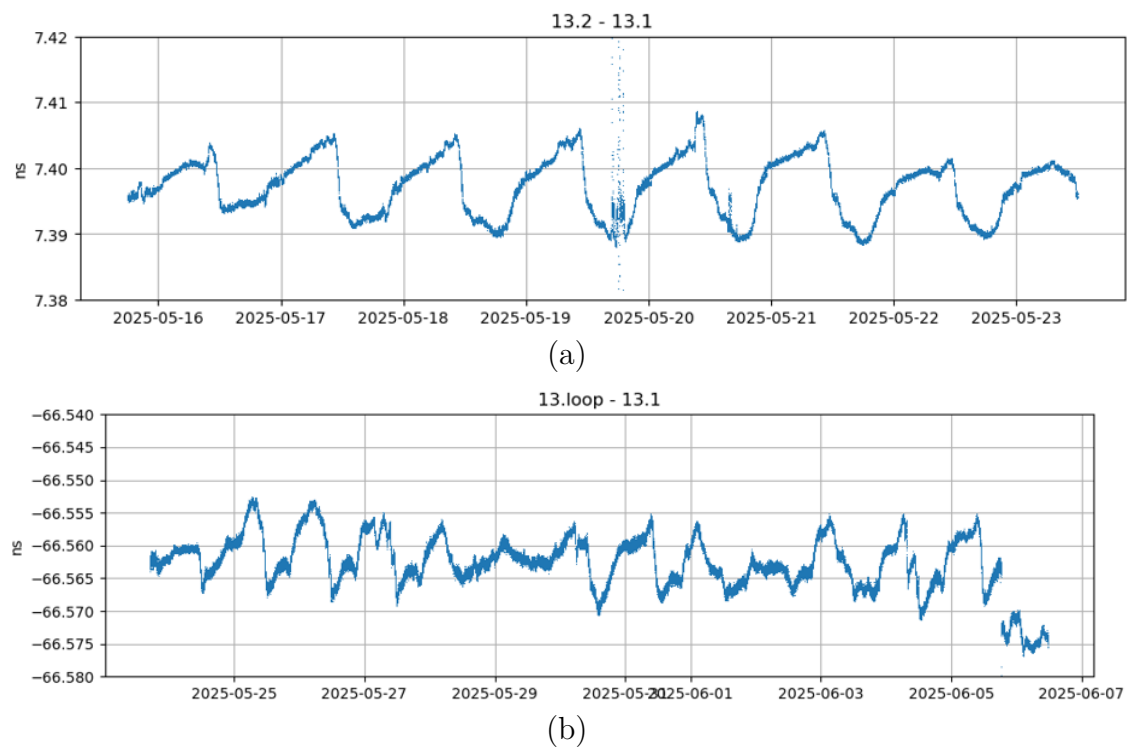
(a)



(b)

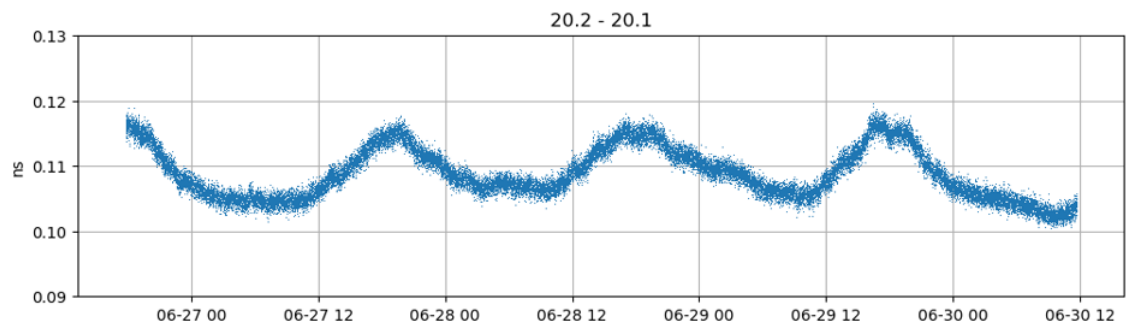
Na figura (a) é apresentado o atraso instrumental na configuração de teste com cabo coaxial e duas fibras ao longo de 7 dias. Em (b) tem-se o atraso instrumental na configuração de teste com *loop* ao longo de 14 dias. O eixo vertical está em nanossegundos e o horizontal em tempo no formato ano-mês-dias.

