

INPE-0000-TDI/000

O PROTÓTIPO DO BDA E SUGESTÕES PARA AS SEGUINTE FASES

Jorge Fernando Valle Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pos-Graduação em Astrofísica, orientada pelo Dr.
Hanumant S. Sawant.

INPE
São José dos Campos
2009

INPE-0000-TDI/000

O PROTÓTIPO DO BDA E SUGESTÕES PARA AS SEGUINTE FASES

Jorge Fernando Valle Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pos-Graduação em Astrofísica, orientada pelo Dr.
Hanumant S. Sawant.

INPE
São José dos Campos
2009

00.000.00(000.0)

Valle. J.F..

O Protótipo do BDA e sugestões para as seguintes fases/
Valle. J.F.. – São José dos Campos: INPE, 2009.
[72](#)p. (INPE-0000-TDI/000)

1. BDA.
2. Interferometria.
3. Sol calmo.
4. Correlacionador 1 bit.
5. Síntese de abertura.

Mestre Astrofísica.

Dr. Hanumant Shankar Sawant

Presidente
INPE, SJCampos (SP)

Dr. José Roberto Cecatto

Membro da Banca
INPE, SJCampos (SP)

Dr. Joaquim Eduardo Rezende Costa

Membro da Banca
INPE, SJCampos (SP)

Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes

Membro da Banca – convidado –
UNIVAP, SJCampos(SP)

Dr. Claudio Faria

Membro da Banca – convidado –
PUC, Minas Gerais

RESUMO

O protótipo do Arranjo Decimétrico Brasileiro 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 freqüências 1,2 – 1,7 GH, e resolução temporal de $\sim 105\ ms$, a sensibilidade foi apenas estimada teoricamente (Sawant et al., 2005). O arranjo tem produzido desde o inicio das operações e de forma regular, franjas de visibilidade em seus 10 pares de correlação, não assim mapas confiáveis. Nesta dissertação tem sido 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 teórico e operacional nestes procedimentos. Os dados processados são de observações de transito meridiano do Sol, *Cygnus A* e *Taurus A* obtidos na segunda metade do ano 2007. As visibilidades das fontes mostram anomalias que poderiam ser atribuíveis principalmente a 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 em ótimas condições.

THE BDA PROTOTYPE AND SUGGESTIONS FOR THE NEXT STAGES

ABSTRACT

The prototype of the Brazilian Decimetre Array 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 *GH* and temporal resolution of $\sim 105\ ms$, sensitivity was only estimated theoretically ([Sawant et al., 2005](#)). The array has produced since the beginning of operations and on a regular basis, fringe visibilities in its 10 pairs of correlation, but has not been possible to produce reliable maps. 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 could in principle be caused by poor calibration of the 1-bit correlator and related maps of the Sun, not recover the basic features that would be obtained with the array operating in optimal conditions.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Rádio Astronomia e Síntese de Abertura	17
1.2 Observação Solar	17
1.2.1 Emissão rádio de Sol Calmo	19
1.2.2 Emissão de variação lenta ou quiescente	20
1.2.3 Explosões Solares	20
1.3 O Arranjo Decimétrico Brasileiro	21
1.4 Descrição da Dissertação	22
2 TELESCÓPIOS DE CORRELAÇÃO E SÍNTESE DE ABERTURA	23
2.1 Telescópios de Correlação	23
2.1.1 Potência Correlacionada Disponível e Área Efetiva	24
2.1.2 Temperatura de Brilho e Temperatura de Antena	24
2.1.3 Coeficientes de Correlação e Direções Independentes no Mapa	26
2.2 Mapas Simulados do PBDA	27
2.2.1 Os Mapas do SRRT	27
2.2.2 Espectros de Fase e Amplitude	30
2.2.3 Degradação da Resposta Dinâmica	34
3 O PBDA	39
3.1 Características Básicas e Configuração do Arranjo	39
3.1.1 A Eletrônica do <i>Front End</i>	39
3.1.2 Pares interferométricos e Linhas de Base	40
3.2 Correlacionador do PBDA	41
3.2.1 Canais de Correlação	41
3.2.2 <i>Software</i> do Correlacionador	43
3.2.3 Testes e Avaliação do Correlacionador	45
4 PROBLEMAS ENCONTRADOS NA ELABORAÇÃO DOS MAPAS	47

4.1	Observações	47
4.2	Processamento de dados	47
4.2.1	Calibração da Visibilidade	48
4.2.2	Calibração de Amplitude	48
4.2.3	Calibração de Fase	51
4.2.4	Mapas	53
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	57
5.1	Conclusões	57
5.2	Sugestões	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
A	APÊNDICE A - PROCESSAMENTO DE DADOS DO PBDA	63
B	APÊNDICE B - CORREÇÃO DE FASE E AMPLITUDE	69

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Diagrama de emissão de fontes astronômicas	18
1.2 Sistema coordenado usado nesta dissertação	18
2.1 Disposição dos coeficientes hermitianos para uma configuração de $N = 2^3$ direções independentes num mapa unidimensional de temperatura de brilho.	26
2.2 Mapa de contorno do disco solar completo obtido com o SSRT na freqüência 5.7 GHz	27
2.3 Perfis unidimensionais do mapa SRRT da Figura 2.2.	28
2.4 Mapa unidimensional depois da integração vertical.	28
2.5 Mapa unidimensional depois da convolução com um feixe gaussiano de $2.6'$	29
2.6 Mapa unidimensional pós-integração horizontal.	29
2.7 Distribuição dos coeficientes de correlação no espaço de freqüências espaciais.	31
2.8 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de Sol calmo.	31
2.9 Espectro de fases da simulação de Sol calmo.	32
2.10 Mapas reconstruídos da simulação das imagens do SSRT.	33
2.11 Mapa de contorno do disco solar no dia 02 maio de 2007.	34
2.12 Perfis unidimensionais do mapa SSRT original do dia 02 de Maio de 2007.	35
2.13 Mapa unidimensional do dia 02 de Maio de 2007 depois da integração vertical.	35
2.14 Mapa unidimensional do dia 02 de Maio de 2007 depois da convolução com um feixe gaussiano de $2.6'$	35
2.15 Mapas reconstruídos da simulação das imagens do SSRT no dia 02 de Maio de 2007.	36
2.16 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação para o dia 02 de maio de 2007.	37
2.17 Espectro de fases da simulação para o dia 02 de Maio de 2007.	38
3.1 Localização das antenas e as correspondentes linhas base no PBDA	39
3.2 Diagrama funcional de um chip de correlação	43
3.3 Conexão na entrada do correlacionador usada durante as observações	43
3.4 Diagrama dos chips Nobeyama no correlacionador PBDA	44
4.1 Espectro de amplitudes de visibilidade do Sol no dia 21 de setembro de 2007	49
4.2 Espectro de amplitudes de visibilidade de <i>Cygnus A</i> no dia 21 de setembro de 2007	50
4.3 Espectro de amplitudes de visibilidade do modelo de fonte pontual	50
4.4 Espectro de amplitudes do Sol no dia 21 de setembro depois da calibração	50

