



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16581-TDI/1570

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE IMAGEAMENTO DO
PROTÓTIPO DO BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY
(PBDA)**

Jorge Fernando Valle Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Astrofísica, orientada
pelo Dr. Hanumant Shankar Sawant, aprovada em 27 de fevereiro de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.27.18.34>>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:**Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16581-TDI/1570

**ESTUDO DA CAPACIDADE DE IMAGEAMENTO DO
PROTÓTIPO DO BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY
(PBDA)**

Jorge Fernando Valle Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Astrofísica, orientada
pelo Dr. Hanumant Shankar Sawant, aprovada em 27 de fevereiro de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.27.18.34>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Jorge Fernando Valle.
Si38es Estudo da capacidade de imageamento do protótipo do Brazilian Decimetric Array (PBDA) / Jorge Fernando Valle Silva. – São José dos Campos : INPE, 2009.
84 p. ; (INPE-16581-TDI/1570)

Dissertação (Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientador : Dr. Hanumant Shankar Sawant.

1. Arranjo Decimétrico Brasileiro (BDA). 2. Interferometria.
3. Sol calmo. 4. Correlacionador 1 bit. 5. Síntese de abertura. I.Título.

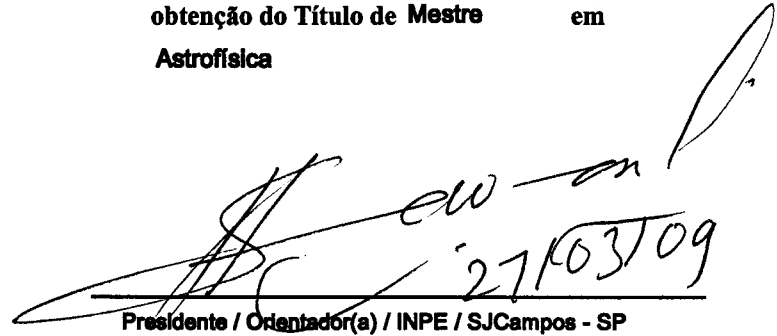
CDU 523.7

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

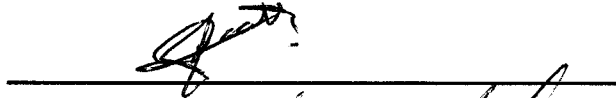
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Astrofísica

Dr. Hanumant Shankar Sawant

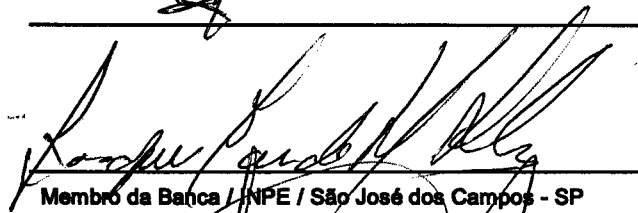


27/03/09
Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Roberto Cecatto

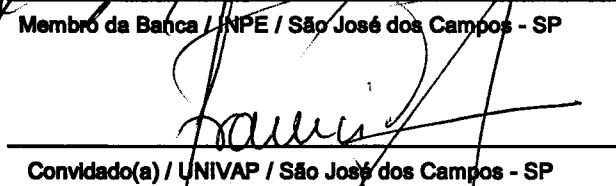


Dr. Joaquim Eduardo Rezende Costa




Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes



Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Dr. Claudio Faria



Convidado(a) / PUC/ MG / Poços de Caldas - MG

Aluno (a): Jorge Fernando Valle Silva

São José dos Campos, 27 de fevereiro de 2009

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao Dr. Hanumant S. Sawant e aos outros membros do grupo de Física do Meio Interplanetário: Conceição Elaine, Cecatto, Guga, Felipe, Luiz César e Khristhiano, porque me fizeram sentir como um membro a mais do grupo.

Aos membros da banca examinadora pelas sugestões feitas para melhorar a dissertação.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida, sem a qual teria sido impossível fazer este trabalho.

À SSRT pelas imagens rádio do Sol.

Aos amigos, colegas, professores e todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão da presente dissertação.

RESUMO

O protótipo do Arranjo Decimétrico Brasileiro - BDA, é um arranjo unidimensional Leste-Oeste de 5 antenas de 4 m de diâmetro, com linhas de base de 18 a 216 m, operando na faixa de frequências 1,2 – 1,7 GHz, com resolução temporal de ~ 105 ms e tem produzido desde o início das operações e de forma regular, franjas de visibilidade em seus 10 pares de correlação. Nesta dissertação foram estudadas, mediante simulações de mapas unidimensionais, as capacidades máximas em resolução espacial e resposta dinâmica do arranjo. Também foram revisados os procedimentos de calibração de amplitude e calibração de fase usados na elaboração dos mapas, e foram encontradas serias limitações de ordem teórica e operacional nestes procedimentos. Os dados processados são de observações de trânsito meridiano do Sol, *Cygnus A* e *Taurus A*, obtidos na segunda metade do ano 2007. As visibilidades das fontes mostram anomalias que poderiam ser atribuídas principalmente à pobre calibração instrumental do correlacionador digital e os mapas do Sol assim construídos não recuperam as características básicas que seriam obtidas com o arranjo operando sob ótimas condições de calibração.

STUDY OF THE IMAGING CAPABILITY OF THE PROTOTYPE OF BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY

ABSTRACT

The prototype of the Brazilian Decimetric Array - BDA, is a one-dimensional East-West array, with 5 antennas of 4 m in diameter, with baselines ranging from 18 to 216 m, operating frequencies 1,2 – 1,7 GHz and temporal resolution of ~ 105 ms. The array has produced since the beginning of operations and on a regular basis, fringe visibilities in its 10 pairs of correlation. This dissertation shows a simulation of one-dimensional maps, as a theoretical analysis of the maximum capacity in spatial resolution and dynamic range of the instrument. Were also reviewed the procedures for calibration of amplitude and phase used in mapping, were found serious theoretical and instrumental limitations in these procedures. The processed data were observations of meridian transit of the Sun, *Cygnus A* and *Taurus A* of the second half of the year 2007. The visibility of the sources show abnormalities that that could in principle be caused by poor calibration of the 1-bit correlator and related maps of the Sun, do not retrieve the basic features that would be obtained operating under the best conditions for calibration.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Rádio Telescópios	19
1.1.1 Área Efetiva	19
1.1.2 Polarização da Antena	20
1.1.3 Padrão de Radiação de Antena	21
1.2 Síntese de Abertura	22
1.3 Observação Solar	23
1.3.1 Emissão rádio de Sol Calmo	23
1.3.2 Emissão de variação lenta ou quiescente	24
1.3.3 Explosões Solares	25
1.4 Descrição da Dissertação	26
2 TELESCÓPIOS DE CORRELAÇÃO E SIMULAÇÃO DE MAPAS .	27
2.1 Telescópios de Correlação	27
2.1.1 Potência Correlacionada Disponível e Área Efetiva	28
2.1.2 Temperatura de Brilho e Temperatura de Antena	28
2.1.3 Transformada Discreta de Fourier e Transformada Rápida de Fourier	30
2.1.4 Direções Independentes no Mapa	32
2.2 Mapas Simulados do PBDA	33
2.2.1 Os Mapas do SRRT	33
2.2.2 Espectros de Fase e Amplitude	37
2.2.3 Degradação da Resposta Dinâmica	41
3 O PROTÓTIPO DO ARRANJO DECIMÉTRICO BRASILEIRO . .	49
3.1 O Arranjo Decimétrico Brasileiro	49
3.2 Características Básicas e Configuração do Arranjo	49
3.2.1 A Eletrônica do <i>Front End</i>	50
3.2.2 Pares interferométricos e Linhas de Base	51

3.3	Correlacionador do PBDA	52
3.3.1	Canais de Correlação	52
3.3.2	<i>Software</i> do Correlacionador	53
3.3.3	Testes e Avaliação do Correlacionador	56
4	OBSERVAÇÕES, CALIBRAÇÃO E ELABORAÇÃO DOS MAPAS .	57
4.1	Observações	57
4.2	Procedimento observacional	57
4.3	Processamento de dados	59
4.3.1	Calibração da Visibilidade	59
4.3.2	Calibração de Amplitude	59
4.3.3	Calibração de Fase	63
4.3.4	Mapas	66
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	69
5.1	Conclusões	69
5.2	Sugestões	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
A	APÊNDICE A - PROCESSAMENTO DE DADOS DO PBDA	75
B	APÊNDICE B - CORREÇÃO DE FASE E AMPLITUDE	81

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Sistema coordenado usado nesta dissertação	20
1.2 Diagrama de emissão de fontes astronômicas	22
2.1 Disposição dos coeficientes de correlação e as direções independentes num mapa unidimensional de temperatura de brilho usados neste trabalho.	31
2.2 Forma habitual do espectro de frequências com índices ou frequências negativas	31
2.3 Disposição dos coeficientes hermitianos para uma configuração de $N = 2^3$ direções independentes num mapa unidimensional de temperatura de brilho.	32
2.4 Mapa de contorno do disco solar completo obtido com o SSRT na frequência $5,7 GHz$	34
2.5 Perfis unidimensionais do mapa SSRT da Figura 2.4.	34
2.6 Mapa unidimensional depois da integração em declinação.	35
2.7 Mapa unidimensional depois da convolução com um feixe gaussiano de $2,6'$	35
2.8 Mapa unidimensional pós-integração horizontal.	36
2.9 Distribuição dos coeficientes de correlação no espaço de frequências espaciais.	38
2.10 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de Sol calmo.	39
2.11 Espectro de fases da simulação de Sol calmo.	40
2.12 Mapas reconstruídos da simulação das imagens do SSRT.	41
2.13 Mapa de contorno do disco solar no dia 02 maio de 2007.	42
2.14 Perfis unidimensionais do mapa SSRT original do dia 02 de Maio de 2007.	42
2.15 Mapa unidimensional do dia 02 de Maio de 2007 depois da integração vertical.	43
2.16 Mapa unidimensional do dia 02 de Maio de 2007 depois da convolução com um feixe gaussiano de $2,6'$	43
2.17 Mapas reconstruídos da simulação das imagens do SSRT no dia 02 de Maio de 2007.	44
2.18 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação para o dia 02 de maio de 2007.	45
2.19 Espectro de fases da simulação para o dia 02 de Maio de 2007.	46
3.1 Localização realtiva das antenas e as correspondentes linhas base no PBDA	50
3.2 Diagrama funcional de um chip de correlação	54
3.3 Conexão na entrada do correlacionador usada durante as observações	54
3.4 Diagrama dos chips Nobeyama no correlacionador PBDA	55
4.1 Espectro de amplitudes de visibilidade do Sol no dia 21 de setembro de 2007	61

4.2	Espectro de amplitudes de visibilidade de <i>Cygnus A</i> no dia 21 de setembro de 2007	61
4.3	Espectro de amplitudes de visibilidade do modelo de fonte pontual	62
4.4	Espectro de amplitudes do Sol no dia 21 de setembro depois da calibração	62
4.5	Espectro de amplitudes do Sol no dia 03 de setembro depois da calibração	63
4.6	Mapa simulado do Sol submetido a correção <i>closure phase</i>	65
4.7	Mapa do Sol do dia 03 de maio de 2007 obtido com o PBDA	66
4.8	Mapa do Sol do dia 19 de junho de 2007 obtido com o PBDA	67
4.9	Mapa do Sol do dia 20 de julho de 2007 obtido com o PBDA	67
4.10	Mapa do Sol do dia 20 de agosto de 2007 obtido com o PBDA	68
4.11	Mapa do Sol do dia 20 de setembro de 2007 obtido com o PBDA	68

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Posição das linhas de base no espectro de frequências espaciais.	37
2.2 Posição das linhas de base no espectro de frequências espaciais (cont.)	37
2.3 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de Sol calmo	39
2.4 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de Sol calmo (cont.)	39
2.5 Espectro de fases de visibilidade da simulação de Sol calmo	40
2.6 Espectro de fases de visibilidade da simulação de Sol calmo (cont.)	40
2.7 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007	45
2.8 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007 (cont.)	45
2.9 Espectro de fases de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007	46
2.10 Espectro de fases de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007 (cont.)	46
3.1 Pares interferométricos formados com o PBDA	51
3.2 Pares interferométricos formados com o PBDA (cont.)	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AH	–	Ângulo Horário
BDA	–	Arranjo decimétrico brasileiro por Brazilian Decimetric Array
CME	–	Ejeção de massa coronal por Coronal Mass Ejection
DFT	–	Transformada discreta de Fourier por Discrete Fourier Transform
FFT	–	Transformada rápida de Fourier por Fast Fourier Transform
IF	–	Frequência intermedia por Intermediate Frequency
IIA	–	Indian Institute of Astrophysics
LSB	–	Bit menos significativo por Least Significant Bit
LNA	–	Amplificador de baixo ruído por Low Noise Amplifier
LO	–	Oscilador local por Local Oscillator
MSB	–	Bit mais significativo por Most Significant Bit
NRH	–	Nançay Radio Heliograph
NoRH	–	Nobeyama Radio Heliograph
PBDA	–	Protótipo do BDA
RF	–	Frequência de rádio por Radio Frequency
SSRT	–	Siberian Solar Radio Telescope
VSWR	–	Razão de voltagens de onda estacionária por Voltage Standing Wave Ratio

1 INTRODUÇÃO

1.1 Rádio Telescópios

A teoria de radio telescópios está baseada na teoria electromagnética, a teoria da difração óptica e a teoria das antenas de radio (Christiansen; Hogbom, 1985). Nesta primeira parte são descritos brevemente os conceitos relacionados com o funcionamento dos radio telescópios de potência total.

1.1.1 Área Efetiva

Os rádio telescópios de potência total são instrumentos que filtram e detectam a emissão radio das fontes astronômicas, isso quer dizer que são instrumentos desenhados para detectar o fluxo de energia por unidade de intervalo de frequência ($Wm^{-2}Hz^{-1}$), chamada também de *densidade de fluxo* S , emitida pelos corpos celestes. A *potência por unidade de frequência* p (WHz^{-1}), disponível nos terminais da antena é proporcional à densidade de fluxo S , e a constante de proporcionalidade é chamada de *área efetiva* A ,

$$p = A \cdot S \tag{1.1}$$

A área efetiva, expressa em unidades de área (m^2), é uma medida da eficiência do telescópio para absorver radiação, de uma direção particular do céu, a uma frequência específica. A potência verdadeira medida em *watts* pelo receptor será proporcional à *largura de banda* $\Delta\nu$ (Hz) na qual é feita a medição. A largura de banda é um parâmetro instrumental, geralmente fixo pelo sistema antena-receptor. Assim, num telescópio com largura de banda $\Delta\nu$, onde todos os outros parâmetros podem ser considerados constantes, a potencia real ou verdadeira w , disponível nos terminais da antena é,

$$w = p \cdot \Delta\nu = A \cdot S \cdot \Delta\nu \tag{1.2}$$

Se a antena transmite sem perdas ao receptor, toda a energia que é capturada na superfície da antena, a área efetiva será igual a área geométrica do telescópio. Na pratica, a área efetiva na direção de máxima resposta A_{max} , se aproxima da magnitude da área geométrica, e é sempre menor nas outras direções. Para indicar que a área efetiva depende da direção de chegada (l, m) das ondas, se costuma escrever como $A(l, m)$. O padrão de potência da antena, $P(l, m)$, é a área efetiva normalizada à unidade na direção de máxima resposta,

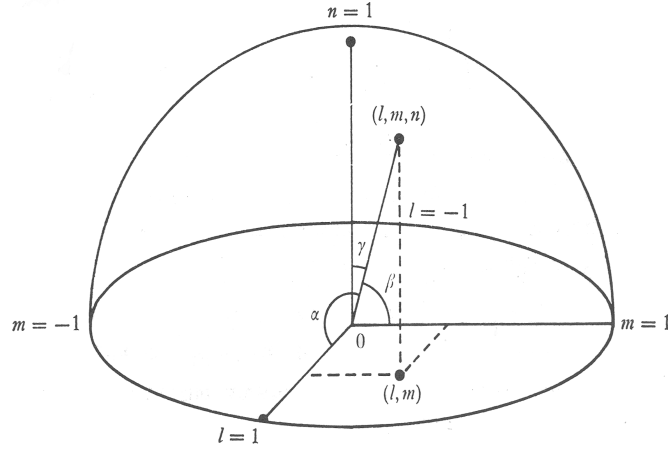


Figura 1.1 - Sistema coordenado usado nesta dissertação. A direção está especificada pelos cossenos diretores l, m, n , i.e. $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$. Qualquer direção no hemisfério celeste pode-se representar por um ponto na esfera unitária ou sua projeção no plano l, m . Tomado de [Christiansen e Hogbom \(1985\)](#).

$$P(l, m) = A(l, m)/A_{max} \quad (1.3)$$

A geometria da antena pode ser descrita em termos de um sistema cartesiano xyz , estando a abertura do telescópio diretamente relacionada com o plano xy . As direções no espaço se indicam usando os cossenos diretores (l, m, n) , definidos em relação aos eixos (x, y, z) . Alternativamente, as direções poderiam ser definidas em termos das coordenadas rectangulares (l, m, n) de um ponto sobre a esfera celeste de raio unitário, Fig. 1.1. Como l, m, n estão relacionados por $l^2 + m^2 + n^2 = 1$, é suficiente usar só as coordenadas (l, m) , assim cada ponto do hemisfério celeste possui uma projeção no plano lm . O ângulo sólido diferencial $d\Omega$ na direção (l, m) se projeta no plano lm como,

$$d\Omega = \frac{dldm}{\cos \gamma} = \frac{dldm}{(1 - l^2 - m^2)^{1/2}} \quad (1.4)$$

1.1.2 Polarização da Antena

A radiação eletromagnética é formada de ondas transversais e o vetor de campo está confinado a um plano paralelo à frente de onda. Isso significa que o campo de ondas têm dois graus de liberdade ou componentes de polarização, e portanto são necessários duas voltagens independentes para coletar toda a informação contida na onda. Uma antena

com só uma saída de voltagem, é sensível à radiação de uma componente de polarização particular, chamada componente acoplada S_a , e independe completamente de outra componente de polarização, chamada componente complementar S_c .

A densidade de fluxo total de uma fonte é a soma da componente acoplada e a componente complementar, mas só a primeira contribui à potência disponível nos terminais da antena. É claro que a definição de área efetiva, e as que desta se derivam, devem ser reformuladas em termos da potência acoplada,

$$p = A \cdot S_a \quad (1.5)$$

Quando a radiação natural do espaço possui uma direção preferencial, isto é, uma componente polarizada não aleatória, o procedimento correto para obter a densidade de fluxo total S , é medir em separado as duas componentes de polarização. Na maior parte dos casos, a emissão radio das fontes astronômicas é incoerente com propriedades estatísticas que não são diferentes do ruído gerado no receptor ou da radiação de fundo recebida ao mesmo tempo pela antena. Isso significa que a radiação é aleatoriamente polarizada e a componente acoplada do fluxo em termos do fluxo total, S , é

$$S_a = S_c = \frac{1}{2}S \quad (1.6)$$

A Figura 1.2 mostra a variação da densidade de fluxo de diferentes fontes astronômicas entre 10 MHz e 10 GHz . A emissão de Sol ativo domina sobre todas as outras emissões, em quase todo o espectro. Em seguida, as maiores emissões são a emissão do Sol calmo nas frequências altas e a emissão do centro galáctico nas frequências menores. Nas frequências em torno de 1 GHz a emissão de Sol calmo alcança até ~ 1000 vezes a emissão de Cygnus A.