Figura 4.13 - Atrasos instrumentais na antena 13, na configuração normal e em *loop*.

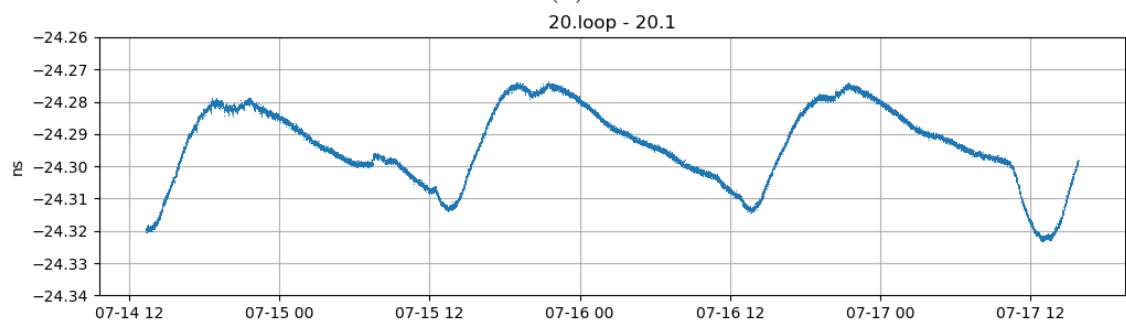


Na figura (a) é apresentado o atraso instrumental na configuração de teste com cabo coaxial e duas fibras ao longo de 7 dias. Em (b) tem-se o atraso instrumental na configuração de teste com *loop* ao longo de 14 dias. O eixo vertical está em nanossegundos e o horizontal em tempo no formato ano-mês-dias.

Figura 4.14 - Atrasos instrumentais na antena 20, na configuração normal e em *loop*.



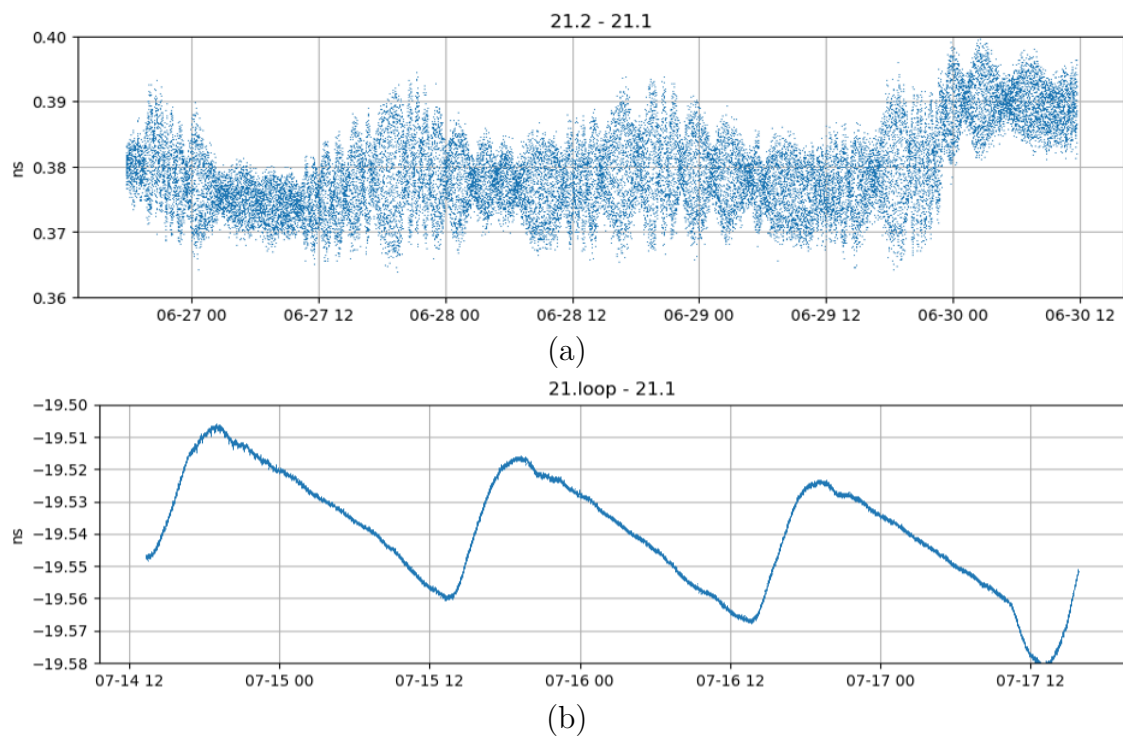
(a)