4.5	Espectro de amplitudes do Sol no dia 03 de setembro depois da calibração	51
4.6	Mapa simulado do Sol submetido a correção <i>closure phase</i>	53
4.7	Mapa do Sol do dia 03 de maio de 2007 obtido com o PBDA	54
4.8	Mapa do Sol do dia 19 de junho de 2007 obtido com o PBDA	54
4.9	Mapa do Sol do dia 20 de julho de 2007 obtido com o PBDA	55
4.10	Mapa do Sol do dia 20 de agosto de 2007 obtido com o PBDA	55
4.11	Mapa do Sol do dia 20 de setembro de 2007 obtido com o PBDA	55

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Posição das linhas de base no espectro de freqüências espaciais	30
2.2 Posição das linhas de base no espectro de freqüências espaciais (cont.)	30
2.3 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de Sol calmo	32
2.4 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de Sol calmo (cont.)	32
2.5 Espectro de fases de visibilidade da simulação de Sol calmo	33
2.6 Espectro de fases de visibilidade da simulação de Sol calmo (cont.)	33
2.7 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007	36
2.8 Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007 (cont.)	37
2.9 Espectro de fases de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007 . . .	37
2.10 Espectro de fases de visibilidade da simulação do dia 02 de maio de 2007 (cont.)	38
3.1 Pares interferométricos formados com o PBDA	40
3.2 Pares interferométricos formados com o PBDA (cont.)	41

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	- Freqüência Intermedia por Intermediate Frequency
IIA	- Indian Institute of Astrophysics
LB	- Linha de Base
LSB	- Bit menos significativo por Least Significative Bit
LST	- Tempo sidereo local por Local Sidereal Time
LNA	- Amplificador de baixo ruido por Low Noise Amplifier
LO	- Oscilador Local por Local Oscilator
MSB	- Bit mais significativo por Most Significative Bit
NoRH	- Nobeyama Radio Heliograph
PBDA	- Protótipo do BDA
RF	- Freqüência de Rádio por Radio Frequency
SSRT	- Siberian Solar Radio Telescope

1 INTRODUÇÃO

1.1 Rádio Astronomia e Síntese de Abertura

Rádio telescópios são instrumentos que filtram e detectam a emissão rádio de fontes astronômicas. Na maior parte dos casos a emissão 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. A Figura 1.1 mostra a variação da densidade de fluxo de diferentes fontes astronômicas entre 10 MHz e 10 GHz . A emissão de Sol ativo domina sobre as outras em quase todo o espectro, segue a emissão do Sol calmo nas freqüências maiores e o fundo galáctico nas menores.

A síntese de abertura é um procedimento usado em radioastronomia para melhorar a resolução espacial das observações. Está baseada no fato que uma grande abertura pode se simular eletronicamente combinando os sinais de muitos rádio telescópios. Um radiointerferômetro consiste num arranjo de antenas direcionais, sensíveis a uma banda de freqüência 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 de um sistema coordenado rectangular (x, y, z) , Figura 1.2, onde o plano de abertura sintetizado está diretamente relacionado ao plano x, y . A unidade de medida é o comprimento de onda da freqüência central, na banda de freqüências de operação do sistema receptor e as direções do espaço, se especificam com os cossenos diretores (l, m, n) associados ao sistema coordenado (x, y, z) .

1.2 Observação Solar

O Sol é a mais intensa fonte extraterrestre de emissão rádio observada da Terra. A composição da emissão solar é algo 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.

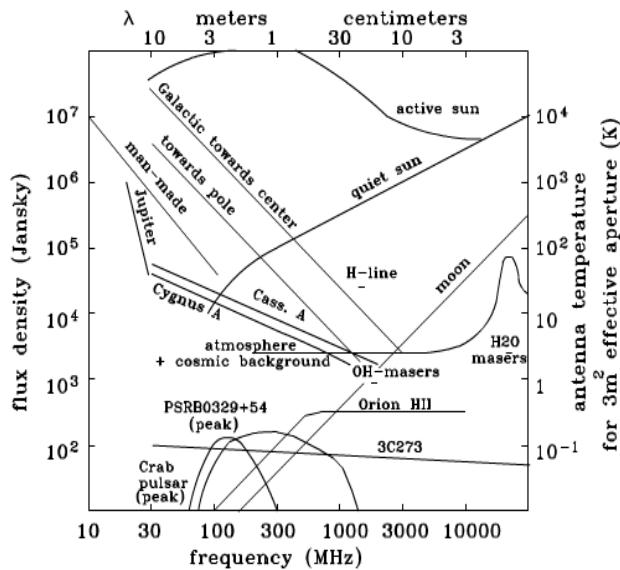


Figura 1.1 - Diagrama de emissão de fontes astronômicas. Tomado de [MIT, Haystack Observatory \(2008\)](#).

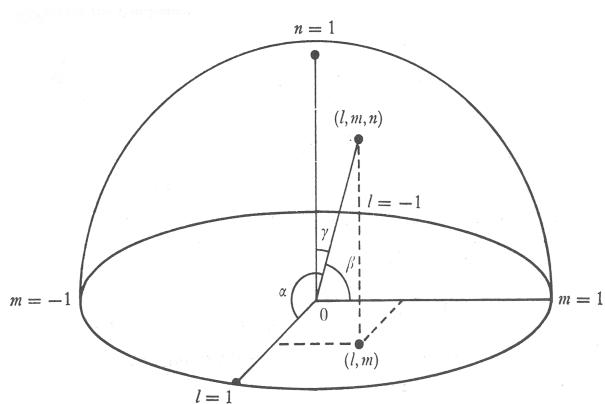


Figura 1.2 - Sistema coordenado usado nesta dissertação. A direção está especificada pelos cossenos diretores l, m, n , i.e. $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$. Qualquer direção no hemisferio celeste pode-se representar por um ponto na esfera unitária ou sua projeção no plano l, m . Tomado de [Christiansen e Hogbom \(1985\)](#).