1.1.3 Padrão de Radiação de Antena

O padrão de radiação ou padrão de campo $F(l, m)$, é uma função complexa que descreve a amplitude e fase da voltagem nos terminais da antena, como uma função da direção de chegada das ondas. O termo de fase no padrão de campo, é a fase relativa nos terminais, com relação à fase de uma antena isotrópica (ideal) localizada no origem de coordenadas (x, y, z) . O padrão de campo é normalizado à unidade, $F(l, m) = 1$, na direção de resposta máxima, i.e. onde $A(l, m) = A_{max}$. A relação entre área efetiva e padrão de campo é dada por

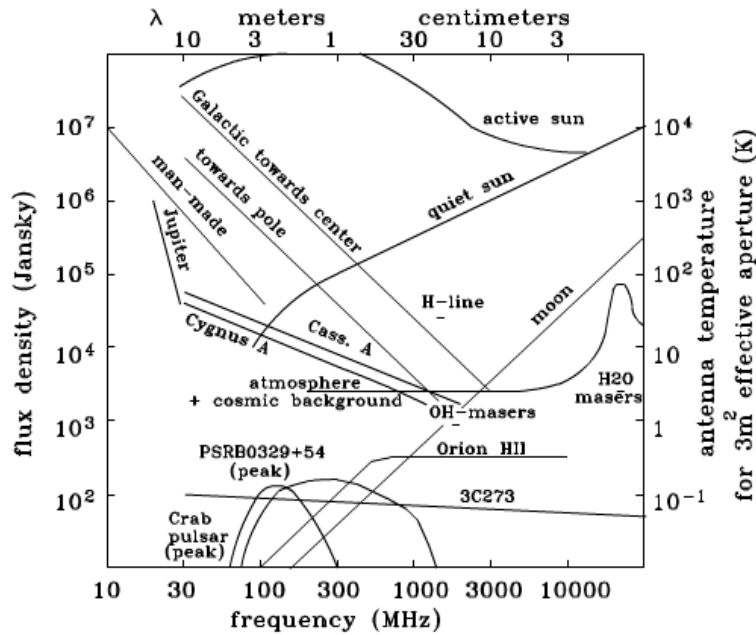


Figura 1.2 - Diagrama de emissão de fontes astronômicas. A emissão de Sol ativo domina sobre todas as outras emissões, em quase todo o espectro. As seguintes maiores emissões são a emissão do Sol calmo nas frequências altas e a emissão do centro galáctico nas frequências menores. Nas frequências em torno a 1 GHz a emissão de Sol calmo alcança até ~ 1000 vezes a emissão de Cygnus A. Tomado de [MIT Radio Astronomy Tutorial \(2008\)](#).

$$A(l, m) = A_{max} |F(l, m)|^2 \quad (m^2) \quad (1.7)$$

Esta relação é baseada no fato de ser a potência coletada pela antena proporcional ao quadrado da voltagem nos terminais.

1.2 Síntese de Abertura

A síntese de abertura é um procedimento usado em radioastronomia para melhorar a resolução espacial das observações. Está baseada no fato de se poder simular uma grande abertura combinando eletronicamente os sinais de muitos rádio telescópios. Um radiointerferômetro consiste num arranjo de antenas direcionais, sensíveis a uma banda de frequência de rádio, recebendo a emissão de uma região específica do céu. Os sinais de cada um dos receptores são correlacionados entre si e produzem um padrão de franjas característico. O padrão de franjas pode ser analisado para produzir diferentes resultados desde imagens de objetos astronômicos até a localização precisa de objetos emissores próximos e extraterrestres.

A posição das antenas que formam o arranjo interferométrico é descrita em termos do mesmo sistema coordenado rectangular xyz , Figura 1.1, sendo o plano de abertura sintetizado que está diretamente relacionado ao plano xy . A unidade de medida é o comprimento de onda da frequência central na banda de frequências de operação do sistema receptor, e as direções do espaço se especificam também com os cossenos diretores (l, m, n) associados ao sistema coordenado. A descrição alternativa em função do ponto de esfera celeste (l, m, n) continua sendo aplicável no caso de síntese de abertura.

1.3 Observação Solar

O Sol é a mais intensa fonte extraterrestre de emissão rádio observada da Terra. A composição da emissão rádio solar é complexa. Segundo a escala temporal, três componentes de emissão solar podem ser diferenciadas: (1) emissão constante, chamada emissão de Sol calmo, (2) emissão de variação lenta ou quiescente, (3) emissão esporádica ou transitória, devida às explosões.

1.3.1 Emissão rádio de Sol Calmo

A emissão rádio de Sol calmo é a emissão térmica da atmosfera solar ionizada, formada principalmente de hidrogênio. Esta emissão se origina nas camadas inferiores e se propaga através do gás ionizado das camadas exteriores sendo parcialmente absorvida por estas. As camadas exteriores ao absorver a emissão que chega a elas se convertem também em fontes de emissão.

A absorção de ondas de rádio num gás ionizado é diretamente proporcional ao quadrado do comprimento de onda, assim, a emissão rádio originada nas camadas mais densas e profundas da cromosfera, as adjacentes à fotosfera, é a emissão em comprimentos de onda mais curtos: milimétrico e centimétrico. A emissão cromosférica de grandes comprimentos de onda é absorvida por completo pelas camadas superiores. A emissão em ondas decimétricas que chega a Terra é produzida em parte nas camadas exteriores da atmosfera solar (coroa). A emissão métrica que chega à Terra vem exclusivamente da coroa (Kuz min; Salomonovich, 1966).

O perfil de temperatura de brilho, desde o centro do disco até a borda, experimenta variações nos planos equatorial e polar. Um gradual decréscimo em brilho com a distância ao centro ocorre em comprimentos de onda métricos. Em comprimentos de onda decimétricos se observa um abrlhantamento nas regiões do disco visível onde a profundidade da atmosfera quente é maior, principalmente no limbo. Em comprimentos de onda centimétricos, a dimensão angular do Sol é parecida a da fotosfera, ($R_{\odot} \sim 16'$) (Kuz min; Salomonovich, 1966).

Devido a efeitos dos campos magnéticos que penetram a atmosfera solar, a velocidade média dos elétrons movimentando-se aleatoriamente é muito maior na coroa que na cromosfera. Na coroa a temperatura cinética excede os $10^6 K$ e na cromosfera se aproxima a $10^4 K$. Uma revisão de observações de Sol calmo em ondas centimétricas e milimétricas foi feita por [Füst \(1980\)](#). Aí inclui a medição da temperatura de brilho do centro do disco solar em 21 *cm* de [Dulk et al. \(1977\)](#). O valor fornecido é 57 000 *K*, e resulta que o diâmetro equatorial alcança valores maiores em $\sim 20\%$ do raio solar no óptico.

Recentemente o Sol calmo tem sido definido como todos aqueles fenômenos acontecendo na atmosfera solar que não estejam relacionados as regiões ativas. Isto inclui estruturas estacionárias como buracos coronais, filamentos pouco ativos, proeminências e fenômenos transitórios localizadas acima da fotosfera e que se acredita estejam ligados com o aquecimento da região de transição e da coroa ([Gary; Keller, 2004](#)).

Embora a denominação “Sol calmo” tem sido reservada para aquelas áreas fora das regiões ativas, hoje é conhecido que muitos processos dinâmicos estão acontecendo em toda a superfície solar. Tais processos incluem fenômenos de pequena escala como redes de eventos de aquecimento, *nano flares*, eventos explosivos, pontos brilhantes e jatos de raios-X moles, até estruturas de grande escala como *loops* trans-equatoriais ou arcos coronais. Além disso, muitas das estruturas de grande escala que cobrem a região calma surgem das regiões ativas ([Aschwanden, 2004](#)).

1.3.2 Emissão de variação lenta ou quiescente

A emissão de variação lenta está associada à aparição de regiões ativas de longa duração no Sol. É comum também a coincidência com as regiões chamadas *plages* que circundam os grupos de manchas solares. Estas regiões se movem através do disco solar chegando às vezes a completar uma revolução em ~ 27 dias. As regiões de maior densidade e maior brilho, chamadas de condensações coronais se formam acima das *plages* em altitudes de aproximadamente $0,07 R_{\odot}$ sobre a fotosfera. Em frequências decimétricas, a temperatura de brilho destas regiões chega até seus valores máximos ($\sim 10^5 K$) ([Kuz min; Salomonovich, 1966](#)).

As regiões ativas estão localizadas em áreas de grande concentração de campo magnético associadas a grupos de manchas solares, observados no visível ou em magnetogramas. Os grupos de manchas possuem natureza marcadamente bipolar, daí se concluir que as regiões ativas são constituídas por linhas fechadas de campo magnético. As regiões ativas na faixa centimétrica estão caracterizadas por serem fontes locais de emissão situadas em alturas menores do que 10^5 km acima da superfície fotosférica. A densidade ($10^8 - 10^{11}$

cm^{-3}) e temperatura eletrônicas ($10^3 - 10^5$ K) variam com a altura e, em geral, os valores dentro da região ativa são uma ordem de grandeza maior do que os valores médios do ambiente (Aschwanden, 2004).

1.3.3 Explosões Solares

As fulgurações solares ou *flares* se apresentam como os fenômenos mais explosivos da atividade solar pois liberam grandes quantidades de energia ($10^{26} - 10^{32}$ ergs) em algumas dezenas de segundos e acarretam na maioria dos casos, o aquecimento do plasma-ambiente e a aceleração de partículas contidas nele. Um grande *flare* pode acelerar a cada segundo 10^{37} elétrons (Nindos et al., 2008) até energias acima de 20 keV. No processo de liberação de energia são características duas fases: a fase impulsiva e o decaimento estendido.

Acredita-se que os *flares* solares tomam sua energia dos processos de reconexão magnética em algum lugar no topo dos *loops* magnéticos. Os elétrons que são acelerados e escapam em direção à coroa produzem emissão rádio em comprimentos de onda métricos. Outra parte dos elétrons é confinada dentro dos *loops* pelo efeito de garrafa magnética e emitem radiação giro-síncrotron no caminho de um extremo a outro do *loop*. A emissão rádio em diferentes comprimentos de onda depende do mecanismo de emissão: comprimentos de onda decimétricos são devidos a emissão coerente de plasma, as microondas se originam de emissão giro-síncrotron, e radiação milimétrica e sub-milimétrica são combinação de giro-síncrotron e *bremhstrahlung* térmico (Silva, 2005).

No início da década de 1980, as observações do satélite *Skylab* mostraram que as emissões em raios-X moles são originados em regiões da atmosfera solar com densidades eletrônicas da ordem de $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (Moore et al., 1980). No entanto, os avanços teóricos na estimativa da emissão livre-livre mostram a possibilidade de ter emissão decimétrica acima de 1000 MHz, levando em conta que:

- A atmosfera solar contém irregularidades de pequena escala na densidade eletrônica devido a natureza fibrosa que o campo magnético imprime no meio. As estimativas de emissão livre-livre considerando as irregularidades em densidade reduziram substancialmente a profundidade óptica permitindo a liberação de radiação decimétrica, especialmente ao longo dos gradientes de densidade.
- Os mecanismos de emissão coerente priorizam a emissão nos harmônios superiores da frequência de plasma, para os quais a absorção é menos efetiva pois a profundidade óptica é cerca de 16 vezes menor em comparação com a emissão fundamental (Dulk, 1985).

Stahli e Benz (1987) mostraram que a emissão no segundo harmônico pode ser observada até frequências de 6 GHz ou mais, considerando heterogeneidades na densidade da atmosfera solar com tamanhos da ordem de 100 km, enquanto que a emissão fundamental é fortemente absorvida para frequências maiores que 1 GHz.

Mais recentemente, Ohyama e Shibata (1998), Tanuma e Shibata (2005), Bárta e Karlický (2005) sugeriram que os processos de aceleração das partículas e aquecimento de plasma ocorrem em regiões com densidades eletrônicas que correspondem a regiões cujas frequências de plasma estão na faixa decimétrica.

1.4 Descrição da Dissertação

A presente dissertação contém no Capítulo 2 uma breve revisão da teoria de telescópios de correlação, como elemento fundamental na construção de arranjos interferométricos. O mesmo capítulo apresenta simulações de mapas solares unidimensionais feitas usando mapas do *Siberian Solar Radio Telescope* (SSRT), as simulações permitem inferir a natureza e características de amplitude e fase que o Protótipo do Arranjo Decimétrico Brasileiro (PBDA) deveria produzir em cada uma de suas 10 linhas de base, e estabelecem os limites teóricos em resolução espacial e resposta dinâmica do arranjo. O Capítulo 3 contém detalhes do arranjo PBDA: breve descrição do *front end* das antenas, dos pares interferométricos formados e descreve características operacionais, não documentadas antes, do correlacionador de 1 bit do PBDA. O Capítulo 4 descreve os procedimentos de observação, processamento dos dados, calibração da amplitude e calibração da fase. São descritas as causas do insucesso na obtenção de mapas com o PBDA usando os dados observados na segunda metade do ano 2007. Finalmente o Capítulo 5 contém as conclusões da presente dissertação e sugestões para as etapas seguintes.

2 TELESCÓPIOS DE CORRELAÇÃO E SIMULAÇÃO DE MAPAS

2.1 Telescópios de Correlação

O Telescópio de correlação consiste de duas antenas eletricamente conectadas a um receptor de correlação, que está desenhado para fornecer um sinal de saída proporcional à média temporal do produto das voltagens, V_1 e V_2 , das antenas componentes (Christiansen; Hogbom, 1985). No intervalo de integração t , a média temporal do produto das voltagens pode ser escrita como

$$\overline{V_1 V_2} = \overline{(V_{nc1} + V_{c1})(V_{nc2} + V_{c2})} \quad (2.1)$$

$$= \overline{V_{nc1} V_{nc2}} + \overline{V_{nc1} V_{c2}} + \overline{V_{c1} V_{nc2}} + \overline{V_{c1} V_{c2}} \quad (2.2)$$

Onde cada voltagem pode se decompor numa parte correlacionada V_c , e uma não correlacionada V_{nc} . Dos termos finais, cada fator que contém produtos das voltagens não correlacionadas (supondo uma distribuição normal de erros) e suas médias temporais desaparecem quando $t \rightarrow \infty$. Assim, para um tempo de integração suficientemente grande o produto das voltagens é igual ao produto das componentes correlacionadas.

$$\overline{V_1 V_2} = \overline{V_{c1} V_{c2}} \quad (2.3)$$

Um receptor de correlação ideal será sensível só aos sinais recebidos simultaneamente pelas duas antenas, já num correlacionador real a equação 2.3 inclui um termo de erro ε variando randomicamente de uma integração a outra que se converte num limitante da sensibilidade do telescópio de correlação.

A origem comum das componentes V_{c1} e V_{c2} se expressa na relação $V_{c2}(t) = const.V_{c1}(t+\tau)$, onde a constante leva em conta qualquer diferença em amplitude que pode ser resultado das eficiências desiguais das antenas. A diferença do tempo de chegada τ é causada pelas diferenças no caminho radioelétrico percorrido pelos sinais desde a fonte até as antenas.

Quando os sinais são voltagens sinusoidais e a diferença de fase entre eles depende só do atraso na chegada a frentes de onda ao ponto comum de multiplicação no receptor de correlação

$$\overline{V_1 V_2} = (\overline{V_{c1}^2} \cdot \overline{V_{c2}^2})^{1/2} \cos \psi \quad (2.4)$$

onde $\psi = 2\pi\nu_0\tau = 2\pi(ul + vm)$, ν_0 é a radiofrequência utilizada, (u, v) é a separação relativa entre antenas no plano \mathbf{xy} , e (l, m) são os cossenos diretores da direção de apontamento no céu.

2.1.1 Potência Correlacionada Disponível e Área Efetiva

Se $p_{1,2}$ são as potências por unidade de frequência disponíveis nas antenas (medidas na mesma polarização) e $A_{1,2}$, as áreas efetivas respectivas, a potência disponível por unidade de largura de banda, p_c e a área efetiva do telescópio de correlação, A_c , estarão definidas pelas relações

$$p_c = 2(p_1 p_2)^{1/2} \cos \psi \quad (2.5)$$

$$A_c = 2(A_1 A_2)^{1/2} \cos \psi \quad (2.6)$$

Sejam $F_{1,2}$ os padrões de radiação das antenas e $\phi_{1,2}$ as fases relativas de cada antena com relação a uma antena isotrópica padrão, $A_1 = A_{1max}|F_1|^2$, $A_2 = A_{2max}|F_2|^2$ e $\psi = (\phi_1 - \phi_2)$. A área efetiva em função dos padrões de radiação se expressa como

$$A_c = 2(A_{1max} A_{2max})^{1/2} |F_1| \cdot |F_2| \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.7)$$

onde o produto $|F_1| \cdot |F_2| \cos(\phi_1 - \phi_2)$ se pode escrever como $Re\{F_1 F_2^*\}$. A última equação é válida só quando as fases dos padrões de radiação têm sido definidas com relação a mesma voltagem de referência e se tem assegurado a coincidência das posições de apontamento dos feixes.

Se a área efetiva anterior é chamada de *área efetiva cosseno*, os telescópios de correlação estão desenhados para fornecer uma área efetiva análoga à anterior chamada de *área efetiva seno*, que é medida introduzindo um atraso temporal adicional de um quarto de período, i.e. uma atraso de fase de $\pi/2$

$$A_s = 2(A_1 A_2)^{1/2} \cos(\psi - \pi/2) \quad (2.8)$$

$$= 2(A_{1max} A_{2max})^{1/2} |F_1| \cdot |F_2| \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.9)$$

desta vez, $|F_1| \cdot |F_2| \sin(\phi_1 - \phi_2)$ é igual a $Im\{F_1 F_2^*\}$. As áreas efetivas cosseno e seno, 2.7 e 2.9 respectivamente, podem-se agrupar numa só *área efetiva complexa*

$$\mathbf{A} = A_c + jA_s \quad (2.10)$$

$$\mathbf{A}(l, m) = 2(A_{1max} A_{2max})^{1/2} |F_1| \cdot |F_2| \exp j\psi \quad (2.11)$$

2.1.2 Temperatura de Brilho e Temperatura de Antena

A temperatura de antena T_a , de um telescópio de correlação em termos da distribuição de temperatura de brilho $T_B(l, m)$ da fonte e da área efetiva complexa $\mathbf{A}(l, m)$ é dada por

(Christiansen; Hogbom, 1985)

$$T_a = \lambda^{-2} \int_{4\pi} T_B(l, m) \mathbf{A}(l, m) d\Omega \quad (2.12)$$

A forma complexa do termo de fase é $\exp\{j2\pi(ul + vm)\}$ e da geometria envolvida $d\Omega$ resulta $\frac{dldm}{(1-l^2-m^2)^{1/2}}$, daí a equação 2.12 pode ser expressa como

$$T_a(u, v) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T_B(l, m) |\mathbf{A}(l, m)|}{\lambda^2 (1-l^2-m^2)^{1/2}} \exp[j2\pi(ul + vm)] dldm \quad (2.13)$$

Esta é uma equação integral de *Fourier* e as funções que formam o par de *Fourier* são

$$T_a(u, v) \Leftrightarrow \frac{T_B(l, m) |\mathbf{A}(l, m)|}{\lambda^2 (1-l^2-m^2)^{1/2}} \quad (2.14)$$

Sendo o interferômetro um arranjo de telescópios de correlação com diferentes separações, o sinal de cada par de antenas vai fornecer uma componente de *Fourier* da distribuição de brilho multiplicado por um fator de ponderação. Daí que a distribuição de brilho requerida se pode determinar da transformação inversa da temperatura de antena T_a medida nos diferentes espaçamentos, justamente aqueles formados pelas antenas

$$\frac{T_B(l, m) |\mathbf{A}(l, m)|}{\lambda^2 (1-l^2-m^2)^{1/2}} = \int \int_{-\infty}^{\infty} T_a(u, v) \exp[-j2\pi(ul + vm)] dudv \quad (2.15)$$

Se os espaçamentos de síntese (u, v) são escolhidos a intervalos regulares du e dv nas direções u e v , respectivamente, a equação 2.15 se pode substituir por uma série (Ravindra, 1983). Chamando ao lado esquerdo da equação como $T_{map}(l, m)$ a expressão resulta

$$T_{map}(l, m) = \sum_{-u}^u \sum_{-v}^v T_a(u, v) \exp[-j2\pi(ul + vm)] \quad (2.16)$$

A transformada de *Fourier* de uma função real é uma função hermitiana, i. e., a parte real de T_a é par e a parte imaginária é impar, $T_a(-u, -v) = T_a^*(u, v)$. Daí que se $T_a(u, v)$ é conhecida, não seria necessário medir $T_a(-u, -v)$, ou seja, basta fazer medições em dois dos quatro quadrantes do plano (u, v) .