(b)

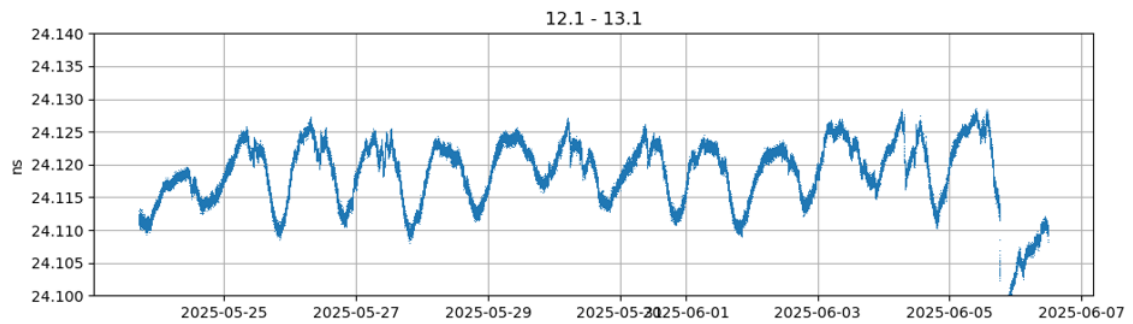
Na figura (a) é apresentado o atraso instrumental na configuração de teste com cabo coaxial e duas fibras ao longo de 4 dias, com marcações no eixo a cada 12 horas. Em (b) tem-se o atraso instrumental na configuração de teste com *loop* ao longo de 3 dias. O eixo vertical está em nanossegundos e o horizontal em tempo no formato mês-dia-hora, com 00 sendo meia noite e 12 sendo meio dia.

Figura 4.15 - Atrasos instrumentais na antena 21, na configuração normal e em *loop*.

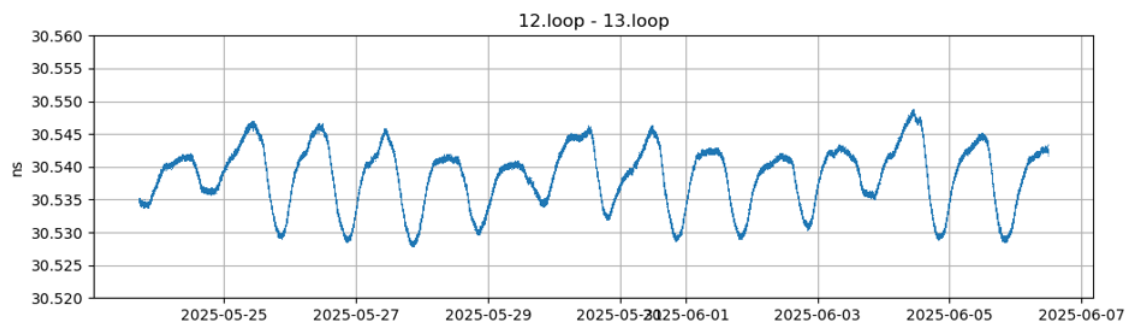


Na figura (a) é apresentado o atraso instrumental na configuração de teste com cabo coaxial e duas fibras ao longo de 4 dias, com sinal ruidoso mas senoidal. Em (b) tem-se o atraso instrumental na configuração de teste com *loop* ao longo de 3 dias. O eixo vertical está em nanossegundos e o horizontal em tempo no formato mês-dia-hora, com 00 sendo meia noite e 12 sendo meio dia.

Figura 4.16 - Atrasos instrumentais entre as antenas 12 e 13, na configuração normal e em *loop*.