1.2.1 Emissão rádio de Sol Calmo

A emissão rádio de Sol calmo é a emissão térmica da atmosfera solar ionizada, formada principalmente de hidrogênio. Esta emisão 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, adjacente 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 abrillantamento no limbo do disco visível, onde a profundidade da atmosfera quente é maior. 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 [Fürst \(1980\)](#). 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 $57\,000\, K$, em tanto que o diâmetro equatorial alcança valores maiores em $\sim 20\%$ do rádio 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](#)).

1.2.2 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 bordeiam 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 os *plages* em altitudes de aproximadamente $0.07R_{\odot}$ sobre a fotosfera. Em freqüências 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 aos grupos de manchas solares, visto 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 que os valores meios do ambiente ([Aschwanden, 2004](#)).

1.2.3 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 até energias acima de 20 keV. No processo de liberação de energia são características duas fases: a fase impulsiva e o decaimento estendido ([Nindos et al., 2008](#)).

Acredita-se que os *flares* solares tomam sua energia dos processos de reconexão magnética em algum lugar acima dos *loops* magnéticos. Os elétrons que são acelerados e escapam em direção à coroa produzem emissão rádio de grande comprimento de onda. 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 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 *bremstrahlung* 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 freqüência de plasma, para os quais a absorção é menos efetiva pois a profundidade óptica é cerca de 16 vezes menor em comparação com o fundamental ([Dulk, 1985](#)).

[Stahli e Benz \(1987\)](#) mostraram que a emissão no segundo harmônico pode ser observada até freqüências de 6 GHz ou mais, considerando inhomogeneidades na densidade da atmosfera solar com tamanhos da ordem de 100 km, enquanto que a emissão fundamental é fortemente absorvida para freqüências 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 freqüências de plasma estão na faixa decimétrica.

1.3 O Arranjo Decimétrico Brasileiro

O 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 m na direção Leste-Oeste e 1 170 m na direção Sul. Uma vez em operação o arranjo terá alta resolução espacial: menos de 5 segundos de arco em 5,6 GHz

e alta resolução temporal: $\sim 100\ ms$. O BDA terá capacidade de observar fenômenos solares nas seguintes faixas protegidas de freqüência: $1,2 - 1,7\ GHz$, $2,8$ e $5,6\ GHz$.

A primeira fase, ou protótipo do BDA (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 freqüências $1,2 - 1,7\ GHz$ e atinge a máxima resolução espacial de $\sim 3.3'$ em $1,4\ GHz$ ([Sawant et al., 2003; ??](#)). 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 freqüência 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.

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 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 seguintes etapas.

2 TELESCÓPIOS DE CORRELAÇÃO E SÍNTESE DE ABERTURA

2.1 Telescópios de Correlação

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

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

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

Todos os termos, exceto o último contém produtos das voltagens não correlacionadas e suas médias temporais desaparecem quando $t \rightarrow \infty$. 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 τ na chegada dos 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 a radiofrequência utilizada, (u, v) são as separações em comprimentos de onda nas direções (x, y) entre antenas e (l, m) os cossenos diretores da direção de apontamento no céu.

2.1.1 Potênciа Correlacionada Disponível e Área Efetiva

Se $p_{1,2}$ são as potências por unidade de freqüência disponíveis nas antenas (medidas na mesma polarização) e $A_{1,2}$, as áreas efetivas respectivas, a potência disponível por unidade de largura de banda e a área efetiva do telescópio de correlação 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 respectivas, $A_1 = A_{1max}|F_1|^2$, $A_2 = A_{2max}|F_2|^2$ e $\psi = (\phi_1 - \phi_2)$. A área efetiva em função dos padrões de radiação se expressa como

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

$$= 2(A_{1max} A_{2max})^{1/2} \operatorname{Re}\{F_1 F_2^*\} \quad (2.8)$$

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.

2.1.2 Temperatura de Brilho e Temperatura de Antena

A forma complexa da temperatura de antena, T_a , de um telescópio de correlação em termos da distribuição de temperatura de brilho $T_B(l,m)$ e da área efetiva $A_c(l,m)$ esta dada por (Christiansen; Hogbom, 1985).

$$T_a = \lambda^{-2} \int_{4\pi} T_B(l, m) A_c(l, m) d\Omega \quad (2.9)$$

A forma complexa do termo de fase $\cos \psi$ resulta $\exp\{j2\pi(ul + vm)\}$ e da geometria envolvida $d\Omega$ resulta $\frac{dldm}{(1-l^2-m^2)^{1/2}}$, daí a equação 2.9 pode ser expressa como

$$T_a(u, v) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T_B(l, m) A_c(l, m)}{\lambda^{-2}(1-l^2-m^2)^{1/2}} \exp[j2\pi(ul + vm)] dldm \quad (2.10)$$

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

$$T_a(u, v) \Leftrightarrow \frac{T_B(l, m) A_c(l, m)}{\lambda^{-2}(1-l^2-m^2)^{1/2}} \quad (2.11)$$

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 pesagem. Daí que a distribuição de brilho requerida se pode determinar da transformação inversa da temperatura de antena T_a medida a diferentes espaçamentos

$$\frac{T_B(l, m)A_c(l, m)}{\lambda^{-2}(1 - l^2 - m^2)^{1/2}} = \int \int_{-\infty}^{\infty} T_a(u, v) \exp[-j2\pi(ul + vm)] du dv \quad (2.12)$$

Se os espaçamentos de síntese (u, v) são escolhidos a intervalos regulares du e dv nas direções u e v , respectivamente, a equação 2.12 se pode substituir com uma série (Ravindra, 1983). Chamando ao lado esquerdo da equação como $T_{map}(l, m)$ a expressão resulta

$$T_{map}(l, m) = \sum_{-u}^u \sum_{-v}^v T_a(u, v) \exp[-j2\pi(ul + vm)] \quad (2.13)$$

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 ímpar, $T_a(-u, -v) = T_a^*(u, v)$. Daí que se $T_a(u, v)$ é conhecida, não existe necessidade de medir $T_a(-u, -v)$, ou seja, só é necessário explorar em dois quadrantes do plano (u, v) .