Nomeando as partes real e imaginária de $T_a(u, v)$ por a_{uv} e b_{uv} , respectivamente, a equação 2.16 pode ser escrita como

$$T_{map}(l, m) = \sum_{-u}^u \sum_{-v}^v (a_{uv} + jb_{uv}) \exp[-j2\pi(ul + vm)] \quad (2.17)$$

Na síntese unidimensional a equação se reduz a

$$T_{map}(l) = \sum_{-u}^u (a_u + jb_u) \exp[-j2\pi ul] \quad (2.18)$$

Sendo que $T_a(u) = (a_u + jb_u)$, é uma quantidade hermitiana, sua transformada de *Fourier* é real e a equação 2.18 pode ser escrita só com valores positivos de u , para representar qualquer intervalo discreto de N valores recorrido por l entre $[-\pi, \pi]$,

$$T_{map}(l) = 2 \sum_0^u \text{Re}\{(a_u + jb_u) \exp[-j2\pi ul]\} \quad (2.19)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} (a_n \cos 2\pi u_n l + b_n \sin 2\pi u_n l) \quad (2.20)$$

onde n , é um índice que enumera as diferentes separações entre antenas ou linhas de base, cada um das quais fornece uma temperatura de antena.

Num arranjo Leste-Oeste, se as antenas seguem o percurso de um astro contido no plano equatorial, $l = \cos \theta$, onde θ representa o ângulo horário, u é a *freqüência espacial* definida pela separação entre antenas, medida em unidades de comprimento de onda da freqüência temporal de observação. $T_{map}(l)$ é a distribuição unidimensional de brilho, e a_n , b_n são os chamados *coeficientes de correlação cosseno*, *seno* respectivamente. O conjunto de coeficientes de correlação complexos formam o chamado espectro de freqüências espaciais.

2.1.3 Transformada Discreta de Fourier e Transformada Rápida de Fourier

As formulas com as quais os conjuntos de números $[T_a(u)]$ e $[T_{map}(l)]$, cada um formado por N elementos, se transformam mutuamente são,

$$T_{map}(l) = \sum_0^{N-1} T_a(u) \exp[-j2\pi ul], \quad T_a(u) = \sum_0^{N-1} T_{map}(l) \exp[j2\pi ul] \quad (2.21)$$

Estas formulas, muito similares à forma analítica da transformada de *Fourier* são conhecidas como a Transformada Discreta de Fourier (DFT por *Discrete Fourier Transform*) (Bracewell, 2000; James, 2003).

A Transformada Rápida de Fourier (FFT por *Fast Fourier Transform*) é um método

introduzido por [Cooley e Tukey \(1965\)](#), que reduz o número de operações necessárias para o cálculo da DFT. Para transformar um conjunto de N elementos, calcular diretamente a DFT são necessárias N^2 multiplicações e usar o algoritmo FFT precisa de $2N \log_2 N$ multiplicações.

Uma consideração prática no uso do método FFT é a disposição dos coeficientes de correlação complexos (amplitude e fase) no espectro de frequências e a disposição das correspondentes direções independentes da distribuição de brilho. A [Fig. 2.1](#) mostra qual é a disposição usada neste trabalho, onde não são usados índices negativos (que representam frequências espaciais negativas). Para visualizar a forma habitual do espectro de frequências com índices ou frequências negativas se pode imaginar o espectro enrolado num cilindro, [Fig. 2.2](#).

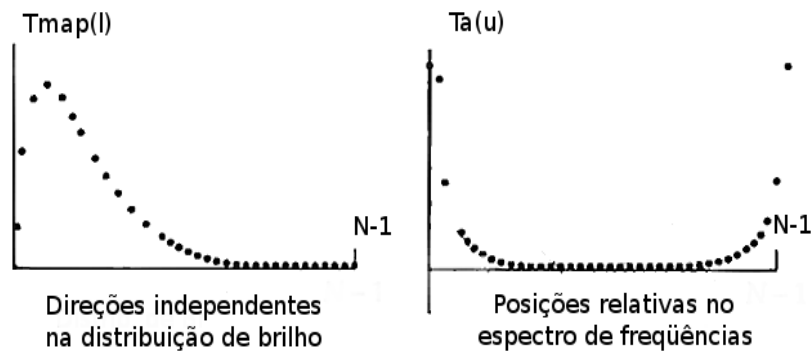


Figura 2.1 - Disposição dos coeficientes de correlação e as direções independentes num mapa unidimensional de temperatura de brilho usados neste trabalho. O espectro de frequências espaciais não contém índices negativos que representam frequências espaciais negativas.

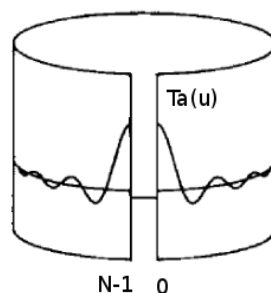


Figura 2.2 - Forma habitual do espectro de frequências com índices ou frequências negativas. A parte positiva do espectro está no início e a negativa ao final.

Outra consideração prática é escolher $N = 2^m$ onde m é um inteiro de escolha apropriada relacionado com o numero total de pares interferométricos que é possível formar com um arranjo de antenas. Isso faz com que o cálculo seja mais eficiente em termos de tempo de cálculo e seja apropriado à aritmética binária dos computadores digitais.

2.1.4 Direções Independentes no Mapa

Uma função definida em N diferentes direções, é representável no espaço conjugado da transformada por N parâmetros complexos diferentes. No caso das observações feitas com um interferômetro que produz N coeficientes de correlação complexos, N é também o número total de direções independentes dentro do campo de visão do mapa que o interferômetro poderia produzir.

Sendo que $T_{map}(l)$ representa uma grandeza física e só admite valores reais, as N direções do céu que formam o mapa seriam representadas por N coeficientes complexos de características particulares, Figura 2.3. Isto é, excluindo os coeficientes inicial a_0 e central $a_{N/2}$ que são reais, a metade restante dos coeficientes deverão ser os conjugados complexos da primeira metade para cumprir com a condição de serem coeficientes hermitianos, associados a uma grandeza real.

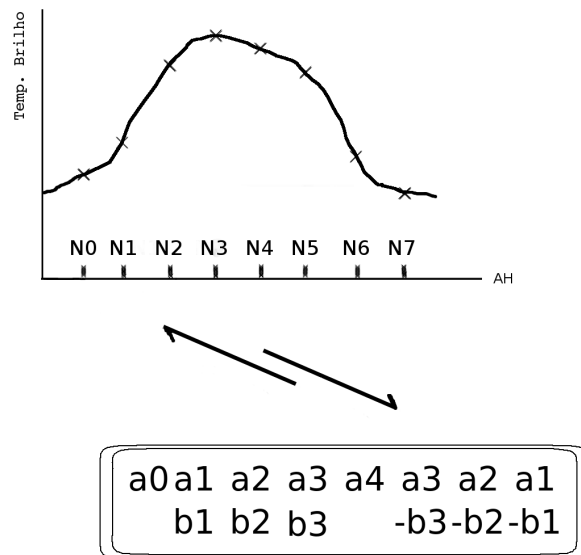


Figura 2.3 - Disposição dos coeficientes hermitianos para uma configuração de $N = 2^3$ direções independentes num mapa unidimensional de temperatura de brilho. Note como os 8 coeficientes complexos só admitem 8 valores reais diferentes.

2.2 Mapas Simulados do PBDA

No intuito de obter características gerais quanto à resolução e intensidade dos mapas que o PBDA deveria gerar, foi feita uma simulação a partir de mapas bidimensionais do Sol obtidos com o Rádio Telescópio Solar Siberiano (SSRT) que é o radio-heliógrafo em operação com frequências de observação mais próximas às frequências de operação do BDA. Esta simulação leva em conta as características do arranjo PBDA e como estas afetariam a resolução espacial e a resposta dinâmica dos mapas unidimensionais a serem obtidos.

O SSRT é um dos maiores radio-heliógrafos no mundo. As operações começaram em 1983 e desde essa data tem sido modernizado mais de uma vez. Desde 1992, o instrumento tem a capacidade de fazer barridos unidimensionais com grande resolução temporal de 56 ms , posteriormente reduzida até 14 ms , e resolução temporal de $15''$. Em 1996 foi adicionada a capacidade de fazer mapas bidimensionais do disco completo solar (Grechnev et al., 2003).

2.2.1 Os Mapas do SSRT

Foram tomados do site do SSRT (<http://ssrt.iszf.irk.ru/ssrt>) mapas do disco completo do Sol de $512 \times 512\text{ pixels}$ ($42' \times 42'$) da intensidade de emissão (*Stokes I*) na frequência $5,7\text{ GHz}$. A calibração de intensidade das imagens pode ser feita em base a uma temperatura de Sol calmo de 16000 K e uma máxima temperatura de brilho é $\sim 2,7\text{ MK}$. A sensibilidade total para observações solares é 1500 K sendo a contribuição de ruído do sistema de 800 K . A resposta dinâmica nas imagens finais é $\sim 20\text{ dB}$. O SSRT está em capacidade de obter mapas com resolução angular máxima de $21''$ a cada 2 minutos (Grechnev et al., 2003).

A Figura 2.4 mostra um mapa do Sol num dia de baixa atividade, sem pontos de forte emissão localizados. A escala de intensidade varia entre 5 e 40 unidades (escala de cor à direita da figura). Neste trabalho não tem sido feita calibração de intensidade nos mapas e as unidades arbitrárias variam de 0 até 256 no caso bidimensional. Nos mapas unidimensionais as unidades de intensidade são somas ou valores integrados das unidades anteriores.

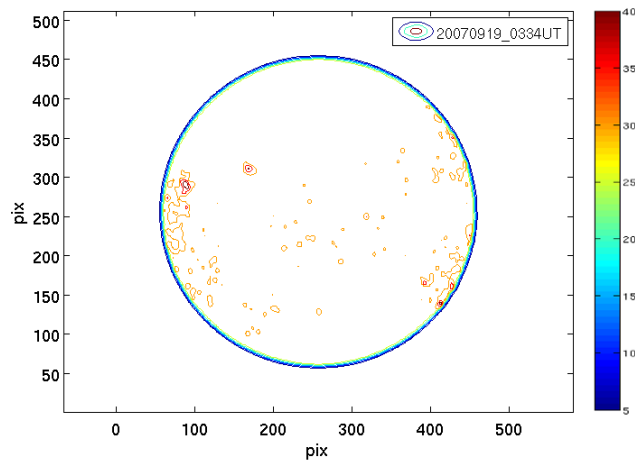


Figura 2.4 - Mapa de contorno do disco solar completo obtido com o SSRT na frequência 5,7 GHz. O campo da imagem é de $42' \times 42'$. A escala de intensidade varia entre 5 e 40 unidades arbitrárias não calibradas, o máximo atingível é 256.

A Figura 2.5 apresenta os perfis unidimensionais do mapa anterior, isto é, a superposição de mapas unidimensionais a diferentes declinações numa varredura horizontal. A emissão é algo maior nos lados e os picos de emissão localizados não chegam a duplicar a temperatura média do disco.

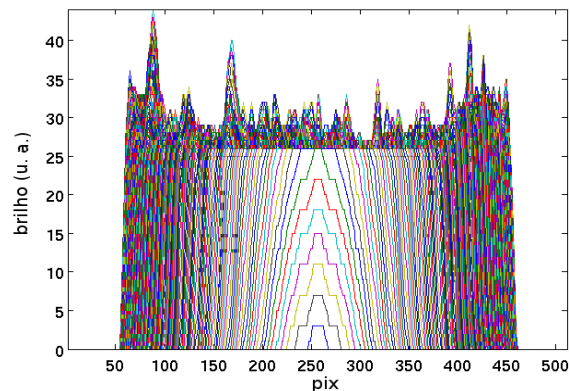


Figura 2.5 - Perfis unidimensionais do mapa SRRT da Figura 2.4 como superposição de mapas unidimensionais a diferentes declinações. A emissão é algo maior nos lados junto aos picos de emissão localizada.

A conversão do mapa bidimensional num mapa unidimensional, Figura 2.6, foi feita por integração vertical para simular o feixe sintético do PBDA (*fan beam* de $\sim 3.3' \times 3.0^\circ$ em $AH \times Dec$). Note como os abrigantamentos laterais ficam completamente diluí-

dos com a integração, a escala integrada de intensidade varia de 0 até ~ 10000 unidades, e a escala angular em ângulo horário, é a mesma do mapa bidimensional, 512 *pixels* que cobrem $42'$.

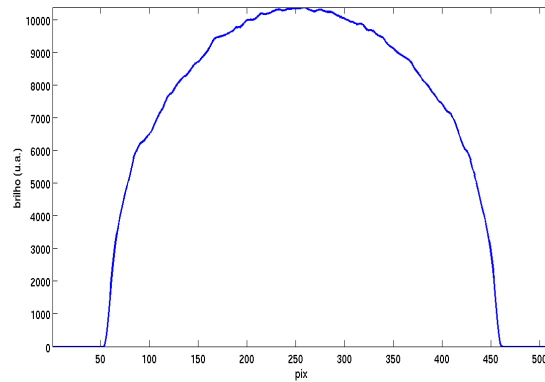


Figura 2.6 - Mapa unidimensional depois da integração em declinação. A escala integrada de intensidade varia de 0 até ~ 10000 unidades, a cobertura em ângulo horário é 512 *pixels* equivalente a $42'$.

Como o SSRT é capaz de fornecer mapas com uma resolução espacial superior ao PBDA é necessário também aplicar uma convolução do mapa unidimensional integrado com uma gaussiana de $\theta_{HPBW} \approx 3'$, a resolução teórica máxima do PBDA. Isso significa aplicar uma convolução com um feixe de 32 *pixels* $\approx 2.6'$ (512 *pixels* cobrem um campo de visão de $42'$). O resultado se mostra na Figura 2.7 onde o perfil, por efeito da operação de convolução, aparece já completamente alisado sem as rugosidades do mapa anterior.

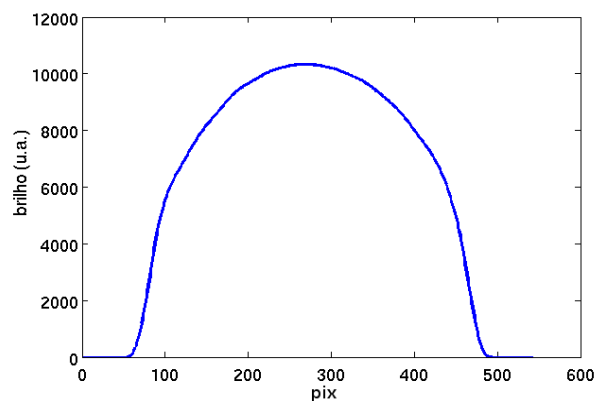


Figura 2.7 - Mapa unidimensional depois da convolução com um feixe gaussiano de $2,6'$. Foi aplicada uma convolução do mapa unidimensional integrado com uma gaussiana de $\theta_{HPBW} = 32$ *pixels*, equivalente com um feixe de $\sim 2,6'$.

Para operar a transformação discreta de Fourier com o mesmo numero de entradas N , no mapa unidimensional que no espectro de freqüências espaciais, foi feita a simplificação adicional de integrar horizontalmente o mapa unidimensional SSRT e reduzir ele de 512 até 32 *pixels*, Figura 2.8. Cada barra representa uma direção independente do ângulo horário, dentro de um campo de 42'. O valor de intensidade em cada direção independente é igual à media dos 16 *pixels* correspondentes à integração no mapa de 512 *pixels*, feito assim para preservar a mesma escala de intensidades do mapa unidimensional anterior.

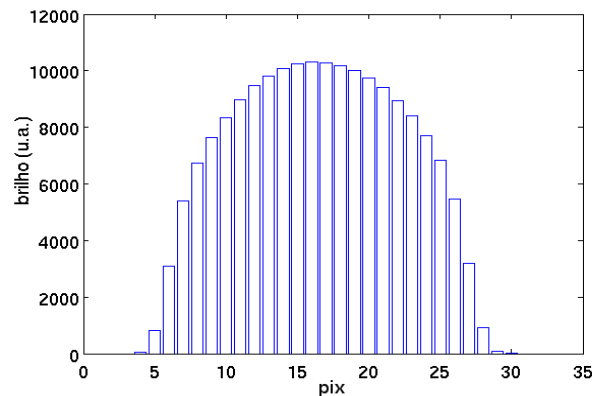


Figura 2.8 - Mapa unidimensional pós-integração horizontal. O resultado é um mapa com 32 direções independentes obtido agrupando cada 16 dos 512 *pixels* no mapa 2.7. A altura das barras é a media de 16 valores de intensidade do mapa unidimensional anterior, preservando assim mesma escala arbitrária de intensidade.

Isso também significa uma saída do correlacionador com 32 coeficientes de correlação, ou seja, um arranjo com 16 linhas de base que produziria um feixe de 2,6' ao incluir até uma linha de base máxima de 288 metros contra os 216 metros do PBDA que produziria um feixe de 3,3' na direção de ângulo horário.

O PBDA é um instrumento capaz de obter até 18 diferentes coeficientes de correlação por integração (modo *snapshot*), i.e. 9 linhas de base \times 2 componentes em quadratura: cosseno e seno. Os mapas por ele fornecidos só teriam 18 direções independentes por integração. Embora esta simulação forneça mapas de características superiores em resolução com relação ao PBDA ainda servem para obter valiosa informação e podem ser posteriormente manipulados e degradados no espaço de freqüências espaciais para torná-los mas parecidos com os resultados a serem obtidos com o PBDA.

2.2.2 Espectros de Fase e Amplitude

Construídos os mapas unidimensionais de 32 direções, estes são transformados ao espaço de frequências espaciais usando um algoritmo FFT (Cooley; Tukey, 1965) implementado no operador `fft` do *MATLAB* e descrito em Bracewell (2000). Supondo que a observação tem sido feita em 1,4 GHz, os coeficientes de correlação obtidos simulam ser de um arranjo com separação mínima entre antenas de $\sim 86 \lambda$, sendo a separação máxima $\sim 1371 \lambda$.

As tabelas 2.1 e 2.2 contêm os valores nas primeiras 17 das 32 posições do chamado espectro de frequências espaciais, as 15 posições restantes não fornecem informação adicional do espectro. As posições sublinhadas correspondem às linhas de base que o PBDA não possui. No espaço de frequências espaciais é possível eliminar os coeficientes de correlação que o arranjo não fornece e estudar as consequências dessa degradação no mapa depois de feita a transformação inversa.

Tabela 2.1 - Posição das linhas de base no espectro de frequências espaciais.

Pos. no Espectro	<u>01</u>	02	03	04	05	06	07	08	09
Linha de Base (m)	0	18	36	54	72	90	108	126	144
Freq. Espac. (21 cm)	0	86	171	257	343	429	514	600	686

Tabela 2.2 - Posição das linhas de base no espectro de frequências espaciais (cont.)