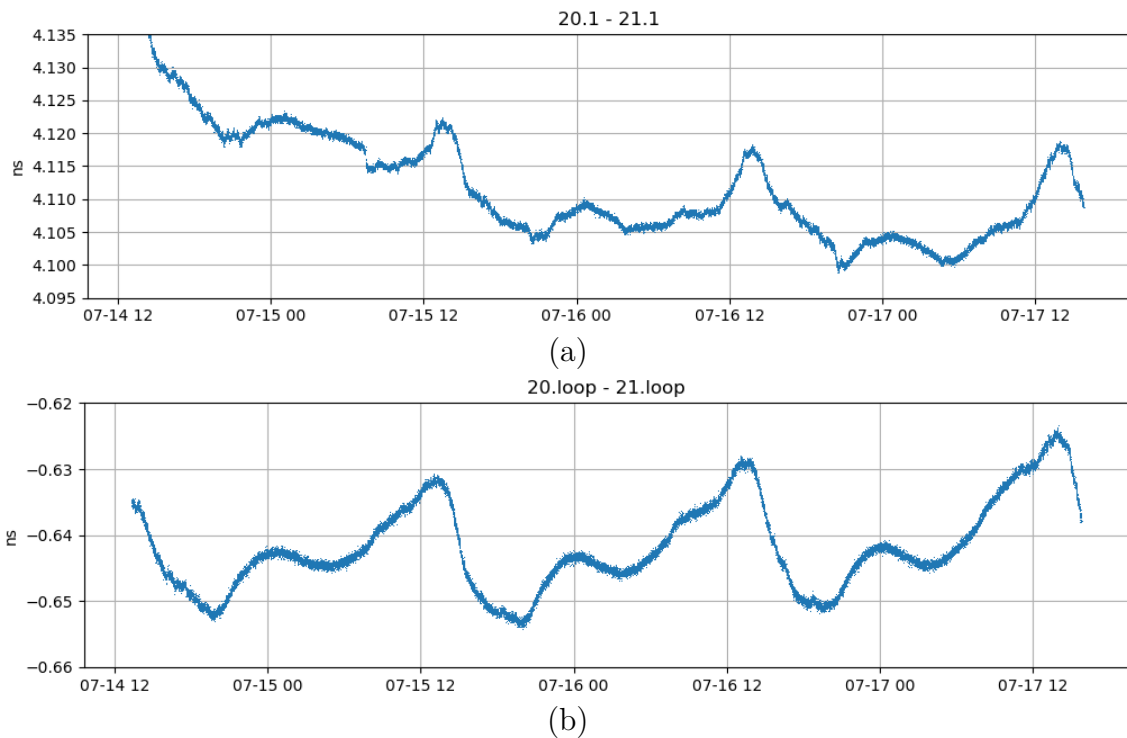
(a)



(b)

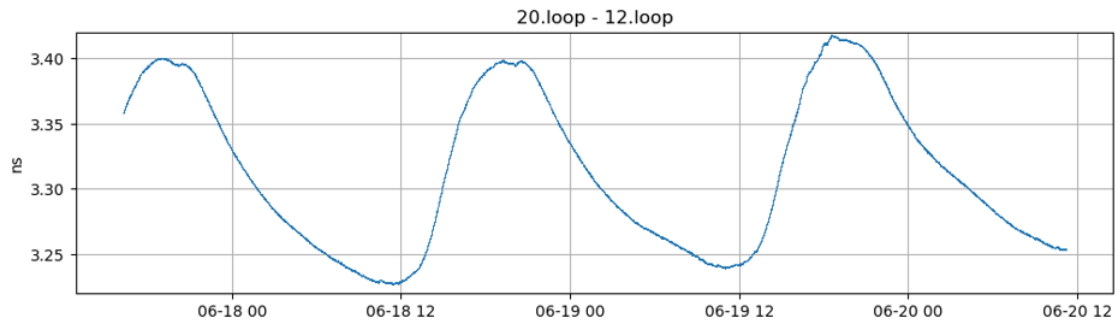
Na figura (a) é apresentado o atraso instrumental na configuração de teste com duas fibras, uma enviando o sinal e outra o retorno para sala de controle, ao longo de 14 dias. Em (b) tem-se o atraso instrumental entre as duas antenas na configuração de teste com *loop* ao longo de 14 dias. O eixo vertical está em nanossegundos e o horizontal em tempo no formato ano-mês-dia.

Figura 4.17 - Atrasos instrumentais entre as antenas 20 e 21, na configuração normal e em *loop*.