Nomeando as partes real e imaginária de T_a por a_n e b_n , respectivamente, a equação 2.13 pode ser escrita como

$$T_{map}(l, m) = \sum_{-u}^u \sum_{-v}^v (a_n + jb_n) \exp[-j2\pi(ul + vm)] \quad (2.14)$$

Na síntese unidimensional a equação se reduz a

$$T_{map}(l) = \sum_{-u}^u (a_n + jb_n) \exp[-j2\pi ul] \quad (2.15)$$

Sendo $(a_n + b_n)$ uma quantidade hermitiana, sua transformada de *Fourier* é real. A equação 2.15 pode ser escrita só com valores positivos de u nos dois quadrantes do plano (u, v) .

$$T_{map}(l) = 2 \sum_0^u \operatorname{Re}\{(a_n + jb_n) \exp[-j2\pi ul]\} \quad (2.16)$$

$$= \sum_{n=0}^N (a_n \cos 2\pi u_n l + b_n \sin 2\pi u_n l) \quad (2.17)$$

No arranjo Leste-Oeste, $l = \cos \theta$, sendo θ o ângulo horário. O termo u_n é a freqüência

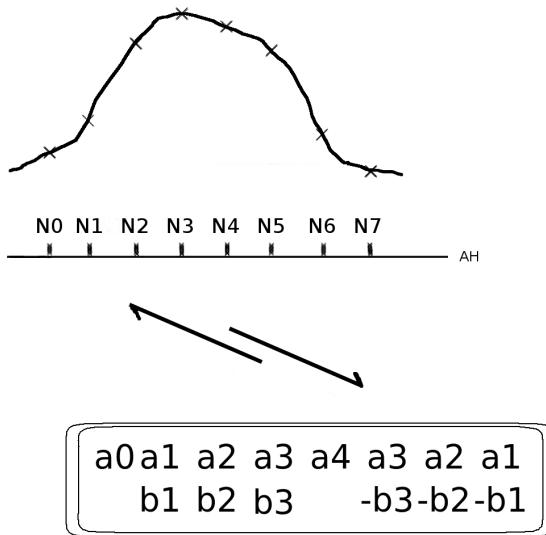


Figura 2.1 - Disposição dos coeficientes hermitianos para uma configuração de $N = 2^3$ direções independentes num mapa unidimensional de temperatura de brilho. Note como os 8 coeficientes complexos só admitem 8 valores reais diferentes.

espacial escrita como uma fração da freqüência espacial associada a maior linha de base. Assim, à freqüência de Nyquist do arranjo ocupa a posição central do espectro correspondente a $1/2$. Para facilitar os cálculos e o uso de algoritmos FFT ([Cooley; Tukey, 1965](#)) é pratica comum escolher $N = 2^m$ onde m é um inteiro de eleição apropriada.

2.1.3 Coeficientes de Correlação e Direções Independentes no Mapa

A distribuição unidimensional de brilho, $T_{map}(l)$ vem dada pela equação [2.17](#) onde a_n e b_n são os chamados coeficientes de correlação cosseno e seno, respectivamente. N é o número total de direções independentes que o arranjo pode atingir e da definição de transformada discreta de *Fourier* ([Bracewell, 2000](#)), uma função definida por N medições é representável depois da transformação por N parâmetros.

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 de forma geral por N coeficientes complexos no espaço de freqüências espaciais, Figura [2.1](#). 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.

2.2 Mapas Simulados do PBDA

No intuito de obter características gerais em quanto a resolução e intensidade dos mapas que o PBDA deveria gerar, foi feita uma simulação a partir de mapas bidimensionais do Sol obtidos com o SSRT que tem capacidade de obter mapas com resolução angular de $21''$ a cada 2 minutos (Grechnev et al., 2003). Esta simulação leva em conta as características do arranjo PBDA e como estas afetariam a resolução espacial e o resposta dinâmica dos mapas unidimensionais a serem obtidos.

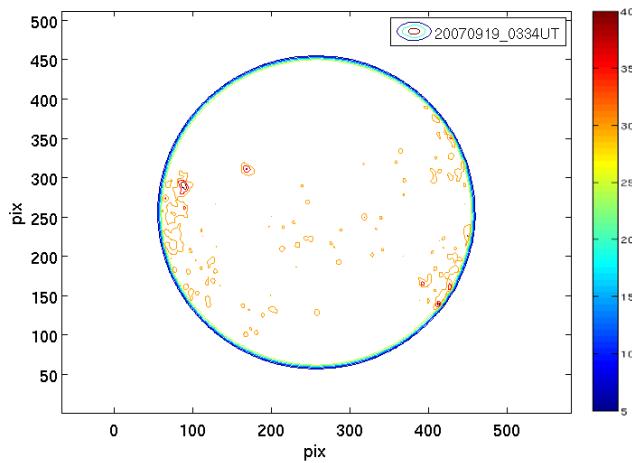


Figura 2.2 - Mapa de contorno do disco solar completo obtido com o SSRT na freqüência 5.7 GHz . O campo da imagem é de $42' \times 42'$.

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 512×512 pixels ($42' \times 42'$) da intensidade de emissão (*Stokes I*) na freqüência 5.7 GHz . A calibração de intensidade das imagens esta baseada numa temperatura de Sol calmo de 16000 K e a 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 $\sim 20dB$ (Grechnev et al., 2003). A Figura 2.2 mostra um mapa do Sol num dia de baixa atividade sem pontos de forte emissão localizada.

A Figura 2.3 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. A conversão do mapa bidimensional num mapa unidimensional, Figura

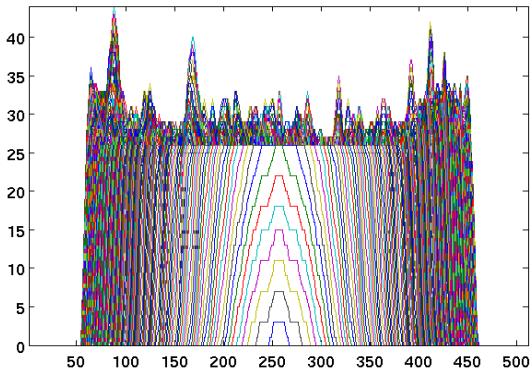


Figura 2.3 - Perfis unidimensionais do mapa SRRT da Figura 2.2.