Pos. no Espectro	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	13	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>16</u>	<u>17</u>
Linha de Base (m)	162	180	198	216	234	252	270	288
Freq. Esp. (21 cm)	771	857	943	1029	1114	1200	1286	1371

Já na Figura 2.9, a altura das barras em cor azul corresponde ao valor das componentes cosseno (a_n) e os quadrados em vermelho são as componentes seno (b_n). A ordem de grandeza das primeiras componentes são muito maiores que as demais componentes, efeito característico de um mapa sem detalhes menores com predomínio de uma estrutura cujo tamanho é da mesma ordem de grandeza da largura do mapa. A primeira componente $a_0 \approx 15 \times 10^4$ (linha de base zero) representa o valor integrado da intensidade no mapa unidimensional.

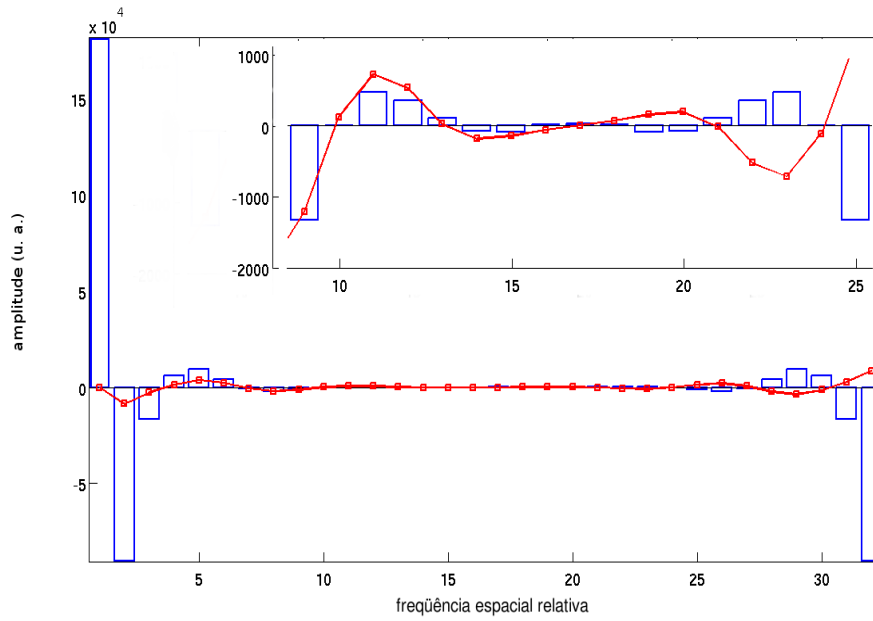


Figura 2.9 - Distribuição dos coeficientes de correlação no espaço de freqüências espaciais. A altura das barras (azul) corresponde as componentes cosseno (a_n) e os quadrados (vermelho) as componentes seno (b_n), a freqüência central seria $\sim 1371\lambda$ (pos. 17) e a separação entre componentes sucessivas $\sim 86\lambda$ para uma freqüência de observação de 1.4 GHz . A figura inserida mostra o detalhe da parte central do espectro.

A Figura 2.10 apresenta as amplitudes de visibilidade, $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$. As barras em vermelho representam as amplitudes que teria o PBDA eliminadas as componentes de 0, 162, 180, 198, 234, 252, 270, 288 metros. As tabelas 2.3 e 2.4 mostram as amplitudes de visibilidade das diferentes linhas de base em porcentagem da linha de base zero.

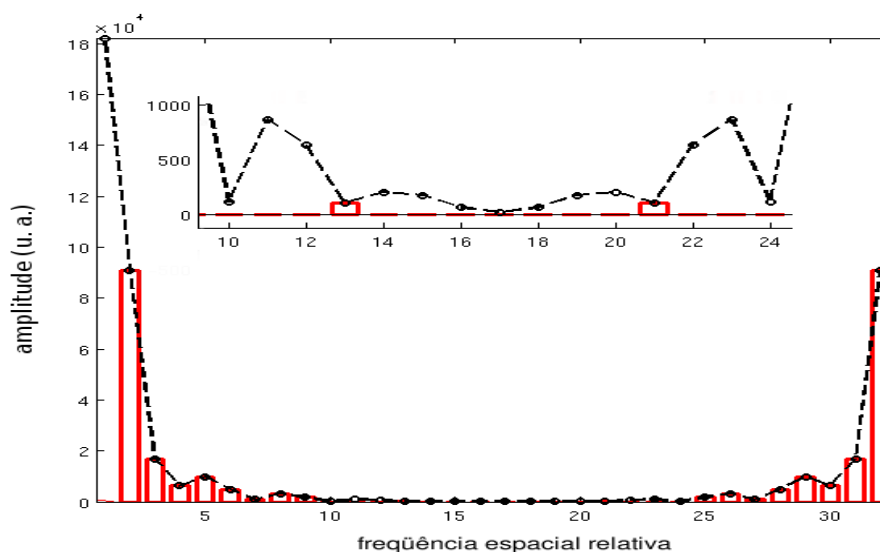


Figura 2.10 - Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de sol calmo. Em cor preto as amplitudes do coeficiente de correlação em 32 posições da frequência espacial. As barras em cor vermelho são as 18 amplitudes que seriam fornecidas pelas 9 linhas de base do PBDA. A figura inserida mostra o detalhe da parte central do espectro.

Tabela 2.3 - Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de Sol calmo

Pos. no Espec.	<u>01</u>	02	03	04	05	06	07	08	09
Lin. Base (m)	0	18	36	54	72	90	108	126	144
Amp. Visib. (%)	100	50,0	9,13	3,42	5,45	2,67	0,48	1,7	1,00

Tabela 2.4 - Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de Sol calmo (cont.)

Posic. no Espectro	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	13	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>16</u>	<u>17</u>
Linha de Base (m)	162	180	198	216	234	252	270	288
Ampli. de Visibi. (%)	0,07	0,47	0,35	0,06	0,11	0,10	0,04	0,01

Do mesmo jeito é apresentado o conjunto de fases, $\arctan(b_n/a_n)$ na Figura 2.11. O traço em vermelho corresponde a uma simulação só com as linhas de base do PBDA. As tabelas 2.5 e 2.6 apresentam os ângulos de fase, em graus sexagesimais, das visibilidade nas diferentes linhas de base.

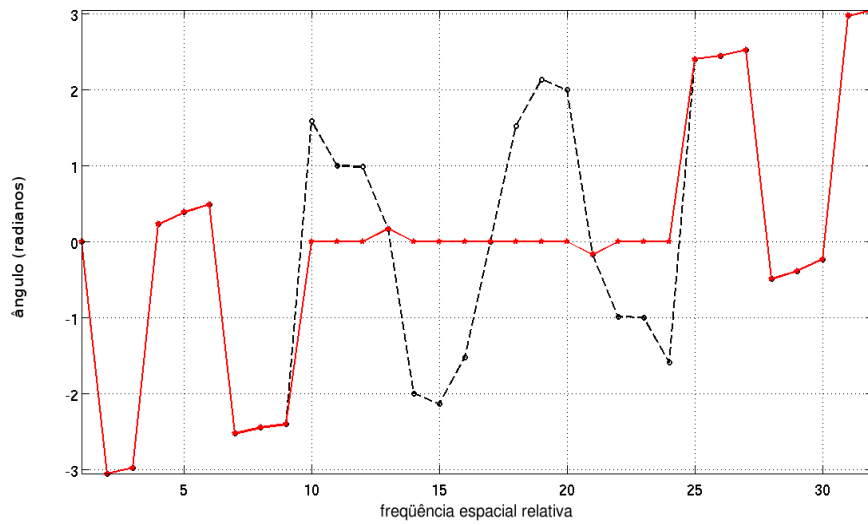


Figura 2.11 - Espectro de fases da simulação de Sol calmo. Em cor preto os ângulos de fase (radianos) fornecidos pelas 16 linhas de base em 32 posições diferentes do espectro. Em cor vermelho estão as fases que seriam fornecidas pelo PBDA.

Tabela 2.5 - Espectro de fases de visibilidade da simulação de Sol calmo

Pos. no Espec.	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Lin. Base (m)	0	18	36	54	72	90	108	126	144
Âng. de Fase (°)	0	-175	-170	13	22	28	-144	-140	-137

Tabela 2.6 - Espectro de fases de visibilidade da simulação de Sol calmo (cont.)

Posic. no Espectro	10	11	12	13	14	15	16	17
Linha de Base (m)	162	180	198	216	234	252	270	288
Âng. de Fase (°)	91	57	57	9	-114	-122	-86	0

Finalmente, os mapas são reconstruídos usando o operador de transformada inversa de *Fourier* **ifft**. Os resultados são apresentados na Figura 2.12, onde as barras em amarelo correspondem ao mapa original da Figura 2.8, em cor preto a inversão obtida sem alteração nenhuma e em cor vermelho o mapa que seria obtido com as nove linhas de base do PBDA.

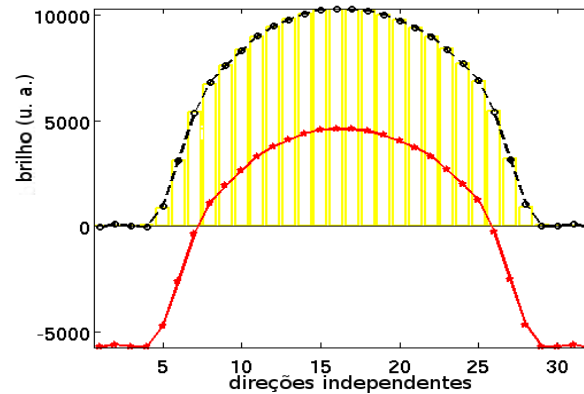


Figura 2.12 - Mapas reconstruídos da simulação das imagens do SSRT. A curva em cor preto foi obtida considerando 16 linhas de base, já na curva em cor vermelho só foram consideradas as 9 linhas de base do PBDA. O deslocamento vertical ocorre pela ausência da componente a_0 .

O deslocamento vertical deste último traço é devido à ausência da componente de linha de base zero (a_0). A falta das outras linhas de base não parece ter maior conseqüência, sendo que o mapa original não apresenta detalhes finos na estrutura e não tem sido considerada a inclusão de ruído para tornar mais realística a simulação.

2.2.3 Degradação da Resposta Dinâmica

Para mostrar os passos da simulação foi escolhido deliberadamente o mapa do dia 19 junho de 2007, um mapa que embora não possua regiões de forte emissão localizada serve para estimar as características que teria um mapa unidimensional de Sol calmo usando o PBDA, também serve para estimar as ordens de grandeza que teriam as 9 amplitudes de visibilidade e suas respectivas fases. Por último, vai ser útil para avaliar o desempenho do arranjo frente à eliminação de algumas de suas linhas de base.

Com o propósito de avaliar a degradação da intensidade das regiões ativas com relação ao fundo de emissão de Sol calmo, foi escolhido o mapa SSRT do dia 02 de maio de 2007, que apresenta uma região de emissão dupla localizada sobre o disco solar, sendo o pico maior, o máximo registrado em todo o período de maio a dezembro de 2007.

Na Figura 2.13 se mostra o mapa de contorno desse dia, a emissão localizada é tão intensa que as bordas que definem o disco solar não aparecem, por isso foi inserida uma borda artificial tracejada em cor preto. A Figura 2.14 apresenta os perfis unidimensionais do mesmo mapa, isto é, a superposição de mapas unidimensionais a diferentes declinações numa varredura horizontal. A temperatura de brilho do pico de emissão é ~ 10 vezes a temperatura média do disco e o pico secundário alcança uma altura $\sim 80\%$ do pico maior.

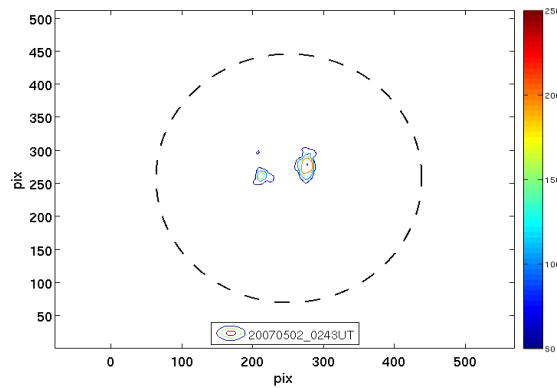


Figura 2.13 - Mapa de contorno do disco solar no dia 02 maio de 2007. A ausência da borda do disco é devida a forte emissão central. A intensidade no maior pico quase atinge o valor máximo da escala, 256 unidades e o mínimo valor registrado é da ordem das 50 unidades. O campo da imagem é de $42' \times 42'$.

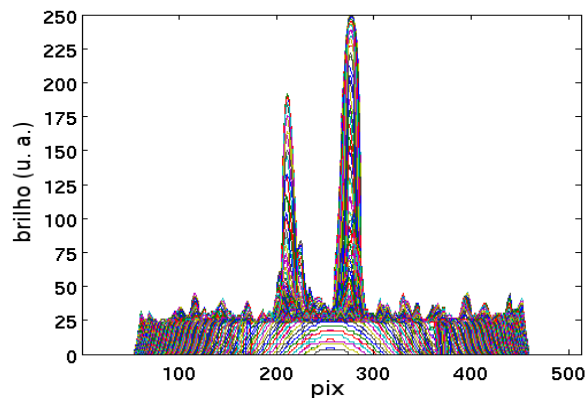


Figura 2.14 - Perfis unidimensionais do mapa SRRT original do dia 02 de Maio de 2007. A temperatura de brilho do pico de emissão é ~ 10 vezes a temperatura média do disco.

Aplicando os passos a degradação no mapa, ver Figuras 2.15 e 2.16, se produz uma evidente

diminuição na intensidade relativa dos picos ficando eles, depois do último passo, diluídos acima da emissão de fundo, Figura 2.17. Neste mapa, em cor azul (16 linhas de base), o nível máximo da emissão de fundo é ~ 8800 e os picos principal e secundário atingem alturas de ~ 12560 e ~ 10580 , respectivamente. No traço em cor vermelha, a simulação que reproduz o mapa do PBDA mostra uma diminuição apenas um pouco maior dos picos de emissão, ~ 12470 no principal e ~ 10430 no secundário, alturas medidas com relação ao ponto mais baixo desse mapa, ~ -5750 . Em resumo, a resposta dinâmica cai de ~ 10 dB no mapa original até $\sim 1,4$ dB na simulação do PBDA.

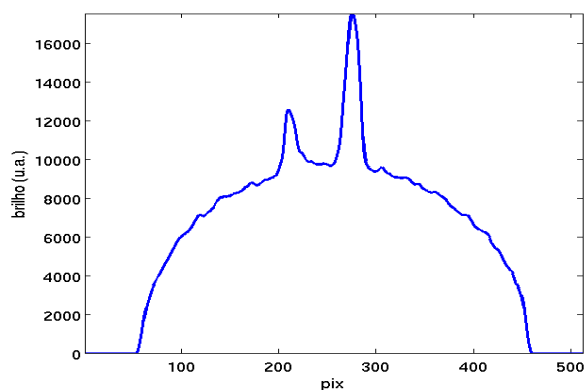


Figura 2.15 - Mapa unidimensional do dia 02 de Maio de 2007 depois da integração em declinação. A escala integrada de intensidade varia de 0 até ~ 18000 unidades, a cobertura em ângulo horário é 512 *pixels* equivalente a $42'$.

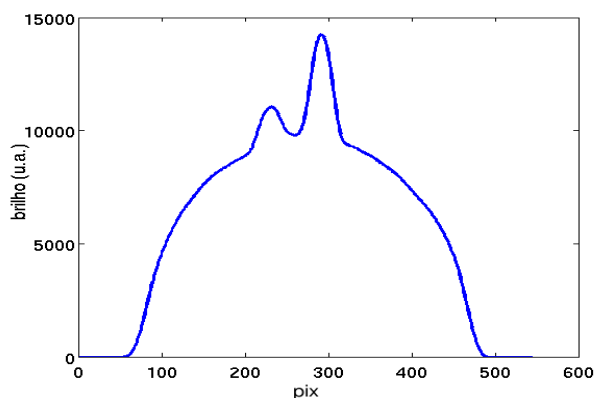


Figura 2.16 - Mapa unidimensional do dia 02 de Maio de 2007 depois da convolução com um feixe gaussiano de $2,6'$. Foi aplicada uma convolução do mapa unidimensional integrado com uma gaussiana de $\theta_{HPBW} = 32$ *pixels*, equivalente com um feixe de $\sim 2,6'$.

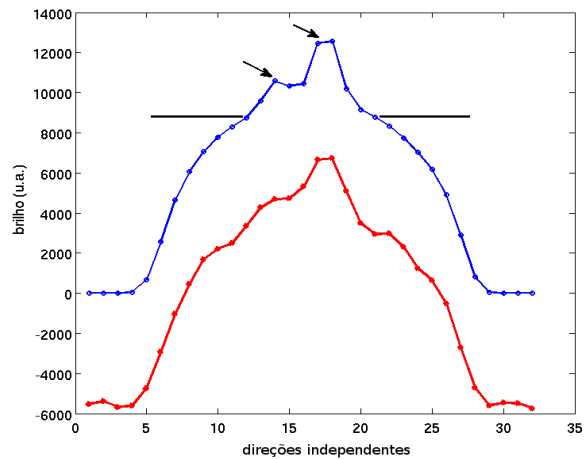


Figura 2.17 - Mapas reconstruídos da simulação das imagens do SSRT no dia 02 de maio de 2007. A curva em cor azul foi obtido considerando 16 linhas de base. Na curva em vermelho só foram considerados as 9 linhas de base do PBDA. As setas sinalam a localização dos picos de emissão e a linha horizontal o nível aproximado da emissão de fundo.

No espectro de amplitudes de visibilidade, as 9 primeiras linhas de base, incluindo a linha de base zero, Figura 2.18 mostram um tamanho e tendências similares as amplitudes do primeiro mapa 2.10. As linhas de base maiores aparecem como se estivessem contidas numa curva alisada e com as amplitudes decaindo suavemente, uma configuração diferente com relação as mesmas linhas de base no gráfico menor na Figura 2.10. As tabelas 2.7 e 2.8 mostram as amplitudes de visibilidade das diferentes linhas de base em porcentagem da linha de base zero.

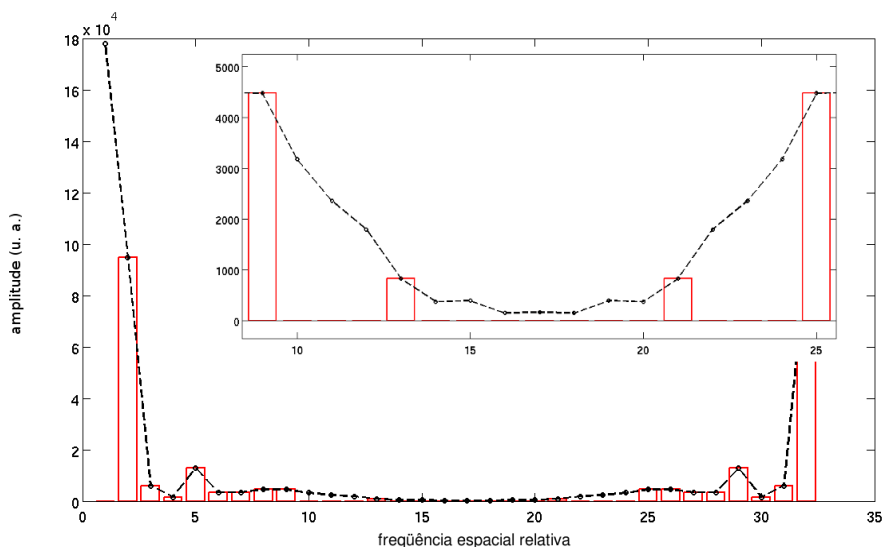


Figura 2.18 - Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação para o dia 02 de maio de 2007. Em cor preto as amplitudes do coeficiente de correlação em 32 posições da frequência espacial. As barras em cor vermelho são as 18 amplitudes que seriam fornecidas pelas 9 linhas de base do PBDA. A figura inserida mostra o detalhe da parte central do espectro.