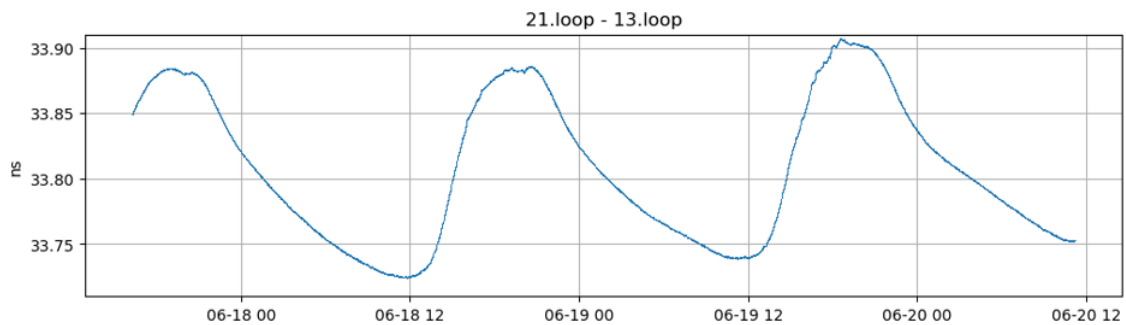
Na figura (a) é apresentado o atraso instrumental na configuração de teste com duas fibras, uma enviando o sinal e outra o retorno para sala de controle, ao longo de 3 dias. Em (b) tem-se o atraso instrumental entre as duas antenas na configuração de teste com *loop* ao longo de 3 dias. O eixo vertical está em nanossegundos e o horizontal em tempo no formato mês-dia-hora, com 00 sendo meia noite e 12 sendo meio dia.

Figura 4.18 - Atraso instrumental entre as antenas 20 e 12, ambas na configuração de *loop*.



O gráfico apresenta a variação do atraso instrumental entre as antenas 20 e 12 ao longo de 3 dias, comparando os sinais das fibras de *loop*. O eixo vertical está em nanossegundos e o horizontal em tempo no formato mês-dia-hora, com 00 sendo meia noite e 12 sendo meio dia.

Figura 4.19 - Atraso instrumental entre as antenas 21 e 13, ambas na configuração de *loop*.



O gráfico apresenta a variação do atraso instrumental entre as antenas 21 e 13 ao longo de 3 dias, comparando os sinais das fibras de *loop*. O eixo vertical está em nanossegundos e o horizontal em tempo no formato mês-dia-hora, com 00 sendo meia noite e 12 sendo meio dia.

Os resultados obtidos pelas medidas do atraso instrumental, através da metodologia criada, indicam que são robustos e confiáveis. Baseado nisto, pode-se usar a metodologia apresentada no desenvolvimento de um subsistema de monitoramento em tempo real da componente de fase instrumental dos sinais das antenas do arranjo. A partir do ajuste da componente de fase geométrica do arranjo, isto pode ser usado para complementar/refinar os resultados obtidos a partir das medidas/observações de fontes calibradoras e da fonte rádio de interesse, melhorando assim o processo

de calibração de fase do arranjo. Comparando-se os dois atrasos - obtido pela observação de fonte calibradora e pela metodologia de monitoramento da componente instrumental pode-se, por exemplo determinar as variações devido à atmosfera e algum outro sinal, como aquele devido a RFI.

Em relação às medidas realizadas, foram usadas 3 montagens distintas como comentado anteriormente. As medidas usando as montagens de duas fibras e em *loop* apresentaram diferenças como visto nos gráficos dos resultados. Essa diferença se refere ao percurso dos sinais em cada uma das montagens. No caso, da montagem em *loop*, o sinal se propaga pela fibra da sala do centro de controle no prédio até a antena e retorna pela fibra idêntica fusionada a ela, sem qualquer outro elemento no percurso. Por sua vez, no caso da montagem com duas fibras, o sinal também se propaga da sala do centro de controle até a antena por uma fibra. Mas, neste caso, tem um percurso totalmente distinto daquele da montagem em *loop*. Isto porque passa por: conversor opto-elétrico, cabeamento, receptor na antena, cabeamento e conversor eletro-óptico antes de retornar pela outra fibra. Por este motivo, sofre um atraso de fase adicional de seu sinal relativamente ao sinal da montagem em *loop*. Usando-se essa outra montagem foi possível se conhecer o atraso de fase adicional, no percurso distinto do sinal, produzido pelos elementos acrescentados na segunda montagem, relativamente à primeira.

Deve ser mencionado também que as medidas realizadas nas antenas 20 e 21 mostraram um ruído bem maior nos resultados das séries temporais obtidas na montagem de 2 fibras. Posteriormente, verificou-se que as fibras destas antenas não passaram por um processo prévio de limpeza e realinhamento da extremidade da fibras com o direcionamento do conversor de sinal, antes da realização das medidas. Portanto, apresentaram um ruído marcante durante a realização das medidas. Isto serviu para mostrar também a necessidade de se efetuar a limpeza e realinhamento das extremidades das fibras e dos conversores antes de sua utilização nas medidas e/ou observações.