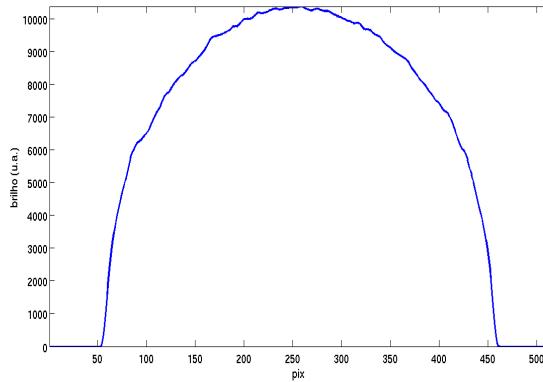


Figura 2.4 - Mapa unidimensional depois da integração vertical.

2.4, 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 abrillantamentos laterais ficam completamente diluídos com a integração.

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 $\theta_{HPBW} = 32 \text{ pixels}$ que equivale a uma convolução com um feixe de $\sim 2.6'$. O resultado se mostra na Figura 2.5 onde o perfil aparece já completamente alisado sem as rugosidades do mapa anterior.

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.

Uma boa alternativa é integrar horizontalmente o mapa unidimensional SSRT e reduzir ele

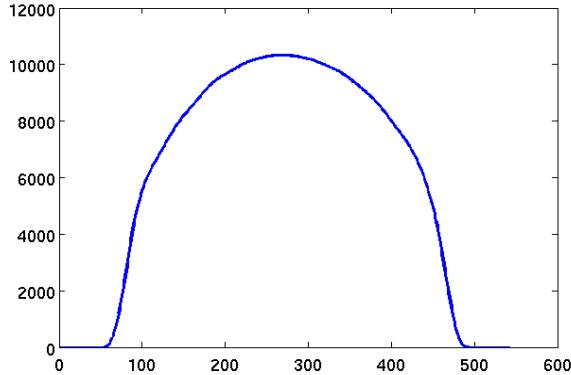


Figura 2.5 - Mapa unidimensional depois da convolução com um feixe gaussiano de $2.6'$.

até 32 *pixels*, Figura 2.6, representando cada *pixel* uma direção independente do ângulo horário, isso também significa uma saída do correlacionador com 32 coeficientes de correlação, ou seja, um arranjo com 16 linhas de base, 7 a mais que o PBDA, o que produziria um feixe de $2.6'$ ao incluir uma hipotética 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.

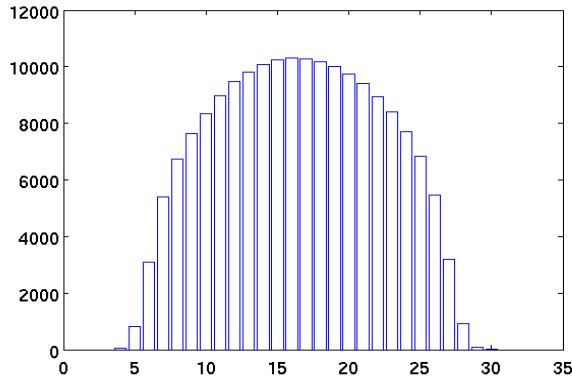


Figura 2.6 - Mapa unidimensional pós-integração horizontal. O resultado é um mapa com 32 direções independentes.

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 freqüências 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 $1,4\text{ GHz}$, 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](#) contém as primeiras 17 posições do chamado espectro de freqüências espaciais, as posições sublinhadas correspondem as linhas de base que o PBDA não posui. No espaço de freqüências 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 freqüências 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 freqüências 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 [2.7](#), 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 da componente a_0 (linha de base zero) é muito maior que as outras componentes, efeito característico de um mapa sem detalhes menores com predomínio de uma estrutura cujo tamanho é do mesmo ordem de grandeza da largura do mapa.

A Figura [2.8](#) 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.

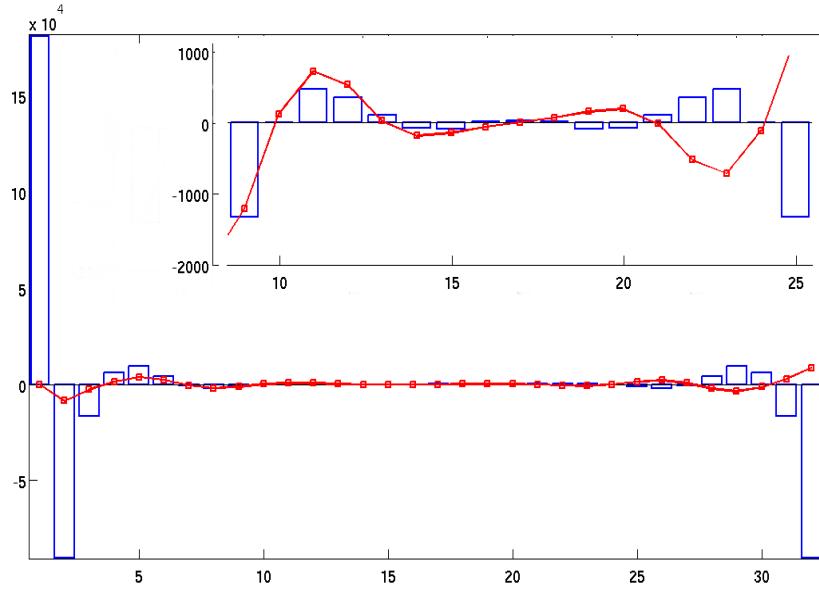


Figura 2.7 - Distribuição dos coeficientes de correlação no espaço de freqüências espaciais. A altura das barras (azul) corresponde as componentes cosseno (a_n) e os quadrados (vermelho) as componentes seno (b_n), a freqüência central seria $\sim 1371\lambda$ e a separação entre componentes sucessivas $\sim 86\lambda$ para uma freqüência de observação de 1.4 GHz .