Tabela 2.7 - Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007

Pos. no Espec.	<u>01</u>	02	03	04	05	06	07	08	09
Lin. Base (m)	0	18	36	54	72	90	108	126	144
Amp. Visib. (%)	100	53,3	3,34	0,87	7,15	1,96	2,52	2,52	1,78

Tabela 2.8 - Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007 (cont.)

Posic. no Espectro	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	13	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>16</u>	<u>17</u>
Linha de Base (m)	162	180	198	216	234	252	270	288
Ampli. de Visibi. (%)	1,33	1,01	0,46	0,21	0,22	0,09	0,09	0,10

Em relação ao espectro de fases, Figura 2.19, o gráfico mostra uma alternância de valores positivos e negativos entre linhas de base sucessivas começando na posição 6, de modo que as fases das linhas de base menores quase reproduzem o espectro da Figura 2.11. As tabelas 2.9 e 2.10 mostram os ângulos de fase das visibilidade nas diferentes linhas de base.

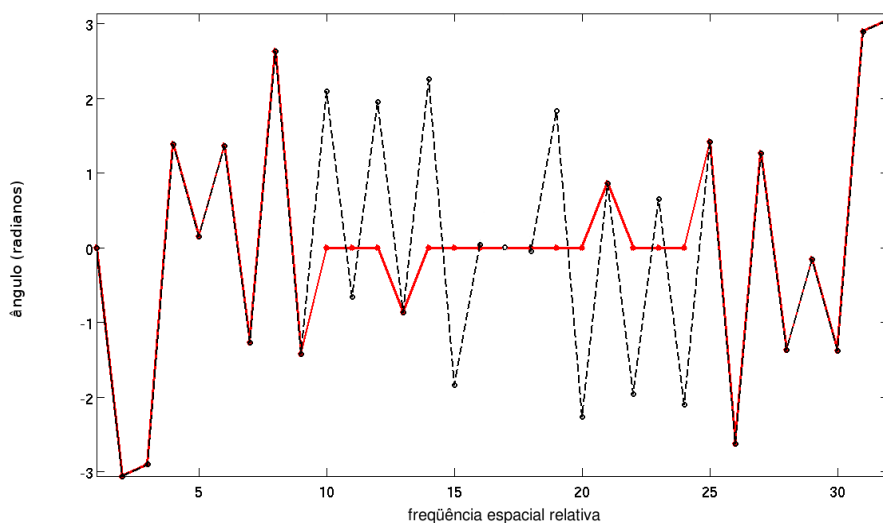


Figura 2.19 - Espectro de fases da simulação para o dia 02 de Maio de 2007. Em cor preto os ângulos de fase (radianos) fornecidos pelas 16 linhas de base em 32 posições diferentes do espectro. Em cor vermelho estão as fases que seriam fornecidas pelo PBDA.

Tabela 2.9 - Espectro de fases de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007

Pos. no Espec.	<u>01</u>	02	03	04	05	06	07	08	09
Lin. Base (m)	0	18	36	54	72	90	108	126	144
Âng. de Fase (°)	0	-175	-167	79	9	78	-73	150	-81

Tabela 2.10 - Espectro de fases de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007 (cont.)

Posic. no Espectro	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	13	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>16</u>	<u>17</u>
Linha de Base (m)	162	180	198	216	234	252	270	288
Âng. de Fase (°)	120	-37	112	-49	129	-105	3	0

Em resumo, a integração vertical, convolução e integração horizontal vão produzir sucessivas degradações em resolução e resposta dinâmica nos mapas. A ausência da linha de base zero desloca o mapa verticalmente para abaixo forçando valores negativos de intensidade

no mapa reconstruído que deverão ser corrigidos.

A ausência de algumas das linhas de base maiores a 162 metros, não parece afetar grandemente os mapas reconstruídos e são as visibilidades das linhas de base 18, 36, 54, 72, 90, 108, 126, 144, as que vão definir a estrutura de emissão de fundo com forma de capacete e os picos diluídos. Daí que o mapa reconstruído que simula ser do PBDA preserva quase as mesmas características do mapa reconstruído com 16 linhas de base.

Por último este mapa reconstruído, que na literatura se conhece como “mapa sujo” ou solução principal, ao fornecer as características principais do mapa original e ao não ter sido incluído componente de ruído algum prescinde de qualquer método avançado de correção e melhoria posterior das imagens.

3 O PROTÓTIPO DO ARRANJO DECIMÉTRICO BRASILEIRO

3.1 O Arranjo Decimétrico Brasileiro

O Arranjo Decimétrico Brasileiro (BDA) é um rádio telescópio em desenvolvimento sediado em Cachoeira Paulista (Latitude $22^{\circ} 41' 36''$ Sul e Longitude $45^{\circ} 00' 15''$ Oeste). Em sua configuração final o instrumento terá 38 antenas de 4 metros de diâmetro dispostas na forma de “T” com linhas de base máximas de $2\,268\text{ m}$ na direção Leste-Oeste e $1\,170\text{ m}$ na direção Sul. Uma vez em operação o arranjo terá alta resolução espacial: menos de 5 segundos de arco em $5,6\text{ GHz}$ e alta resolução temporal: $\sim 100\text{ ms}$. O BDA terá capacidade de observar fenômenos solares nas seguintes faixas protegidas de frequência: $1,2 - 1,7\text{ GHz}$, $2,8\text{ GHz}$ e $5,6\text{ GHz}$.

A primeira fase, ou Protótipo do Arranjo Decimétrico Brasileiro (PBDA), consiste em um arranjo unidimensional Leste-Oeste de 5 antenas com linhas de base de 18 a 216 m que opera na faixa de frequências $1,2 - 1,7\text{ GHz}$ e atinge a máxima resolução espacial de $\sim 3.3'$ em $1,4\text{ GHz}$ (Sawant et al., 2003; Sawant et al., 2007; Ramesh et al., 2007; Sawant et al., 2008). O PBDA está em operação regular desde finais de 2004.

A segunda fase vai usar as 5 antenas já instaladas e incluir mais 21 para formar um “T” compacto de 26 antenas, com linhas de base de 9 a 252 m na direção Leste-Oeste (17 antenas) e 9 a 162 m na direção Sul (9 antenas). Na terceira fase as últimas 12 antenas serão distribuídas, igualmente espaçadas cada 252 m , 4 antenas em cada um dos braços do T.

O BDA irá complementar as observações feitas pelo rádio-heliógrafo de Nobeyama que opera em 17 e 35 GHz (Nakajima et al., 1995), o rádio-heliógrafo de Nançay (Nançay radioheliograph group, 1993), operando em 169, 327 e 408 MHz e o rádio-heliógrafo de Gauribidanur que opera na faixa de frequência de 40 - 150 MHz (Subramanian et al., 1995). As observações combinadas dos 4 instrumentos permitirão a investigação contínua da evolução temporal de regiões ativas em diferentes altitudes na atmosfera solar, essencial para as previsões de atividade solar e o entendimento dos problemas fundamentais da física solar.

3.2 Características Básicas e Configuração do Arranjo

O protótipo do BDA consiste em um arranjo Leste-Oeste de 5 antenas parabólicas com razão focal $f/d = 0,38$, superfície de malha metálica e montagem altazimutal situado em Cachoeira Paulista (Latitude $22^{\circ} 41' 36''$ Sul e Longitude $45^{\circ} 00' 15''$ Oeste). Cada antena tem capacidade de rastreamento de 340° em azimute, e 180° em elevação, com uma precisão em apontamento menor do que 3 minutos de arco, a faixa de frequências de operação é

de 1,2 até 1,7 GHz (Sawant et al., 2003).



Figura 3.1 - Localização relativa das antenas e as correspondentes linhas de base no PBDA. Diagrama tomado de Sawant et al. (2005)

No PBDA, a disposição das antenas, Figura 3.1, foi feita visando obter uma redundância mínima de só uma linha de base e é possível obter 9 valores da função visibilidade complexa por integração.

3.2.1 A Eletrônica do *Front End*

Cada antena possui um alimentador de tipo log-periódico de dupla polarização com um ganho aproximado de 8 dB, que alimenta um amplificador de baixo ruído (LNA) com figura de ruído $\sim 1,5$ dB correspondente a 130 K, ganho de ~ 25 dB, VSWR $\sim 1,2 : 1$ (a razão de voltagens de onda estacionária é uma medida da energia fornecida pelo receptor que é refletida pelo sistema de transmissão e volta no receptor), e intermodulação -30 dB na faixa de frequências de 1,2 – 1,7 GHz. Por enquanto a operação é feita só num modo de polarização.

Na saída do alimentador é feita uma primeira filtragem com um filtro passa-alta (> 1200 MHz) para eliminar qualquer interferência embaixo dessa frequência, depois é aplicado um filtro passa-banda que restringe o sinal na faixa 1,2 – 1,7 GHz.

O receptor analógico possui três etapas de conversão de frequência, duas das quais são aplicadas na base das antenas. O primeiro oscilador local (LO1) é sintonizável na faixa de 2050 – 2500 MHz, a frequência de observação depende do ajuste nesse oscilador. A sinal de saída (IF1) passa por um filtro passa-banda centrado em $f = 836,5$ MHz, de largura de banda $\Delta f = 25$ MHz. Para uma operação em 1,4 GHz, o LO1 é ajustado em 2236 MHz.

Depois de uma amplificação intermediária o sinal (IF1) é levado até 70 MHz (IF2) usando um segundo oscilador local (LO2) de frequência 906,5 MHz. Os sinais de ambos osciladores são gerados usando um relógio de Rubídio de 10 MHz.

O sinal IF2 é enviado até a sala de controle onde passa por uma inversão de fase (*Walsh switching*) e um desdobramento nas componentes cosseno, C_i , e seno, S_i , usando um *splitter* de quadratura. Os sinais assim separados são independentemente convertidos na banda base (0 – 2,5 MHz, também chamada de banda de vídeo) usando um terceiro oscilador local (LO3) de 72,5 MHz. A sincronização de fase é garantida pelo uso do mesmo oscilador 10 MHz de Rubídio.

Os sinais na banda base de cada antena, antes de ser digitalizados a dois níveis, são alimentados no correlacionador digital de 1 bit onde seriam correlacionados para produzir 10 visibilidades complexas, e sinais auxiliares para recuperação da informação de potência total, em 2 das 5 antenas (Sawant et al., 2005).

3.2.2 Pares interferométricos e Linhas de Base

O número de pares interferométricos que é possível formar numa integração do correlacionador (modo *snapshot*) com um arranjo de N antenas é $N \times (N - 1)/2$, e quando não existe redundância nas linhas de base cada um destes pares vai produzir um coeficiente de correlação complexo diferente, i.e. um valor da função complexa de visibilidade associado a um ponto do plano (u, v) . As tabelas 3.1 e 3.2 mostram os 10 pares formados com $N = 5$ antenas, a separação das antenas e as respectivas frequências espaciais. O PBDA possui uma linha de base redundante, os pares $A1 \times A3$ e $A3 \times A5$ fornecem ambos coeficientes de correlação correspondentes à linha de base 108 m.

Tabela 3.1 - Pares interferométricos formados com o PBDA

Par	$A3 \times A4$	$A2 \times A3$	$A2 \times A4$	$A1 \times A2$	$A4 \times A5$
Dist. L.B. (m)	18	36	54	72	90
Freq. Esp. (21 cm)	86	171	257	343	429

Tabela 3.2 - Pares interferométricos formados com o PBDA (cont.)

Par	$A1 \times A3$	$A3 \times A5$	$A1 \times A4$	$A2 \times A5$	$A1 \times A5$
Dist. L.B. (m)	108	108	126	144	216
Freq. Esp. (21 cm)	514	514	600	686	1029

3.3 Correlacionador do PBDA

O correlacionador foi especificamente desenhado e construído no *Indian Institute of Astrophysics* (IIA) para ser usado na primeira fase do BDA (*BDA Correlator System*, 2002), possui 6 entradas complexas para sinais de 2,5 MHz de largura de banda, o número de canais de saída habilitados é 30 + 2, a frequência de amostragem é 5,0 MHz e o tempo de integração é ~ 105 ms.

As amostras da função visibilidade são obtidas usando correlacionadores de 1 bit de quantização (Weinreb, 1963) implementados com circuitos digitais. Um correlacionador similar é usado no Radio-heliógrafo Gauribidanur (Ramesh et al., 1998; Ramesh, 1999) e os procedimentos de calibração, correção e imageamento com dados obtidos nas observações com o PBDA, foram inspirados nas soluções implementadas nesse instrumento.

Dentro do correlacionador antes da correlação propriamente dita, os sinais são quantizados, amostrados e demodulados do *Walsh swichting*, esta demodulação tem a vantagem de minimizar correlações espúrias por *crosstalking* entre sinais de antenas diferentes e também diminuir o erro de deslocamento-DC (*DC offset*) no comparador de quantização (Ramesh, 1999; Ramesh et al., 2006).

Para observações fora do meridiano local é possível introduzir atrasos temporais nos sinais quantizados antes da correlação, usando registros de deslocamento e multiplexadores sob controle de um computador. Os atrasos podem ser programados em cada sinal de entrada desde 0 até 3,0 μ s usando intervalos fixos de 0,2 μ s. Isso significa uma decorrelação máxima de 90% em observações tipo rastreo e trânsitos fora do meridiano (Ravindra, 1983).

3.3.1 Canais de Correlação

O sistema foi construído usando 8 *chips Nobeyama*, desenhados para o Radio-heliógrafo Nobeyama em Japão (NoRH) (Nakajima et al., 1994). Cada *chip* está composto de 4 unidades de correlação complexa para a combinação de 2×2 antenas e cada unidade consiste de 4 circuitos EXOR (\oplus) em paralelo e 4 circuitos EXNOR ($\bar{\oplus}$) também em paralelo. Sejam C_1, S_1 e C_2, S_2 os sinais na banda de video fornecidas pelas antenas 1 e 2 respectivamente, as saídas do correlacionador chamadas de cosseno e seno são implementadas segundo

$$C_1 \oplus C_2 + S_1 \oplus S_2 \quad (3.1)$$

$$C_1 \oplus S_2 + S_1 \bar{\oplus} C_2 \quad (3.2)$$

Num período de integração o *chip* preenche os registros de memória com os 16 *bits* mais significativos (MSB), de um contador de 22 *bits*, com 6 *bits* menos significativos, (LSB) desabilitados internamente, assim um par de sinais completamente correlacionados na entrada produz no canal cosseno de saída a contagem máxima de $2 \times 5 \times 10^6 \times 105 \times 10^{-3}/2^6 \approx 16\ 000$. Na saída do canal seno, o mesmo par produz uma contagem de $\sim 8\ 000$, definindo o nível de não correlação (sinais em anticorrelação teriam um nível de saída perto de zero). Cada *chip* produz até 4 saídas de correlação por 2 sinais por antena, Figura 3.2. Os outros detalhes do circuito eletrônico são similares aos descritos em Ramesh (1999).

O correlacionador do PBDA apresenta 6 + 2 entradas, Figura 3.3. Isto é, entradas para 6 antenas e 2 entradas que servem para recuperar os valores do desvio padrão dos voltagens de duas antenas quaisquer, usando a função erro (*error function*) e supondo que o sinal se comporta como ruído *gaussiano* (Ravindra, 1983; Udaya Shankar, 1986; Ramesh, 1999).

$$\rho_{A_{ij}} = \sigma_i \sigma_j \rho_{C_{ij}} \quad (3.3)$$

A estimativa do desvio padrão da voltagem do sinal nas antenas (σ_i, σ_j), permite recuperar a informação de amplitude nos coeficientes de correlação digitais ($\rho_{C_{ij}}$), e estimar os valores que seriam calculados em correlacionadores analógicos ($\rho_{A_{ij}}$). A calibração de potência total do par interferométrico formado por tais antenas só pode ser feita depois da correção anterior.

Dos 32 pares de correlação na saída, 10 pares produzem a contagem acumulada no caso de correlação completa, no caso de ausência de sinal na entrada: 15 290 na saída cosseno, 7 644 na saída seno. A diferença com os valores descritos acima é devida ao tempo efetivo de integração ser menor que 105 *ms*. O valor *full correlation* do canal de saída cosseno é um dado a ser usado na correção de Van Vleck (Van Vleck; Middleton, 1966), que permite retirar os erros introduzidos na quantização dos sinais.

Nos restantes 22 pares, 4 estão reservados para o cálculo do desvio padrão em 2 de qualquer das 5 antenas, 3 *chips* são empregados em suas 4 entradas o que contabiliza $3 \times 4 = 12$ pares e 3 *chips* estão habilitados só em 2 das 4 entradas e produzem os 6 pares restantes. O diagrama na Figura 3.4 tenta esquematizar a disposição de sinais de entrada e saída no correlacionador.

3.3.2 Software do Correlacionador

O *software* original de operação do correlacionador tem sido escrito por E. Ebenezer e S. Harish, (BDA Correlator System, 2002), ele consiste de 4 programas em linguagem C:

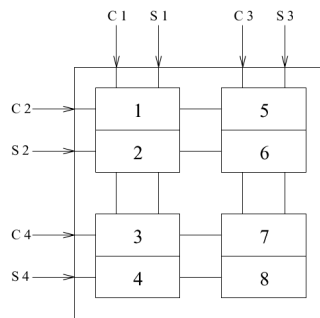


Figura 3.2 - Diagrama funcional de um chip de correlação. Tomado de Ramesh et al. (2006).

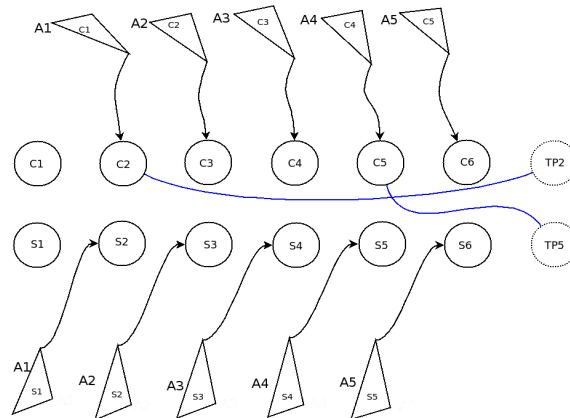


Figura 3.3 - Conexão na entrada do correlacionador usada durante as observações. A entrada 1 está permanentemente inoperante e nas entradas "Total Power" foram escolhidas as antenas 2 e 5.

- IIACQ.C, programa de inicialização do correlacionador, formatação do arquivo de aquisição: *rawdata* e ajuste do tamanho da amostra i.e tempo de observação.
- IIAZEN.C, programa de ajuste de valores de atraso para observações de fontes no zênite.
- IIATRACK.C, programa de ajuste de valores de atraso usando cálculos de ângulo horário, a ser usado no caso de observações fora do meridiano e de tipo *tracking*.
- IIADEMUX.C, programa para a demultiplexação e segunda integração dos dados do arquivo *rawdata*, i.e. criação de um arquivo matricial de 64 colunas (32×2) e um número de filas que depende do número total de amostras e da segunda integração. Este programa usa um arquivo externo chamado *Lookup.dat*, não incluído no manual de instruções, e que forneceria a ordem das correlações.