O mais importante é que a metodologia criada para realizar essas medições vai permitir o desenvolvimento de um subsistema de monitoramento dessa fração do atraso de fase instrumental - nas fibras ópticas - em tempo real para todos os pares de antenas. O passo seguinte será fazer o mapeamento da outra fração da cadeia receptora de cada antena, desde o alimentador até a entrada do correlacionador. Nesta fração estão incluídos: o pré-amplificador LNA, misturadores, oscilador local de referência, amplificadores de FI, filtros e etc.

Os vários fatores que podem causar instabilidades nesta fração vão desde variações na tensão da rede de alimentação, variações de ganho de componentes, instabilidades de fase e referência de frequência, desvio do casamento de impedância em pontos da cadeia receptora, bem como diferenças de componentes, erro de apontamento e percurso do sinal em antenas distintas. Os resultados obtidos, da caracterização das componentes de atraso de fase do interferômetro BDA, vão permitir que sejam realizados os ajustes do atraso de fase necessários, entre elementos do arranjo, para garantir a qualidade dos dados interferométricos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal a caracterização dos atrasos de fase geométrico e instrumental do interferômetro rádio BDA, atualmente em desenvolvimento no INPE, além do desenvolvimento de ferramentas para atingir esse objetivo. A correta compensação desses atrasos é essencial para garantir a coerência de fase dos sinais recebidos pelas antenas e, conseqüentemente, o funcionamento adequado do correlacionador de sinais e do instrumento como um todo.

Para o atraso geométrico, foi desenvolvida uma metodologia baseada em medições GNSS de alta precisão, conversão de coordenadas para um sistema local e aplicação de um *software* de cálculo em Python para o cálculo dos atrasos de fase. Essa abordagem permitiu calcular, com alta confiabilidade, os atrasos entre diferentes pares de antenas em função da posição da fonte no céu. Os resultados mostraram-se coerentes com a geometria do arranjo e podem ser aplicados em tempo real durante observações astronômicas de fontes rádio reais.

Quanto ao atraso instrumental, foram realizadas medições práticas utilizando sinais de teste em condições normais e de *loopback*, avaliando as diferenças de fase entre as antenas. No entanto, trata-se da caracterização somente da parte correspondente à propagação dos sinais nas fibras ópticas do receptor de cada antena. A outra componente, correspondente aos elementos eletrônicos do sistema receptor - cabos, amplificadores, filtros, misturadores e etc - também deverá ser caracterizada em trabalhos futuros.

As análises mostraram que a fase nas fibras de todos os elementos do arranjo avaliados varia de forma cíclica com um período de aproximadamente um dia, e com uma amplitude de variação de décimos a centésimos de nanossegundo. É muito provável que a causa da variação observada esteja relacionada à variação da temperatura ambiente ao longo do mesmo período. Mas, a variação apresenta um padrão distinto de elemento para elemento, o que reforça a importância da calibração individual de cada elemento do arranjo. Esses resultados são fundamentais para futuras rotinas de calibração a serem aplicadas durante a observação de fontes rádio reais.

A caracterização realizada nesta dissertação representa um passo importante no desenvolvimento do BDA, pois gerou subsídios para a implementação de um subsistema de monitoramento da componente instrumental dos atrasos operando em tempo real, durante as sessões de observações. Isto vai permitir o aprimoramento do ajuste dos atrasos de fase e garantir maior robustez nos resultados das observações

interferométricas do BDA. Os métodos apresentados são reprodutíveis e podem ser adaptados para futuras expansões do arranjo ou alterações nas faixas de frequência.

Como trabalhos futuros, recomenda-se:

- A expansão das medições para todas antenas do BDA;
- A integração do *software* de cálculo dos atrasos de fase ao interferômetro;
- A realização de testes com fontes astronômicas reais para validação completa do sistema.