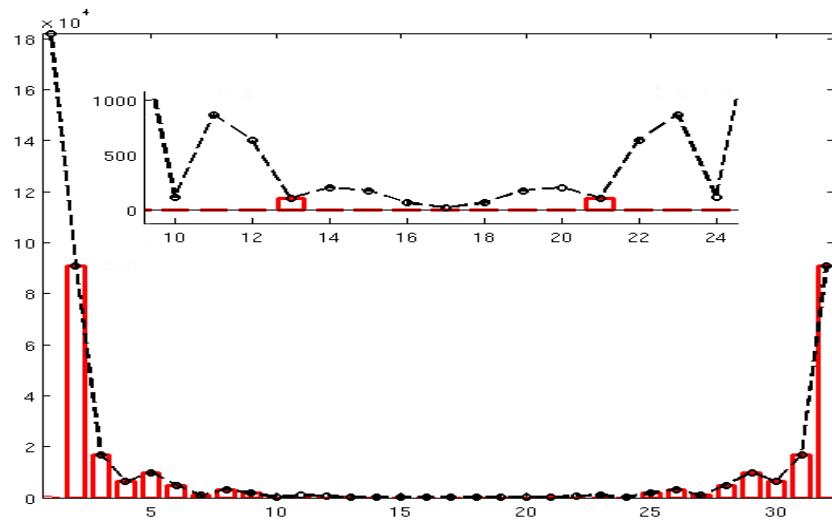


Figura 2.8 - Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação de sol calmo. Em cor preto as amplitudes das 16 linhas de base, as barras em cor vermelha são as amplitudes que seriam fornecidas pelo PBDA. O inserto mostra o detalhe das amplitudes nas linhas de base maiores.

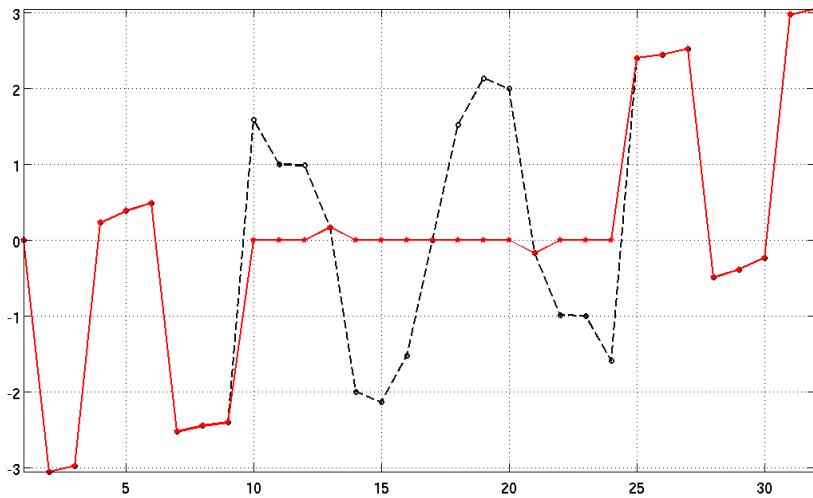


Figura 2.9 - Espectro de fases da simulação de Sol calmo. Em cor preto os ângulos de fase (radianes) das 16 linhas de base. Em cor vermelha estão graficadas as fases que seriam fornecidas pelo PBDA.

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 2.9. 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 visibilidades nas diferentes linhas de base.

Tabela 2.5 - Espectro de fases 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
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	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	13	<u>14</u>	15	<u>16</u>	<u>17</u>
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 2.10, onde as barras em amarelo correspondem ao mapa original da Figura 2.6, 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.

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 consequência, sendo que o mapa original não apresenta detalhes finos na estrutura.

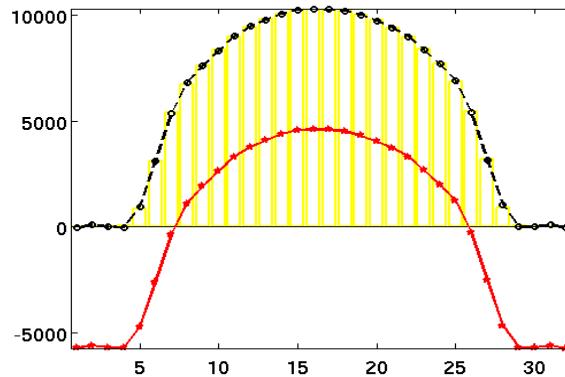


Figura 2.10 - Mapas reconstruídos da simulação das imagens do SSRT. A curva em cor preto foi obtida considerando 16 linhas de base, já na curva em cor vermelho só foram consideradas as 9 linhas de base do PBDA. O deslocamento vertical ocorre pela ausência da componente a_0

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 possui 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 a 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 dupla região de emissão localizada sobre o disco solar, sendo o pico maior, o máximo registrado em todo o período de maio a dezembro de 2007.

Na Figura 2.11 se mostra o mapa de contorno desse dia, a emissão localizada é tão intensa que as bordas que definem o disco solar não aparecem. A Figura 2.12 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.

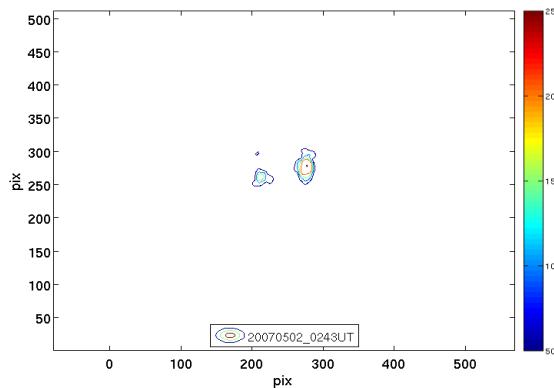


Figura 2.11 - Mapa de contorno do disco solar no dia 02 maio de 2007. A ausência da borda do disco é devida a forte emissão central.

Aplicando os passos a degradação no mapa, ver Figuras 2.13 e 2.14, se produz uma evidente diminuição na intensidade relativa dos picos ficando eles, depois do último passo, diluídos acima da emissão de fundo, Figura 2.15. 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

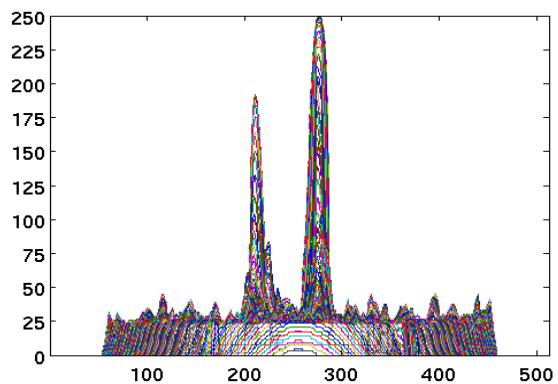


Figura 2.12 - Perfis unidimensionais do mapa SRRT original do dia 02 de Maio de 2007. A temperatura de brilho do pico de emissão é ~ 10 vezes a temperatura média do disco.