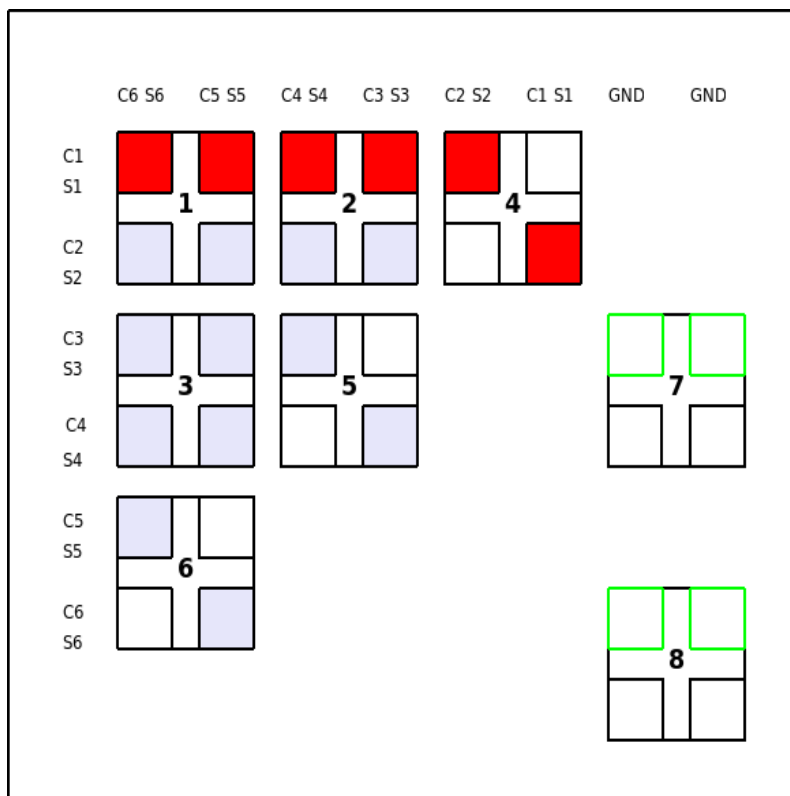


Figura 3.4 - Diagrama dos chips Nobeyama no correlacionador PBDA. Os chips são os quadrados maiores numerados de 1 a 8. Os quadrados menores representam a saída de um par de correlações (cosseno, seno), em cinzas os que estão operando atualmente, em vermelho os não operativos e os de cor branco não possuem sinal de entrada e produzem saídas *full correlation*. Os quadrados em traço verde representam as saídas chamadas de "Total Power".

Atualmente o correlacionador PBDA usa um *software* de aquisição adaptado em base aos programas anteriores:

- *bda_acq.c*, programa de inicialização do correlacionador e formatação do arquivo rawdata, substitui o IIACQ.C.
- *bda_del.c*, programa de ajuste de valores de atraso usando cálculos de ângulo horário, substitui os programas IIAZEN.C e IIATRACK.C

O programa de demultiplexação IIADEMUX.C tem sido substituído pelo programa *bda_ana.m* escrito em *MATLAB* por Ubiratán Santos Freitas e cuja última versão data de Agosto de 2006. Este programa inclui as correções de *Van Vleck* aplicadas aos coeficientes de correlação. Na saída ele fornece um arquivo matricial de 22 colunas (10 pares de correlações: cosseno, seno + 2 "Total Power") e um número de filas que depende do número total de amostras e da segunda integração.

3.3.3 Testes e Avaliação do Correlacionador

Ramesh (1999) tem descrito um conjunto de testes de avaliação dos chips (Cap. 3, Sec. 3.3) assim como procedimentos de verificação do deslocamento residual na saída do correlacionador pós demodulação *Walsh* (Sec. 3.4). A importância deste último procedimento para observações solares é explicitamente descrita a seguir:

...“Se os erros devido ao deslocamento residual variam com o nível do sinal de entrada, isso poderia ser um problema na observação de fontes extensas como o Sol, sendo que a amplitude de visibilidade observada não será a mesma sobre diferentes linhas de base”¹... (Ramesh, 1999, p.47)

No Apêndice B, Sec. B.2.1, Ramesh (1999) detalha o procedimento de calibração da voltagem limiar, V_{th} (threshold level), usado na quantização dos níveis dos sinais chamados de “Total Power” e qualifica de crucial o ajuste apropriado deste nível para a recuperação correta da informação de temperatura de brilho. Esta dissertação tenta dar ênfase na aplicação correta e periódica destes procedimentos para a obtenção de dados válidos que possam ser transformados em mapas úteis do Sol.

¹*If the errors due the residual offset varies with the level of the input signal, then there could be problem while observing extended sources like Sun since the observed visibility amplitude will not be the same over different baselines.*

4 OBSERVAÇÕES, CALIBRAÇÃO E ELABORAÇÃO DOS MAPAS

Neste capítulo são descritos os processos de observação, calibração e elaboração dos mapas a partir dos dados fornecidos pelo PBDA. São apresentadas as causas que têm corrompido, em nosso entender, os dados de correlação e são feitas algumas sugestões para a obtenção correta das correlações.

4.1 Observações

Este trabalho apresenta exemplos de mapas unidimensionais do Sol, elaborados a partir das observações feitas nos meses de Agosto a Outubro de 2007. Pelas características do arranjo e a baixa declinação do Sol ($-13.92 < \delta < 18.17$, no período das observações) se optou por fazer observações de trânsito ao redor do meio dia local com uma duração de 53.72 minutos cada uma.

Com o propósito de diminuir erros instrumentais de fase e amplitude foi feito um procedimento padrão de correção de apontamento ao início de cada dia mediante centralização da sombra dos alimentadores nos pratos da antenas, enquanto o sistema de rastreamento acompanhava o deslocamento do Sol durante alguns minutos.

A observação de *Cygnus A* ($\sim 1600Jy$, $AR\ 19h\ 59'\ 28.36''$, $Dec\ 40^\circ\ 44'\ 02.1''$, [Kuz min e Salomonovich \(1966\)](#)) faz parte das observações regulares do arranjo desde o início das operações em Cachoeira Paulista. Embora a posição dessa fonte esteja muito afastada da posição do Sol para considerá-la como uma fonte externa de calibração ([Ramesh, 1999](#)), a observação pretendia servir para estimar o feixe da antena e tentar eliminar erros sistemáticos produzidos no equipamento.

Taurus A ($\sim 1050Jy$, $AR\ 05h\ 34'\ 31.97''$, $Dec\ 22^\circ00'\ 52.1''$, [Kuz min e Salomonovich \(1966\)](#)) também é uma fonte observada regularmente. Nos dias próximos ao 14 de junho, a posição do Sol experimenta a máxima aproximação com *Taurus A* e eventualmente poderia ser usada como uma fonte calibradora externa.

Como será apresentado a degradação das correlações dificulta a obtenção algum tipo de calibração instrumental ou outra informação útil e confiável das fontes mencionadas acima.

4.2 Procedimento observacional

O seguinte é o procedimento observacional detalhado implementado para observações solares e de fontes calibradoras

1. Cálculo das coordenadas (elevação e azimute) de fonte a ser observada usando

o programa **XEphem** e geração do arquivo de coordenadas ou *tag file* (tabela com hora, azimute e elevação durante todo o período observacional para a fonte escolhida).

2. Ligar e verificar a tensão de todas as fontes de alimentação.
3. Ligar e verificar o funcionamento dos microcomputadores que controlam a aquisição de dados e as antenas.
4. Ligar os motores das antenas.
5. Executar o ajuste da frequência de operação dos receptores (sintetizador de frequências).
6. Verificar e ajustar os níveis dos receptores - dependendo da fonte a ser observada: Sol ou fonte calibradora - dentro da faixa de -32 a -38 *dB* fora da fonte.
7. Executar o programa de comando das antenas. O primeiro passo é o *homing* (azimute e elevação) para a referência de posição das antenas.
8. Copia do arquivo de coordenadas para o microcomputador de controle das antenas.
9. Definir o modo de observação (trânsito ou rastreio) da fonte escolhida.
10. Fazer o apontamento da fonte a ser observada de acordo com o modo de observação escolhido (trânsito ou rastreio).
 - a. No modo trânsito deve-se apontar para as coordenadas correspondentes ao instante de tempo da metade do período definido para a duração das observações.
 - b. No modo rastreio a fonte deve ser apontada para as coordenadas correspondentes ao início da observação da fonte, pois a partir de então a posição da antena vai sendo corrigida de acordo com o arquivo das coordenadas calculadas para aquela fonte.
11. Depois que as antenas estiverem apontadas na fonte, executar o programa de aquisição de dados entrando com as coordenadas de apontamento das antenas (dependendo do modo de observações - trânsito ou rastreio) e calcular os atrasos geométricos correspondentes ao modo de observação escolhido para a fonte a ser observada.
12. Após o comando de início da aquisição de dados aguardar o início da aquisição para verificar se o programa e o correlacionador estão funcionando corretamente.

13. Imediatamente após o início da aquisição de dados rodar o programa de visualização das franjas em tempo real para verificação do funcionamento da aquisição de dados e a qualidade dos dados que estão sendo adquiridos, ou mesmo algum eventual problema durante o processo de aquisição dos dados.
14. Considerando que o processo de aquisição dos dados transcorreu de forma correta, após o registro do arquivo de dados no disco rígido do microcomputador de aquisição, gravar o nome e uma cópia de segurança do arquivo de dados. O nome dos arquivos de dados deve ser uniformizado seguindo o seguinte padrão: *r_aaaammdd_hhmmss.fonte* (arquivo de dados brutos rawdata, ano, mês, dia e hora, minuto e segundo do tempo sideral da observação - como definido acima - *.sun*, *.tau*, *.cyg* dependendo da fonte observada). Renomear o arquivo tag com o nome correspondente ao arquivo de dados (*tag_aaaammdd_hhmmss.fonte*).

4.3 Processamento de dados

Como foi descrito no capítulo anterior, o correlacionador fornece um arquivo de dados chamado *rawdata* de tamanho proporcional ao tempo de observação. Para uma observação de ~ 53 minutos cada arquivo alcança um tamanho de 13,2 MB. Os arquivos *rawdata* são gravados num disco rígido e podem ser recuperados para processamento posterior.

A operação de demultiplexação com uma leve modificação, é aplicada como uma subrotina do programa de visualização de franjas chamado *seefringes_redux.m* feito também em *MATLAB*, ver apêndice A. Presença de ruído de diferentes origens é eliminada aplicando filtros passa - bandas *Butterworth* em cada visibilidade com o programa *bw_filter_redux.m*. Depois deste processamento inicial, os dados devem ser calibrados em amplitude e fase.

4.3.1 Calibração da Visibilidade

São descritos os procedimentos de calibração de amplitude e fase ensaiados no PBDA. Eles estão baseados nos procedimentos de calibração feitos por [Ramesh \(1999\)](#) no Radio-heliógrafo Gauribidanur.

4.3.2 Calibração de Amplitude

Os termos de amplitude poderiam conter erros devido a diferenças de ganho entre as antenas e seus respectivos canais de recepção. O procedimento de calibração está baseado na observação de fontes consideradas pontuais. A deflexão produzida pelos pares interferométricos, na saída do correlacionador, deveria ser sempre a mesma se a fonte fosse verdadeiramente pontual ou deveria diminuir segundo um padrão *gaussiano* caso fosse

resolvida nas linhas de base maiores.

Ramesh (1999) usa esta calibração externa supondo que os erros em amplitude são pequenos comparados com os erros de fase. Assim, as deflexões observadas na observação solar são corrigidas segundo:

$$(G_{ij}^{true})_{Sol} = (G_{ij}^{obs})_{Sol} \left(\frac{G_{ij}}{G_{max}} \right)_{cal} \quad (4.1)$$

onde (G_{ij}^{true}) , é a amplitude corrigida da linha de base ij , (G_{ij}^{obs}) é a amplitude observada da mesma linha de base durante a observação solar, e (G_{ij}/G_{max}) o fator de correção obtido a partir da calibração da fonte considerada pontual.

As deflexões de amplitude obtidas com o PBDA na observação do Sol, *Cygnus A* e *Taurus A*, mostram anomalias que poderiam ser atribuídas a deslocamentos residuais ainda depois da correção *Walsh*, como foi descrito no capítulo anterior. Note na Figura 4.1 como a linha de base que corresponde a 36 m (pos. 3) apresenta uma amplitude superior as outras, incluindo à linha de base de 18 m (pos. 2). Esta característica é recorrente nas observações feitas entre junho e dezembro de 2007 e também nas observações feitas durante o ano 2008.

A Figura 4.2 mostra uma alternância anômala das amplitudes de *Cygnus A*. A causa desta anomalia é também atribuível a deslocamentos residuais pós-*Walsh* com o agravante de ter *Cygnus A* e *Taurus A* muito menores fluxos que o Sol e portanto serem mais sensíveis ao ruído.

A alternativa foi primeiro “calibrar” as fontes calibradoras usando um modelo simples de fonte pontual, Figura 4.3, uma gaussiana de largura a média potência de 2,6', supondo que ela deveria ser submetida a mesma degradação que os mapas simulados do capítulo 2. Logo, é só repetir o esquema de calibração usado no Sol, desta vez para a calibradora

$$(G_{ij}^{true})_{cal} = (G_{ij}^{obs})_{cal} \left(\frac{G_{ij}}{G_{max}} \right)_{mod} \quad (4.2)$$

Ao voltar à calibração do Sol na Eq. 4.1, foram usados os valores corrigidos da calibradora $(G_{ij}^{true}/G_{max}^{true})_{cal}$. Os resultados, Figura 4.4, ainda são insatisfatórios, pois as mudanças nos valores de amplitude distam de ser os esperados segundo as simulações do Cap. 2. Em outros casos, a calibração não corrige apropriadamente a anomalia da linha de base 36 m, como na observação do dia 03 de setembro de 2007 mostrada na Figura 4.5.

Outros esquemas de calibração das visibilidades: auto-calibração, calibração por redundância, etc., incluem calibração simultânea das fases, porém, antes de implementar soluções

desse tipo é necessário diminuir as influências da limitada calibração instrumental do correlacionador, i.e. verificar o correto funcionamento dos *chips* no correlacionador e aplicar os testes mencionados no Capítulo 3. Uma limitada calibração instrumental do correlacionador viola o suposto básico de calibração independente de amplitudes, porque os erros não podem ser atribuídos às diferenças menores nos ganhos dos sistemas de recepção nas antenas.

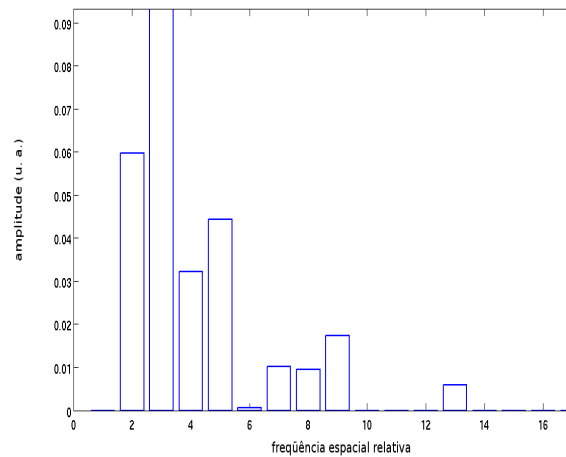


Figura 4.1 - Espectro de amplitudes de visibilidade do Sol no dia 21 de setembro de 2007. A amplitude da linha de base de 36 m (pos. 3) é maior que as outras linhas de base. Essa anomalia é atribuível a um erro instrumental mais que à emissão solar.

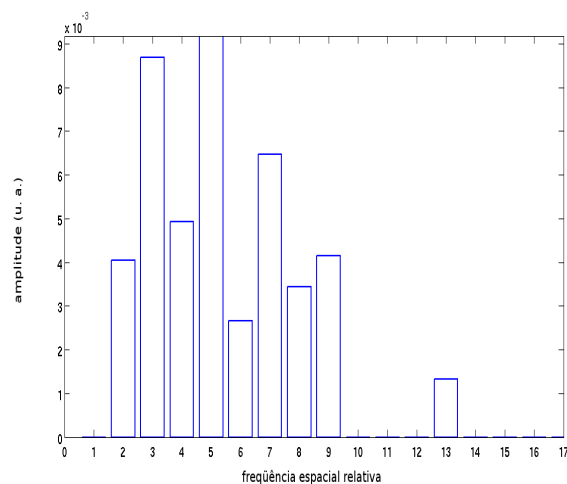


Figura 4.2 - Espectro de amplitudes de visibilidade de *Cygnus A* no dia 21 de setembro de 2007. As amplitudes mostram um comportamento anômalo com a alternância de valores acima e abaixo de 5×10^{-3} .

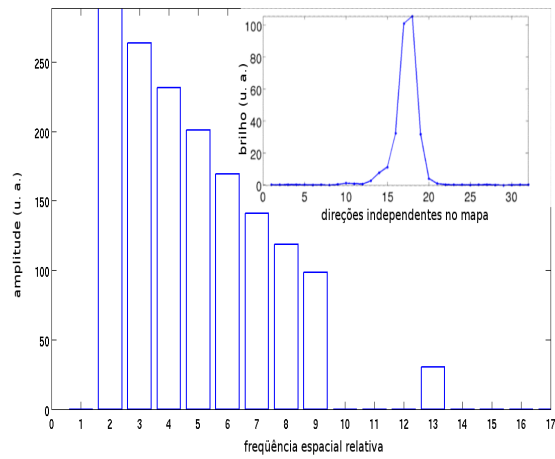


Figura 4.3 - Espectro de amplitudes de visibilidade do modelo de fonte pontual. O mapa unidimensional do modelo se mostra inserido na mesma figura.

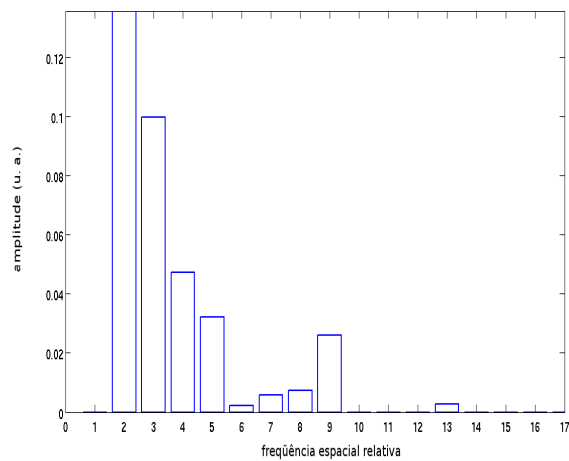


Figura 4.4 - Espectro de amplitudes do Sol no dia 21 de setembro depois da calibração. As amplitudes corrigidas ficam ainda muito diferentes dos valores esperados segundo as simulações.

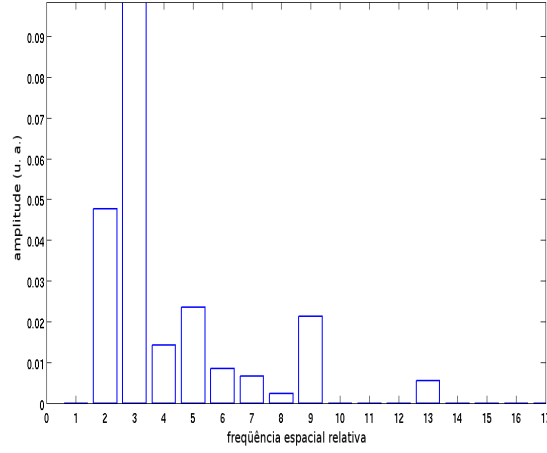


Figura 4.5 - Espectro de amplitudes do Sol no dia 03 de setembro depois da calibração. A anomalia na amplitude da linha de base 36 m persiste depois da calibração.