Acredita-se que os resultados obtidos devem contribuir significativamente para o uso do BDA no estudo de fenômenos solares energéticos, além de possibilitarem a investigação de alguns objetos galácticos e extra-galácticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMA OBSERVATORY. **ALMA array by the "Wings of Science"**. s.d. Disponível em <<https://www.almaobservatory.org/en/alma-from-above-ground-2/>>. Acesso em 12 nov. 2024. 23
- ANATEL. **Plano de atribuição, destinação e distribuição de frequências no Brasil**. [S.l.], 2020. 32
- ASIF, M.; GUO, X.; ZHANG, J.; MIAO, J. An fpga based 1.6 ghz cross-correlator for synthetic aperture interferometric radiometer. In: PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMPOSIUM-FALL, 2017. **Proceedings...** Singapore: IEEE, 2017. p. 1078–1085. 28
- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. [S.l.]: John wiley & sons, 2015. 23
- BENZ, A. O. Flare observations. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 14, n. 2, p. 1–59, 2017. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3>>>. 1
- BOREMAN, G. D. **Modulation transfer function in optical and electro-optical systems**. [S.l.]: SPIE Press Bellingham, Washington, 2001. 19
- BURKE, B. F.; GRAHAM-SMITH, F. **An introduction to radio astronomy**. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 8, 9, 11, 12
- CHENGALUR, J. N.; GUPTA, Y.; DWARKANATH, K. **Low frequency radio astronomy**. [S.l.]: National Centre for Radio Astrophysics, 2009. 7
- CHRISTIANSEN, W. N.; HÖGBOM, J. A. **Radiotelescopes**. [S.l.]: CUP Archive, 1987. 9
- CONDON, J. J.; RANSOM, S. M. **Essential radio astronomy**. [S.l.]: Princeton University Press, 2016. 7, 25, 26, 27
- ELLINGSON, S. W. Sensitivity of antenna arrays for long-wavelength radio astronomy. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 59, n. 6, p. 1855–1863, 2011. 8
- HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas de comunicação-5**. [S.l.]: Bookman, 2011. 13, 14
- KAPINCHEV, K.; BRADU, A.; BARNES, F.; PODOLEANU, A. Gpu implementation of cross-correlation for image generation in real time. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING AND COMMUNICATION SYSTEMS, 9. **Proceedings...** [S.l.], 2015. p. 1–6. 12
- KRAUS, J. D.; TIURI, M.; RÄISÄNEN, A. V.; CARR, T. D. **Radio astronomy**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1966. 8, 9, 10, 11, 14, 15

- MAAS, S. Armstrong and the superheterodyne: a historical look at the mixer. **IEEE Microwave Magazine**, v. 14, n. 6, p. 34–39, 2013. 13, 14
- MACHADO, T. C.; SOUZA, K. L.; STRAUSS, C.; ABELHA, M. C.; CECATTO, J. Upgrade of frequency synthesis circuit of BDA. **Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira**, v. 34, 2022. 31
- MILLER, D. F. **Basics of Radio Astronomy**. [S.l.]: Jet Propulsion Laboratory, 1998. 5
- NRAO. **VLA background 6**. s.d. Disponível em <<https://public.nrao.edu/gallery/vla-background-6/>>. Acesso em 12 nov. 2024. 22
- OLIVEIRA, D. M.; ZESTA, E. Satellite orbital drag during magnetic storms. **Space Weather**, v. 17, n. 11, p. 1510–1533, 2019. 1
- PERLEY, R. A.; SCHWAB, F. R.; BRIDLE, A. H. **Synthesis imaging in radio astronomy: a collection of lectures from the third NRAO synthesis imaging summer school**. [S.l.: s.n.], 1989. 24, 28
- RAMESH, R.; RAJAN, M.; SASTRY, C. V. The 1024 channel digital correlator receiver of the gauribidanur radioheliograph. **Experimental Astronomy**, v. 21, n. 1, p. 31–40, 2006. 29
- REDMOND, K. **At Green Bank Observatory in West Virginia, life is radio silent — by design**. 11 jan. 2024. Disponível em <<https://www.aps.org/apsnews/2024/01/green-bank-observatory-radio-silent>>. Acesso em 18 nov. 2024. 16
- SAWANT, H.; SUBRAMANIAN, K.; LÜDKE, E.; SOBRAL, J.; SWARUP, G.; FERNANDES, F.; ROSA, R.; GONZALEZ, W.; CECATTO, J. Brazilian decimetric array. **Advances in Space Research**, v. 25, n. 9, p. 1809–1812, 2000. 3, 30
- SCHUH, H.; BEHREND, D. Vlbi: A fascinating technique for geodesy and astrometry. **Journal of Geodynamics**, v. 61, p. 68–80, 2012. 1
- STRAUSS, C.; CECATTO, J.; MACHADO, T. C.; SOUZA, K. L.; ABELHA, M. C. Projeto de correlacionador para o interferômetro BDA. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE ASTRONÔMICA BRASILEIRA, 45, 2022. **Anais...** [S.l.], 2022. 36, 37, 38, 39
- SUBIRANA, J. S.; ZORNOZA, J. J.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M. **Transformations between ECEF and ENU coordinates**. 2011. Disponível em: <<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformations_between_ECEF_and_ENU_coordinates>>. 42
- TAYLOR, G.; CARILLI, C.; PERLEY, R. Synthesis imaging in radio astronomy ii asp conferenc series. **Astronomical Society of the Pacific**, v. 180, p. 127–149, 1999. 2, 7, 19, 20, 21, 24, 26, 27