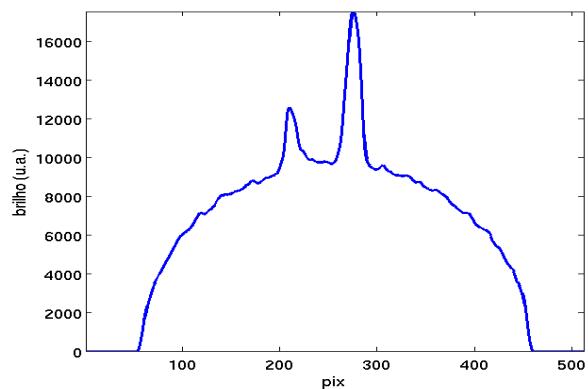


Figura 2.13 - Mapa unidimensional do dia 02 de Maio de 2007 depois da integração vertical.

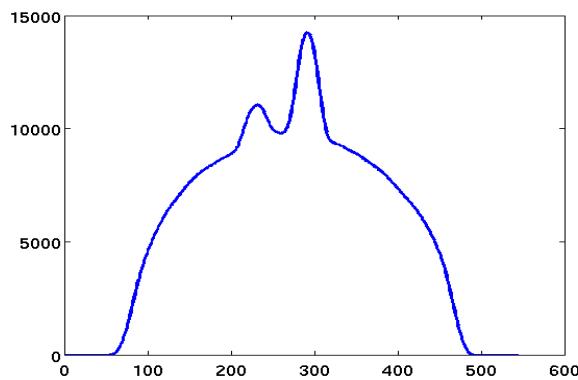


Figura 2.14 - Mapa unidimensional do dia 02 de Maio de 2007 depois da convolução com um feixe gaussiano de 2,6'.

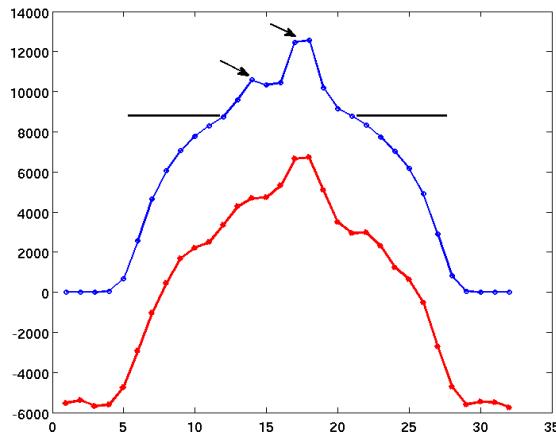


Figura 2.15 - Mapas reconstruídos da simulação das imagens do SSRT no dia 02 de maio de 2007. A curva em cor azul foi obtido considerando 16 linhas de base. Na curva em vermelho só foram considerados as 9 linhas de base do PBDA. As setas sinalam a localização dos picos de emissão e a linha horizontal o nível aproximado da emissão de fundo.

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

Pos. no Espec.	01	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

alturas de ~ 12560 e ~ 10580 respectivamente. No traço em cor vermelho, 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 $\sim 10 \text{ dB}$ no mapa original até $\sim 1.4 \text{ dB}$ na simulação do PBDA.

No espectro de amplitudes de visibilidade, as 9 primeiras linhas de base, incluindo a linha de base zero, Figura 2.16 mostram um tamanho e tendência similar as amplitudes do primeiro mapa 2.8. 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 inserto da Figura 2.8. As tabelas 2.7 e 2.8 mostram as amplitudes de visibilidade das diferentes linhas de base em porcentagem da linha de base zero.

Em relação ao espectro de fases, Figura 2.17 ele mostra uma alternância de valores positivos e negativos entre linhas de base sucessivas começando na posição 6, em tanto que as fases das linhas de base menores quase reproduzem o espectro da Figura 2.9. As tabelas 2.9 e 2.10 mostram os ângulos de fase das visibilidades nas diferentes linhas de base.

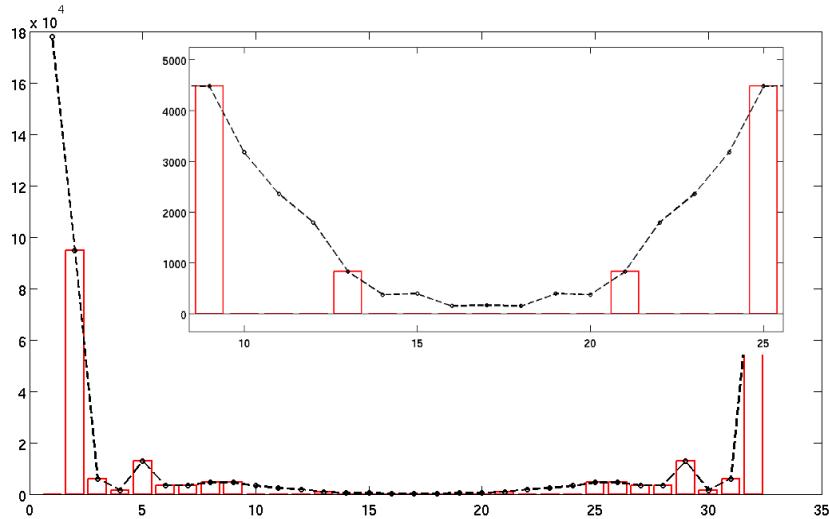


Figura 2.16 - Espectro de amplitudes de visibilidade da simulação para o dia 02 de maio de 2007. Em cor preto as amplitudes das 16 linhas de base, as barras em cor vermelha são as amplitudes que seriam fornecidas pelo PBDA.

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>	<u>13</u>	<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

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

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

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 deveram ser corregidos.