4.3.3 Calibração de Fase

A calibração de fases no PBDA baseia-se nas soluções implementadas no Radio-heliógrafo Gauribidanur por [Ramesh \(1999\)](#) que por sua vez baseia-se nos trabalhos de [Jennison \(1958\)](#). A suposição básica é que as principais fontes de erro na fase verdadeira, ϕ_{ij}^{true} , de uma linha de base ij qualquer, são atribuíveis à erros de fase nas componentes individuais

$$\phi_{ij}^{obs} = \phi_{ij}^{true} + \phi_i^{err} - \phi_j^{err} \quad (4.3)$$

Os erros de fase individuais, $\phi_i^{err}, \phi_j^{err}$ podem ser eliminados agrupando grupos fechados de 3 ou mais antenas (*closure phase relation*)

$$\theta_{ijk} = \phi_{ij}^{obs} + \phi_{jk}^{obs} - \phi_{ik}^{obs} \quad (4.4)$$

as expressões que resultam são iguais às relações fechadas dos valores verdadeiros de fase,

$$\theta_{ijk} = \phi_{ij}^{true} + \phi_{jk}^{true} - \phi_{ik}^{true} \quad (4.5)$$

O número de relações *closure phase* que é possível formar num arranjo de N antenas, agrupando três antenas por vez é, $N(N-1)/2$, das quais só $(N-1)(N-2)/2$ são relações linearmente independentes ([Thompson et al., 1986](#); [Wohlleben et al., 1991](#)). O PBDA é um arranjo de $N = 5$ antenas e, portanto, das 10 possíveis relações de fase, só 6 são linearmente independentes.

As fases verdadeiras são 10, uma para cada linha de base, porém a redundância nas linhas de base $A1 \times A3$ e $A3 \times A5$, reduz o número de incógnitas a 9. Pode-se eliminar mais uma incógnita assumindo que a fase da menor linha de base $A3 \times A4$ é zero. A consequência da última suposição é uma incerteza de $\pm\pi$ na fase de esta linha de base, que deverá ser corrigida no momento de construir o mapa.

O sistema de equações que resolve as fases verdadeiras do PBDA tem 8 incógnitas e só 6 equações. Aumentando outras duas relações *closure* que são linearmente dependentes das 6 iniciais, resulta num sistema indeterminado com matriz singular. É necessário resolver numericamente o seguinte sistema para encontrar valores estimados das fases verdadeiras

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{23} \\ \phi_{24} \\ \phi_{12} \\ \phi_{45} \\ \phi_{13} \\ \phi_{14} \\ \phi_{25} \\ \phi_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_{123} \\ \theta_{134} \\ \theta_{145} \\ \theta_{245} \\ \theta_{124} \\ \theta_{125} \\ \theta_{235} \\ \theta_{345} \end{pmatrix}$$

A solução do sistema depende da inversão da matriz singular, isso é feito com o operador **pinv** do *MATLAB* que calcula a pseudo-inversa *Moore - Penrose*. O cálculo esta baseado na técnica de decomposição em valores singulares (*singular value decomposition*, SVD) ([Mathworks, MATLAB, 2008](#)). A matriz pseudo-inversa obtida é a seguinte

$$\begin{pmatrix} 0,375 & 0,125 & 0 & -0,125 & -0,125 & 0 & 0,375 & 0,125 \\ -0,125 & -0,375 & 0 & 0,375 & 0,375 & 0 & -0,125 & -0,375 \\ 0,203 & -0,103 & 0,011 & 0,025 & 0,225 & 0,211 & 0,047 & -0,147 \\ -0,022 & 0,422 & 0,211 & 0,100 & -0,100 & 0,011 & 0,022 & 0,578 \\ -0,222 & 0,222 & 0,111 & 0 & 0 & 0,111 & 0,222 & -0,222 \\ -0,022 & -0,578 & 0,211 & 0,100 & -0,100 & 0,011 & 0,022 & -0,422 \\ -0,047 & 0,147 & 0,011 & -0,225 & -0,225 & 0,211 & -0,203 & 0,103 \\ 0,056 & -0,056 & -0,278 & 0 & 0 & -0,278 & -0,056 & 0,056 \end{pmatrix}$$

[Ramesh \(1999\)](#) ao resolver um sistema de 15 equações e 16 incógnitas estima os erros residuais nas fases e conclui que estas são recuperadas com uma incerteza de 6,25%. Considerando que $1/16 = 0,0625$, poderíamos forçar a analogia no sistema do PBDA e

prever um erro de 25%, ($2/8 = 0,25$) nas fases recuperadas. A análise em detalhe consiste em escrever por extenso as soluções da equação matricial

$$\begin{aligned}\phi_{23} &= 0,375\theta_{123} + 0,125\theta_{134} - 0,125\theta_{145} - 0,125\theta_{245} + 0,375\theta_{235} + 0,125\theta_{345} \\ \phi_{24} &= -0,125\theta_{123} - 0,375\theta_{134} + 0,125\theta_{375} + 0,375\theta_{124} - 0,125\theta_{235} + 0,125\theta_{345} \\ &\dots\end{aligned}$$

substituir os valores dos θ_{ijk} segundo a equação 4.4, e obter relações da forma

$$\begin{aligned}\phi_{23} &= 0,75\phi_{23} - 0,25(\phi_{24} + \phi_{12} - \phi_{25}) \\ \phi_{24} &= 0,75\phi_{24} - 0,25(\phi_{23} + \phi_{25} - \phi_{12}) \\ &\dots\end{aligned}$$

que mostra as fases verdadeiras em função das fases observadas e revela incertezas de 25% nas duas primeiras fases e valores ainda maiores para as outras, entre $\sim 36\%$ e 44% . Isso significa que a solução de *closure phase* sugerida e implementada no PBDA fornece uma pobre recuperação de fase que varia entre $\sim 56\%$ e 75% das fases verdadeiras.

Finalmente, para demonstrar como as incertezas em fase afetam a construção dos mapas foi implementada a correção de *closure phase* na simulação unidimensional do Sol do dia 19 de junho de 2007, Figura 4.6. O artefato formado na parte superior poderia ser tomado equivocadamente como um abrilhantamento real no disco solar.

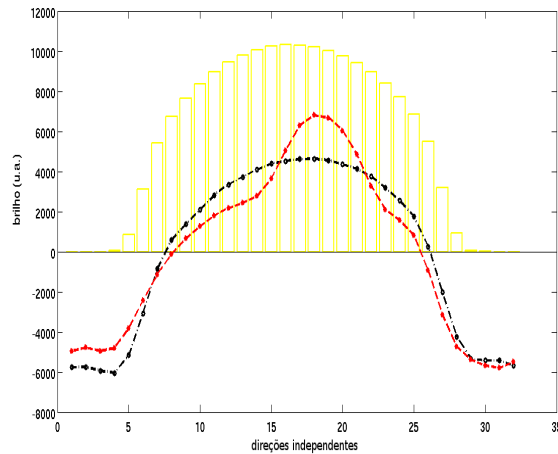


Figura 4.6 - Mapa simulado do Sol submetido a correção *closure phase*. As barras amarelas representam o mapa original, o traco em preto é o mapa recuperado sem *closure phase* e o mapa em traço vermelho com o falso abrilhantamento, é o mapa recuperado aplicando *closure phase*.

4.3.4 Mapas

Vistas as limitações de ordem teórica e as dificuldades instrumentais encontradas na elaboração de mapas unidimensionais do Sol, são apresentados aqui alguns exemplos representativos de mapas feitos com dados obtidos no período de maio a setembro de 2007. Nos mapas em vermelho foi aplicada a correção de fase por *closure phase*, nos mapas em verde não foi aplicada correção de fase nenhuma, e em ambos foi aplicada a correção de amplitude.

Nenhum dos mapas apresenta as características esperadas segundo as simulações do Capítulo 2. O mapa que melhor parece recuperar a forma de capacete (emissão de Sol calmo) é o primeiro, Figura 4.7, embora a largura seja menor que a esperada. Todos os demais mapas, Figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, apresentam uma estrutura em forma de “W” que reflete a forte influência em amplitude e fase do sinal espúrio na linha de base de 36 *m*, como se o mapa tivesse uma fonte com largura igual a metade do campo total. O código que implementa as correções de fase e amplitude está incluído no apêndice B

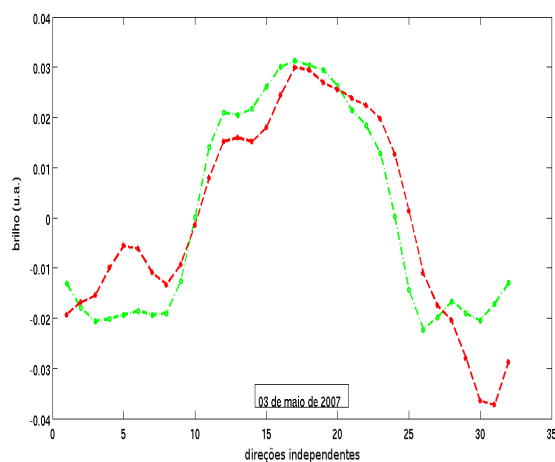


Figura 4.7 - Mapa do Sol do dia 03 de maio de 2007 obtido com o PBDA. No vermelho foi aplicada a correção de fase por *closure phase*, no verde não foi aplicada correção de fase nenhuma. A escala angular corresponde a 32 direções independentes dentro do campo de visão de $\sim 42'$. A escala de intensidade não está calibrada e não tem sido corrigido o deslocamento vertical pela ausência da linha de base zero.

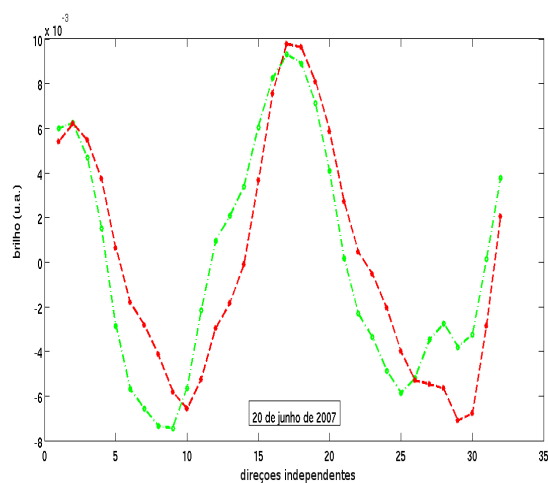


Figura 4.8 - Mapa do Sol do dia 19 de junho de 2007 obtido com o PBDA. No vermelho foi aplicada a correção de fase por *closure phase*, no verde não foi aplicada correção de fase nenhuma. A escala angular corresponde a 32 direções independentes dentro do campo de visão de $\sim 42'$. A escala de intensidade não está calibrada e não tem sido corrigido o deslocamento vertical pela ausência da linha de base zero.

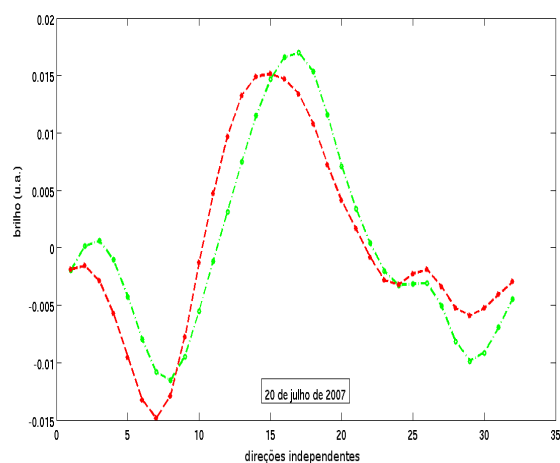


Figura 4.9 - Mapa do Sol do dia 20 de julho de 2007 obtido com o PBDA. No vermelho foi aplicada a correção de fase por *closure phase*, no verde não foi aplicada correção de fase nenhuma. A escala angular corresponde a 32 direções independentes dentro do campo de visão de $\sim 42'$. A escala de intensidade não está calibrada e não tem sido corrigido o deslocamento vertical pela ausência da linha de base zero.

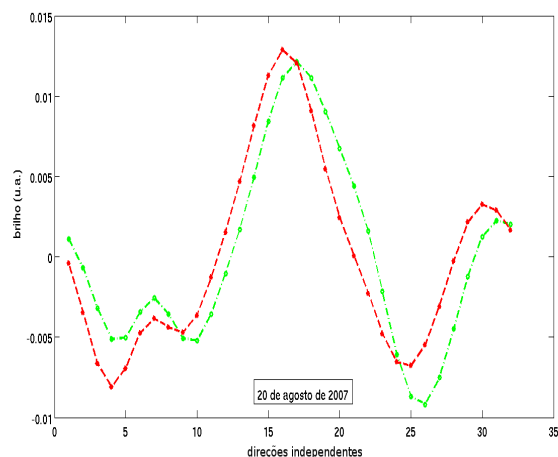


Figura 4.10 - Mapa do Sol do dia 20 de agosto de 2007 obtido com o PBDA. No vermelho foi aplicada a correção de fase por *closure phase*, no verde não foi aplicada correção de fase nenhuma. A escala angular corresponde a 32 direções independentes dentro do campo de visão de $\sim 42'$. A escala de intensidade não está calibrada e não tem sido corrigido o deslocamento vertical pela ausência da linha de base zero.

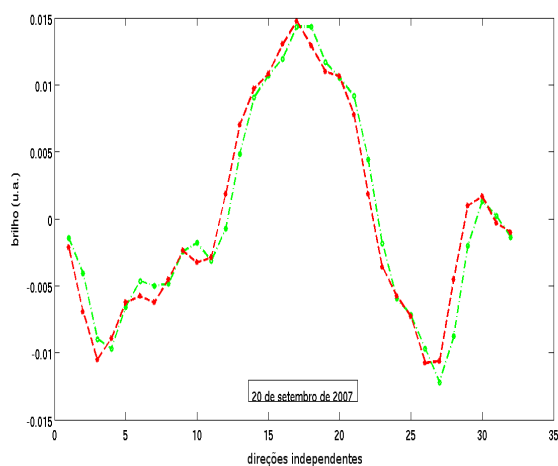


Figura 4.11 - Mapa do Sol do dia 20 de setembro de 2007 obtido com o PBDA. No vermelho foi aplicada a correção de fase por *closure phase*, no verde não foi aplicada correção de fase nenhuma. A escala angular corresponde a 32 direções independentes dentro do campo de visão de $\sim 42'$. A escala de intensidade não está calibrada e não tem sido corrigido o deslocamento vertical pela ausência da linha de base zero.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

- A simulação de mapas unidimensionais em condições ideais (ausência de ruído) mostra que o PBDA é um arranjo prototípico e experimental com limitada capacidade em resolução espacial e baixa resposta dinâmica.
- O PBDA poderia estar operando abaixo de suas limitadas capacidades como mostra o fato de não produzir mapas unidimensionais que reproduzam características básicas do Sol calmo, como o diâmetro angular correto. Não tem sido possível testar a resolução teórica máxima do arranjo, $\sim 3,3'$ pois não foi possível construir mapas de fontes consideradas pontuais (*Cygnus A* e *Taurus A*).
- A degradação na qualidade dos dados de amplitude que o PBDA fornece, não pode ser corrigida usando a calibração externa com as fontes *Cygnus A* e *Taurus A*, que foi implementada como procedimento para construção de mapas. Os erros em amplitude dos dados de visibilidade não podem ser atribuídos à pequenas diferenças de ganho no sistema de recepção das antenas.
- As calibrações de fase usando a técnica *closure phase* sugerida e implementada no PBDA, não resulta apropriada pelas poucas antenas e a baixa redundância de linhas de base do arranjo. As fases são recuperadas com erros de fase de 25% ou maiores.

5.2 Sugestões

- Como parece sugerir o mapa do 03 de maio de 2007 com relação aos outros de data posterior, os dados de visibilidade poderiam ter sofrido uma degradação progressiva no tempo. Uma revisão exaustiva do arquivo de observações do PBDA, desde o início das operações serviria para descobrir a natureza de tal degradação.
- O PBDA tem produzido franjas de visibilidade desde o início das operações, mas isso não garante a obtenção de mapas confiáveis se a calibração do correlacionador é duvidosa. Por isso é necessária a revisão e implementação dos procedimentos de calibração instrumental do correlacionador como estão descritos em [Ramesh \(1999\)](#), [Ramesh et al. \(2006\)](#).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aschwanden, M. J. **Physics of the Solar Corona. An Introduction.** [S.l.]: Physics of the Solar Corona, 2004. 8-14 p. [24](#), [25](#)
- Bárta, M.; Karlický, M. Radio Signatures of Solar Flare Reconnection. **Astrophysical Journal**, v. 631, p. 612–617, set. 2005. [26](#)
- BDA Correlator System. **Instruction Manual.** [S.l.]: Indian Institute of Astrophysics, Publicação Interna do projeto BDA, 2002. 30 p. [52](#), [53](#)
- Bracewell, R. N. **The Fourier transform and its applications.** [S.l.]: The Fourier transform and its applications / Ronald N. Bracewell. Boston : McGraw Hill, c2000. (McGraw-Hill series in electrical and computer engineering. Circuits and systems), 2000. [30](#), [37](#)
- Christiansen, W. N.; Hogbom, J. A. **Radiotelescopes /2nd edition/.** [S.l.]: Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1985, 273 p., 1985. 104-107 p. [19](#), [20](#), [27](#), [29](#)
- Cooley, J. W.; Tukey, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. **Mathematics of Computation**, v. 19, n. 90, p. 297–301, 1965. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2003354>>. [31](#), [37](#)
- Dulk, G. A. Radio emission from the sun and stars. **Annual Review of Astronomy & Astrophysics**, v. 23, p. 169–224, 1985. [25](#)
- Dulk, G. A.; Sheridan, K. V.; Smerd, S. F.; Withbroe, G. L. Radio and EUV observations of a coronal hole. **Solar Physics**, v. 52, p. 349–367, maio 1977. [24](#)
- Fürst, E. The quiet sun at cm- and mm-wavelengths. In: Kundu, M. R.; Gergely, T. E. (Ed.). **Radio Physics of the Sun.** [S.l.: s.n.], 1980. (IAU Symposium, v. 86), p. 25–39. [24](#)
- Gary, D. E.; Keller, C. U. (Ed.). **Solar and Space Weather Radiophysics - Current Status and Future Developments**, v. 314 de **Astrophysics and Space Science Library**, (Astrophysics and Space Science Library, v. 314). [S.l.: s.n.], 2004. 287-303 p. [24](#)
- Grechnev, V. V.; Lesovoi, S. V.; Smolkov, G. Y.; Krissinel, B. B.; Zandanov, V. G.; Altyntsev, A. T.; Kardapolova, N. N.; Sergeev, R. Y.; Uralov, A. M.; Maksimov, V. P.; Lubyshev, B. I. The Siberian Solar Radio Telescope: the current state of the instrument, observations, and data. **Solar Physics**, v. 216, p. 239–272, set. 2003. [33](#)