The CASA Team et al. Casa, the common astronomy software applications for radio astronomy. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 134, n. 1145, p. 114501, 2022. [37](#)

THOMPSON, A. R.; MORAN, J. M.; SWENSON, G. W. J. **Interferometry and synthesis in radio astronomy**. 3. ed. Cham: Springer, 2017. [1](#), [7](#), [9](#), [10](#), [11](#), [12](#), [15](#), [16](#), [19](#), [21](#), [22](#), [26](#), [27](#)

WILSON, T. L.; ROHLFS, K.; HÜTTEMEISTER, S. **Tools of radio astronomy**. 6. ed. Cham: Springer, 2013. [7](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#), [12](#)

APÊNDICE A - CÓDIGOS DESENVOLVIDOS PARA CÁLCULO DOS ATRASOS DE FASE

A.1 Cálculo do atraso geométrico

Código A.1 - Cálculo do atraso geométrico

```
1 import numpy as np
2 import csv
3 import math
4 from math import cos
5 from math import sin
6 import matplotlib.pyplot as plt
7
8 #Abre o arquivo com os dados coletados por GNSS da posicao
   das antenas
9 f = open("antenas_rotacionadas.csv")
10
11 csv_reader = csv.reader(f)
12 dados = []
13 for line in csv_reader:
14     dados.append(line)
15 f.close()
16
17 #Parametros
18 X = 0
19 Y = 1
20 Z = 2
21
22 x = []
23 y = []
24 z = []
25 for i in range(0,26):
26     x.append(float(dados[i][X]))
27     y.append(float(dados[i][Y]))
28     z.append(float(dados[i][Z]))
29
30 def atrasoGeo(A,B,azimute,elevacao):
31     bas = []
32     bas.append(x[A-1] - x[B-1])
33     bas.append(y[A-1] - y[B-1])
```

```

34     bas.append(z[A-1] - z[B-1])
35     baseline = np.array(bas)
36
37     az = -np.deg2rad(azimute)
38     el = np.deg2rad(elevacao)
39
40     Rx = np.array([[1, 0, 0],
41                   [0, cos(el), -sin(el)],
42                   [0, sin(el), cos(el)]])
43
44     Rz = np.array([[cos(az), -sin(az), 0],
45                   [sin(az), cos(az), 0],
46                   [0, 0, 1]])
47
48     vetor_diretor = Rz.dot(Rx.dot([0, 1, 0]))
49
50     proj = []
51     proj.append(np.matmul(baseline, vetor_diretor))
52     projecao = np.array(proj)
53
54     return (projecao/3e8)*1e9

```

A.2 Cálculo do atraso instrumental

Código A.2 - Cálculo do atraso geométrico

```

1  import numpy as np
2
3  def inst_delay(t, CH1, CH2, freq=70e6):
4
5      nmean = 100000
6
7      A1 = CH1
8      A2 = CH2
9
10     B1 = A1*np.exp(-1j*2*np.pi*freq*t)
11     B2 = A2*np.exp(-1j*2*np.pi*freq*t)
12
13     B1_res = np.reshape(B1, newshape = (-1, nmean))
14     C1 = np.mean(B1_res, axis = 1)
15

```

```
16     B2_res = np.reshape(B2, newshape = (-1, nmean))
17     C2 = np.mean(B2_res, axis = 1)
18
19     D = C1*C2.conj()
20
21     Dm = np.mean(D)
22     fase = np.rad2deg(np.angle(Dm))
23     v1 = np.mean(C1.real**2 + C1.imag**2)
24     v2 = np.mean(C2.real**2 + C2.imag**2)
25     amplitude = np.abs(Dm)/np.sqrt(v1*v2)
26     return fase, amplitude
```


PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.