- James, J. F. **A Student's Guide to Fourier Transforms**. [S.l.: s.n.], 2003. 30
- Jennison, R. C. A phase sensitive interferometer technique for the measurement of the Fourier transforms of spatial brightness distributions of small angular extent. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 118, p. 276–+, 1958. 63
- Kuz'min, A. D.; Salomonovich, A. E. **Radioastronomical methods of antenna measurements**. [S.l.]: Radioastronomical methods of antenna measurements, by Kuz'min, A. D.; Salomonovich, A. E. New York, Academic Press, 1966., 1966. 23, 24, 57
- Mathworks, MATLAB. **MATLAB Documentation**. 2008. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html>>. Acesso em: 28 dic. 2008. 64
- MIT Radio Astronomy Tutorial. **Haystack Observatory**. Boston, 2008. Disponível em: <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/materials/RA_tutorial.html>. Acesso em: 28 dic. 2008. 22
- Moore, R.; McKenzie, D. L.; Svestka, Z.; Widing, K. G.; Antiochos, S. K.; Dere, K. P.; Dodson-Prince, H. W.; Hiei, E.; Krall, K. R.; Krieger, A. S.; Mason, H. E.; Petrosso, R. D.; Pneuman, G. W.; Silk, J. K.; Vorpahl, J. A.; Withbroe, G. L. The thermal X-ray flare plasma. In: **Solar flares**, p. 341 - 409. [S.l.: s.n.], 1980. p. 341–409. 25
- Nakajima, H.; Nishio, M.; Enome, S.; Shibasaki, K.; Takano, T.; Hanaoka, Y.; Torii, C.; Sekiguchi, H.; Bushimata, T.; Kawashima, S.; Shinohara, N.; Irimajiri, Y.; Koshiishi, H.; Kosugi, T.; Shiomi, Y.; Sawa, M.; Kai, K. The nobeyama radioheliograph. **Proceedings of the IEEE**, v. 82, n. 5, p. 705–713, May 1994. ISSN 0018-9219. 52
- _____. NEW NOBEYAMA RADIO HELIOGRAPH. **Journal of Astrophysics and Astronomy Supplement**, v. 16, p. 437–+, 1995. 49
- Nançay radioheliograph group. The Nançay multifrequency radioheliograph: New developments and data acquisition for the solar physics community. **Advances in Space Research**, v. 13, p. 411–414, set. 1993. 49
- Nindos, A.; Aurass, H.; Klein, K.-L.; Trottet, G. Radio Emission of Flares and Coronal Mass Ejections. **Solar Physics**, p. 163–+, out. 2008. 25
- Ohyama, M.; Shibata, K. X-Ray Plasma Ejection Associated with an Impulsive Flare on 1992 October 5: Physical Conditions of X-Ray Plasma Ejection. **Astrophysical Journal**, v. 499, p. 934–+, maio 1998. 26

Ramesh, R. Tese (Doutorado) — , Bangalore University, (1999), 1999. [52](#), [53](#), [56](#), [57](#), [59](#), [60](#), [63](#), [64](#), [69](#)

Ramesh, R.; Rajan, M. S. S.; Sastry, C. V. The 1024 channel digital correlator receiver of the Gauribidanur radioheliograph. **Experimental Astronomy**, v. 21, p. 31–40, fev. 2006. [52](#), [54](#), [69](#)

Ramesh, R.; Sawant, H. S.; Cecatto, J. R.; Faria, C.; Fernandes, F. C. R.; Kathiravan, C.; Suryanarayana, G. S. Brazilian Decimetre Array (Phase-1): Initial solar observations. **Advances in Space Research**, v. 39, p. 1451–1453, 2007. [49](#)

Ramesh, R.; Subramanian, K. R.; Sundararajan, M. S.; Sastry, C. V. The Gauribidanur Radioheliograph. **Solar physics**, v. 181, p. 439–453, ago. 1998. [52](#)

Ravindra, D. K. Tese (Doutorado) — , Indian Institute of Science, Bangalore, (1983), 1983. [29](#), [52](#), [53](#)

Sawant, H. S.; Cecatto, J. R.; Fernandes, F. C. R.; Alonso, E. M. B.; Andrade, M. C.; Cicconello, L. F. S.; Cassiano, A. B.; Moraes, L. C. P.; Madsen, F. R. H.; Silva, M. J. B.; Vilas Boas, J. W. S.; Souza, K. L. R.; Rosa, R. R.; Faria, C.; Stephany, S.; Silva, J. D. S.; Cividanes, L. B. T.; Miranda, C. A. I.; Vila, I. O. G.; Correia, B. S. M.; Vilas Boas, J. V.; Ribeiro, M. S.; Sato, N.; Botti, L. C. L.; Silva, C. M. **Brazilian decimetric array - BDA: the first latin american decimetric interferometer**. São José dos Campos, 2008. 65 p. Disponível em: <http://mtc-m17.sid.inpe.br/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/03.03.18.56>. [49](#)

Sawant, H. S.; Neri, J. A. C. F.; Fernandes, F. C. R.; Cecatto, J. R.; Sankararaman, M. R.; Faria, C.; Stephany, S.; Rosa, R. R.; Andrade, M. C.; Alonso, E. M. B.; Lüdke, E.; Subramanian, K. R.; Ramesh, R.; Sundararajan, M. S.; Ananthakrishnan, S.; Swarup, G.; Boas, J. W. V.; Botti, L. C. L.; Moron, C. E.; Saito, J. H. A low cost steerable radio-telescope. **Advances in Space Research**, v. 32, p. 2715–2720, 2003. [49](#), [50](#)

Sawant, H. S.; Ramesh, R.; Cecatto, J. R.; Faria, C.; Fernandes, F. C. R.; Rosa, R. R.; Andrade, M. C.; Stephany, S.; Cividanes, L. B. T.; Miranda, C. A. I.; Botti, L. C. L.; Boas, J. W. S. V.; Saito, J. H.; Moron, C. E.; Mascarenhas, N. D.; Subramanian, K. R.; Sundararajan, M. S.; Ebenezer, E.; Sankararaman, M. R. Brazilian Decimetric Array (Phase-I). **Solar Physics**, v. 242, p. 213–220, maio 2007. [49](#)

Sawant, H. S.; Silva, J. D. S.; Cividanes, L. B. T.; Cecatto, J. R.; Miranda, C. A. I.; Vila, I. O. G.; Galvão, B. S. M. C.; Vilas Boas, J. V.; Ribeiro, M. S.; Sato, N.; Botti, L. C. L.; Vilas Boas, J. W. S.; Silva, C. M.; Saito, J. H.; Moron, C. E.; Fernandes, F. C. R.; Mascarenhas, N. D.; Abrão, I. C.; Subramanian, K. R.; Ramesh, R.;

Sundararajan, M. S.; Ebenezer, E.; Souza, K. L. R.; Swarup, G.; Ananthakrishnan, S.; Sankararaman, M. R.; Nagarathnam, N. V.; Alonso E. M. Sondur, A. V.; Gary, D. E.; Welch, W. J.; Andrade, M. C.; Cicconello, L. F. S.; Costa, C. A. A.; Madsen, F. R. H.; Silva, M. J. B.; Souza, A. O.; Rosa, R. R.; Faria, C.; Stephany, S.; Bethi, N. K.

Brazilian decimetric array - BDA: o primeiro interferômetro decimétrico da américa latina. INPE, 2005. 71 p. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1916/2005/09.28.14.46?languagebutton=pt-BR>>. Acesso em: 15 dez. 2007. 50, 51

Silva, A. V. R. Solar Radio Astronomy. In: de Gouveia dal Pino, E. M.; Lugones, G.; Lazarian, A. (Ed.). **Magnetic Fields in the Universe: From Laboratory and Stars to Primordial Structures.** [S.l.: s.n.], 2005. (American Institute of Physics Conference Series, v. 784), p. 90–102. 25

Stahli, M.; Benz, A. O. Microwave emission of solar electron beams. **Astronomy and Astrophysics**, v. 175, p. 271–276, mar. 1987. 26

Subramanian, K. R.; Sundara-Rajan, M. S.; Ramesh, R.; Sastry, C. V. Gauribidanur Radio Heliograph. **Journal of Astrophysics and Astronomy Supplement**, v. 16, p. 448–+, 1995. 49

Tanuma, S.; Shibata, K. Internal Shocks in the Magnetic Reconnection Jet in Solar Flares: Multiple Fast Shocks Created by the Secondary Tearing Instability. **Astrophysical Journal**, v. 628, p. L77–L80, jul. 2005. 26

Thompson, A. R.; Moran, J. M.; Swenson, G. W. **Interferometry and synthesis in radio astronomy.** [S.l.]: New York, Wiley-Interscience, 1986, 554 p., 1986. 63

Udaya Shankar, N. **Application of digital techniques to radio astronomy measurements.** Tese (Doutorado) — Bangalore University, 1986. 53

Van Vleck, J.; Middleton, D. The spectrum of clipped noise. **Proceedings of the IEEE**, v. 54, n. 1, p. 2–19, Jan. 1966. ISSN 0018-9219. 53

Weinreb, S. **Technical Report No. 412, A Digital Spectral Analysis Technique and its Application to Radio Astronomy.** [S.l.]: MIT Research Lab. of Electronics, Boston, U.S.A., 1963. 119 p. 52

Wohlleben, R.; Mattes, H.; Krichbaum, T. **Interferometry in radioastronomy and radar techniques.** [S.l.]: Dordrecht: Kluwer, 1991, 1991. 63

A APÊNDICE A - PROCESSAMENTO DE DADOS DO PBDA

SEEFRINGES_REDUX

```
%% PROGRAM seefringes_redux %%
%% Valle Silva 2008 %%
clear all;
close all;

%%%%%%%%llamada del archivo de datos (rawdata)%%%%%%%%
FC = input('Entry the file name (<*. *>) : ','s');
filenameFC =load (FC);
NSamp_FC=input('Input samples number for averaging: '); % tomar 30 pontos
dec=input('Entry the declination (degrees) (<*. *>) : ');
[F,Ac] = bda_ana_redux(filenameFC,NSamp_FC);
data = F;

nlin = 10; % numero de l-b
nobs = length(data); % 61440/(2*NSamp_FC) data COS + data SIN para cada l-b

mitad_tiempo_obs=nobs*0.105*NSamp_FC/3600; % timehour
vaf=15; %velocidad angular da fonte no instante da culminacao (degree/timehour)
escala_angular=mitad_tiempo_obs*vaf*cosd(dec);% degree
axxis=linspace(-escala_angular,escala_angular,nobs); %degree

TPA=data(:,21);
TPB=data(:,22);

figure(21)
    plot(axxis,TPA,'k')
    hold on
    plot(axxis,TPB,'r')

for k=1:nlin
    cos_intermed(:,k)=data(:,k*2-1);
    sen_intermed(:,k)=data(:, k*2);
    signal(:,k)=complex(cos_intermed(:,k),sen_intermed(:,k));
```

```

figure(k)
plot(axxis,cos_intermed(:,k),'b')
hold on %y
plot(axxis,sen_intermed(:,k),'r')
end

```

BDA_ANA_REDUX

```

function [F,Ac] = bda_ana_redux(raw,n_ave)
% BIRA_ANA - Processa o arquivo rawdata
% Processa o arquivo rawdata, separando as correlações e
% retornando as franjas

% Ubiratan Santos Freitas
% DAS/INPE 08/2006
% modificado por Valle Silva 04/2008

% O arquivo original é uma matriz de Nx64, armazenada por
% linhas. Estes comandos remontam a matriz.
L=length(raw);
if(rem(L,64))
    newL=fix(L/64)*64;
    raw=raw(1:newL,1);
    L=newL;
    %error(['O arquivo raw nao tem o numero de linhas multiplo de 64. ' ...
    %       'Talvez ele esteja incompleto']);
end

raw=reshape(raw,64,L/64)';

%índices das correlações usadas atualmente no BDA
In=[55 %C4xC5 corresponde A3xA4
    56
    01 %C3xC4 corresponde A2xA3
    02
    53 %C3xC5 correponde A2xA4

```

```

54
47    %C2xC3 correponde A1xA2
48
09    %C5xC6 correponde A4xA5
10
43    %C2xC5 correponde A1xA3
44
51    %C4xC6 correponde A3xA5
52
39    %C2xC5 correponde A1xA4
40
49    %C3xC6 correponde A2xA5
50
35    %C2xC6 correponde A1xA5
36
17    %TPA correponde TP2
25    %TPB correponde TP5
];

```

```

%indices das autocorrelações: (não são autocorrelações, são )
Ina=[59    %A1                (saídas full correlation      )

```

```

59
03    %A2
03
59    %A1
59
59    %A2
59
59    %A1
59
59    %A2
59
59    %A1
59
59    %A2
59
59    %A1
59

```

```

    59    %A2
    59
    18    %A1
    26];

%%Elimina o bit menos significativo pois ele contem qual banco de
%memoria o correlacionador estava usando e nenhuma informacao sobre a
%correlacao em si

raw=floor(raw/2)*2;
save -ascii rwai.dat raw;

%Construi as matrizes de retorno. Cada linha de uma delas é a média
%de n_ave linhas dos dados originais. A última linha contém a média
%do resto das linhas
L=L/64;

if(n_ave>1)
    if(rem(L,n_ave))
        nl=floor(L/n_ave)+1;
        F=zeros(nl,22);
        Ac=zeros(nl,22);
    else
        nl=L/n_ave;
        F=zeros(nl,22);
        Ac=zeros(nl,22);
    end

    for k=1:nl-1
        F(k,:)=mean(raw((k-1)*n_ave+1:k*n_ave, In));
        Ac(k,:)=mean(raw((k-1)*n_ave+1:k*n_ave, Ina));
    end

    F(nl,:)=mean(raw((nl-1)*n_ave+1:L, In));
    Ac(nl,:)=mean(raw((nl-1)*n_ave+1:L, Ina));
else
    F=raw(:, In);

```



```

    Ac=raw(:, Ina);
end

% Correção de Van Vleck: emprega-se o valor maximo da correlação
% medido usando o canal de autocorrelacao

for k=1:20
    F(:,k)=sin(pi/2*(-2*F(:,k)./Ac(:,k)+1));
end

for k=21:22
    F(:,k)=-2*F(:,k)./Ac(:,k)+1; % os desvios padrão nao precisam
end % correção Van Vleck,

```

BW_FILTER_REDUX

```

%% PROGRAM bw_filter_redux %%
%% Valle Silva 2008 %%

t=1:1024; % para segunda integracao de 30 pontos
sp=fft(F); % toma os dados de saida de seefringes_redux.m

[a,b]=max(abs(sp(2:1024,:))); % busca o picos no espectro, os filtros
% são contruidos centrados em tais picos

% Construção dos filtros passa - banda%
gamma=3; % gamma=1,2,3,4,5...

for i=1:20
    for j=1:1024
        btf(i,j)=1-1./(1+(5*j./(j.^2-b(i)^2)).^2*gamma);
        if j<=512
            btfw(i,j)=btf(i,j);
        else
            btfw(i,j)=btf(i,1024-j+2);
        end
    end
end

```

```

        end
    end

%Aplicação dos filtros %
for i=1:20
    G(:,i)=fft(F(:,i));
    G(:,i)=G(:,i).*btfw(i,:);
    visfilt(:,i)=ifft(G(:,i));
    Ff(:,i)=visfilt(:,i);
end

% Gráfica da sinal filtrada
for i=1:10
    figure(i)
    plot(axxis,Ff(:,2*i-1),'k')
    hold on
    plot(axxis,Ff(:,2*i),'k')
end

% Gráfica do espectro
sp=fft(F);
figure()
semilogy(1:250,abs(sp(1:250,:)))
hold on
semilogy(1:250,abs(G(1:250,:)),'k-p')
semilogy(1:250,butterfilter(:,1:250)','-p')

```

B APÊNDICE B - CORREÇÃO DE FASE E AMPLITUDE

CORRECTION_REDUX

```
%% PROGRAM correction_redux %%
%%   Valle Silva 2008      %%

ig=sqrt(-1); % constante complexa
% matriz singular de closure phase
A=[1 0 1 0 -1 0 0 0;
   0 0 0 0 1 -1 0 0;
   0 0 0 1 0 1 0 -1;
   0 1 0 1 0 0 -1 0;
   0 1 1 0 0 -1 0 0;
   0 0 1 0 0 0 1 -1;
   1 0 0 0 1 0 -1 0;
   0 0 0 1 -1 0 0 0];

[a,b]=max(Ff(:,1:20)); %seleção dos maximos das visibilidades
z=Ff(b(1),:); % seleção das visibilidades

coefcorr=[0, z(3)+ig*z(4), z(5)+ig*z(6), z(7)+ig*z(8), z(9)+ig*z(10),...
           z(11)+ig*z(12), z(15)+ig*z(16), z(17)+ig*z(18), z(19)+ig*z(20)];
der=[z(1)+ig*z(2) coefcorr(2:8) zeros(1,3) coefcorr(9) zeros(1,3)];

% amplitudes do modelo de fonte pontual
fator=[288.859179530541;
       263.398298004787;
       231.545341682825;
       200.935761402079;
       169.25957569803;
       140.947416939642;
       118.650973894465;
       98.3353240402583;
       0;
       0;
       0;
```

```

30.0058732489777;
    0;
    0;
    0]/288.85917;

% amplitudes medidas de Cygnus
ampcyg = [0.440490583714691;
          0.854137910308183;
          0.545978827816819;
          0.960807662741707;
          0.161560409308788;
          0.849637638665779;
          0.536576610089838;
          0.228718916147614;
          1e-15;
          1e-15;
          1e-15;
          0.227070406313668;
          1e-15;
          1e-15;
          1e-15]/0.96080;

fator=fator';
ampcyg=ampcyg';
der=der.*(fator./ampcyg);

% força às fases permanecer contidas em [-pi,pi]
signo=sign(angle(coefcorr));
phipre=signo.*mod(abs(angle(coefcorr)), pi); %
phi=phipre; %   Ordem: 34, 23, 24, 12, 45, 13, 14, 25, 15

% triadas closure phase: \theta_{ijk}
b=[phi(1)+phi(3)-phi(5);
   phi(5)-phi(6);
   phi(4)+phi(6)-phi(8);
   phi(2)+phi(4)-phi(7);
   phi(2)+phi(3)-phi(6);
   phi(3)+phi(7)-phi(8);
   phi(1)+phi(5)-phi(7);

```

```

        phi(4)-phi(5)];

% cálculo de fases verdadeiras
phi_true=pinv(A)*b; % ordem de saída :23, 24, 12, 45, 13, 14, 25, 15

% primeira componente de fase (34) pode-se mudar: 0,+pi,-pi
velho=[pi phi(1:7) zeros(1,3) phi(8) zeros(1,3)];
novo=[pi; phi_true(1:7); zeros(3,1); phi_true(8); zeros(3,1)];

for k=1:15
    dercorr1(k)=abs(der(k))*exp(sqrt(-1)*velho(k));
end

for k=1:15
    dercorr2(k)=abs(der(k))*exp(sqrt(-1)*novo(k));
end

% espectros
viscorr1=[0 dercorr1 0 zeros(1,3) conj(dercorr1(12)) zeros(1,3) ...
          conj(dercorr1(8)) conj(dercorr1(7)) conj(dercorr1(6))...
          conj(dercorr1(5)) conj(dercorr1(4)) conj(dercorr1(3))...
          conj(dercorr1(2)) conj(dercorr1(1))];
viscorr2=[0 dercorr2 0 zeros(1,3) conj(dercorr2(12)) zeros(1,3) ...
          conj(dercorr2(8)) conj(dercorr2(7)) conj(dercorr2(6))...
          conj(dercorr2(5)) conj(dercorr2(4)) conj(dercorr2(3))...
          conj(dercorr2(2)) conj(dercorr2(1))];

% diferencias entre fases: (corregida-no_corregida)
diffang1=57.3*abs(novo-velho');
figure()
bar(diffang1,'g')

% obtenção dos mapas por Fourier inversa
ms1=ifft(viscorr1);
ms2=ifft(viscorr2);

%grafica dos mapas
figure()

```

```
plot(ms1,'g-.o','linewidth',2)
hold on
plot(ms2,'r--p','linewidth',2)
```

```
%grafica das amplitudes de vis.
figure()
bar(abs(viscorr1),'g')
hold on
plot(abs(viscorr2),'r-p' )
```

```
%grafica das fases
figure()
plot(angle(viscorr1),'g')
hold on
plot(angle(viscorr2),'r-p' )
```