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 preserve quase

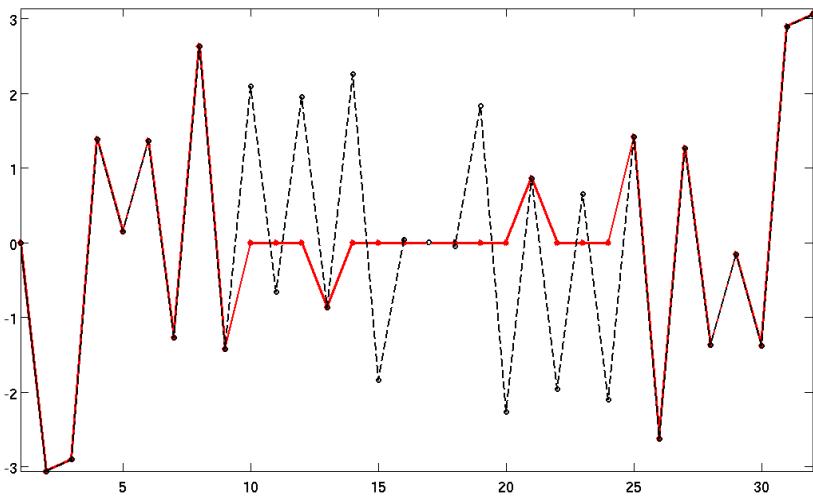


Figura 2.17 - Espectro de fases da simulação para o dia 02 de Maio de 2007. Em cor preta as fases das 16 linhas de base, em cor vermelha são as fases que seriam fornecidas pelo PBDA.

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

as mesmas características do mapa reconstruído com 16 linhas de base.

Por último este mapa reconstruído, que na literatura se conhece como "mapa sujo", ao fornecer as características principais do mapa original parece prescindir de qualquer processo de correção posterior ou *CLEANing* ([Högbom, 1974](#); [Clark, 1980](#)).

3 O PBDA

3.1 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 rastreio de 340° azimute, 180° elevação com uma precisão em apontamento menor do que 3 minutos de arco, a faixa de freqüências de operação é de 1,2 até 1,7 GHz ([Sawant et al., 2003](#)).



Figura 3.1 - Localização das antenas e as correspondentes linhas 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.

3.1.1 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 $\sim 25\ dB$, VSWR $\sim 1,2 : 1$ e intermodulação $-30\ dB$ na faixa de freqüências 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 de telefonia móvel, 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 freqüência, duas das quais são aplicadas na base das antenas. O primeiro oscilador local (LO1) é sintonizável na faixa de $2050 - 2500 \text{ MHz}$, a freqüência de observação depende do ajuste nesse oscilador. A sinal de saída (IF1) passa por um filtro passa-banda centrado em $f = 836,5 \text{ MHz}$, de largura de banda $\Delta f = 25 \text{ MHz}$. Para uma operação em $1,4 \text{ GHz}$, 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 freqüência $906,5 \text{ MHz}$. 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 e seno usando um *splitter* de quadratura. Os sinais assim separados são independentemente convertidos na banda base ($0 - 2,5 \text{ MHz}$) usando um terceiro oscilador local (LO3) de $72,5 \text{ MHz}$. A sincronização de fase é garantida pelo uso do mesmo oscilador 10 MHz de Rubídio.

Os sinais na banda de vídeo 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).

3.1.2 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 freqüências 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

3.2 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, circa 2002](#)), possui 6 entradas complexas para sinais de $2,5\text{ MHz}$ de largura de banda, o número de canais de saída habilitados é $30 + 2$, a freqüência de amostragem é $5,0\text{ MHz}$ e o tempo de integração é $\sim 105\text{ ms}$.

As mostras 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 de Gauribidanur ([Ramesh et al., 1998; Ramesh, 1999](#)) e os procedimentos de calibração e correção das observações no 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 switching*, 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 nas sinais quantizadas antes da correlação, usando registros de deslocamento e multiplexares sob controle de um computador. Os atrasos podem ser programados em cada sinal de entrada desde 0 até $3.0\text{ }\mu\text{s}$ usando intervalos fixos de $0.2\text{ }\mu\text{s}$. Isso significa uma descorrelação máxima de 90% em observações tipo rastreio e trânsitos fora do meridiano ([Ravindra, 1983](#)).

3.2.1 Canais de Correlação

O sistema foi construído usando 8 *chips Nobeyama*, desenhados para o radioheliógrafo 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 ($\overline{\oplus}$) também em paralelo. As

saídas do correlacionador chamadas de cosseno e seno estão implementadas segundo

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

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

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 uma sinal completamente correlacionada na entrada produz no canal cosseno de saída $2 \times 5 \times 10^6 \times 105 \times 10^{-3}/2^6 \approx 16\ 000$, já na saída do canal seno, a conta cai até $\sim 8\ 000$. 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 qualquer, usando a função erro (*error function*) e supondo que a sinal se comporta como ruído *gaussiano* (Ravindra, 1983; Udaya Shankar, 1986; Ramesh, 1999).

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

O estimado do desvio padrão da voltagem da 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, ao não ter na entrada sinal nenhuma: 15 290 na saída cosseno, 7 644 na saída seno. A diferença com os valores descritos acima é devida a que o tempo efetivo de integração é algo menor a 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 das sinal.

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.

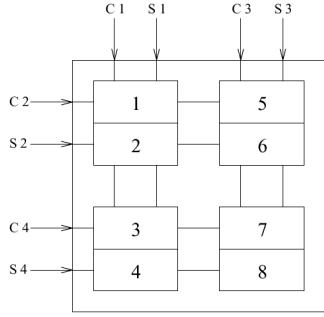


Figura 3.2 - Diagrama funcional de um chip de correlação. Tomado de [Ramesh et al. \(2006\)](#).

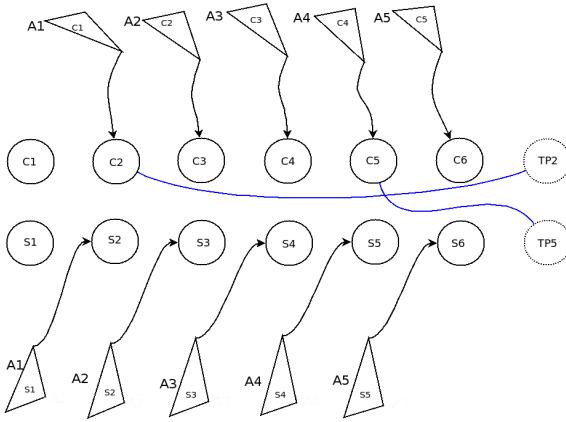


Figura 3.3 - Conexão na entrada do correlacionador usada durante as observações. A entrada 1 está permanentemente inoperante e nas entradas "Total Power" foram escolhidas as antenas 2 e 5.

3.2.2 Software do Correlacionador

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

- IIACQ.C, programa de inicialização do correlacionador, formatação do arquivo de adquisição: *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)

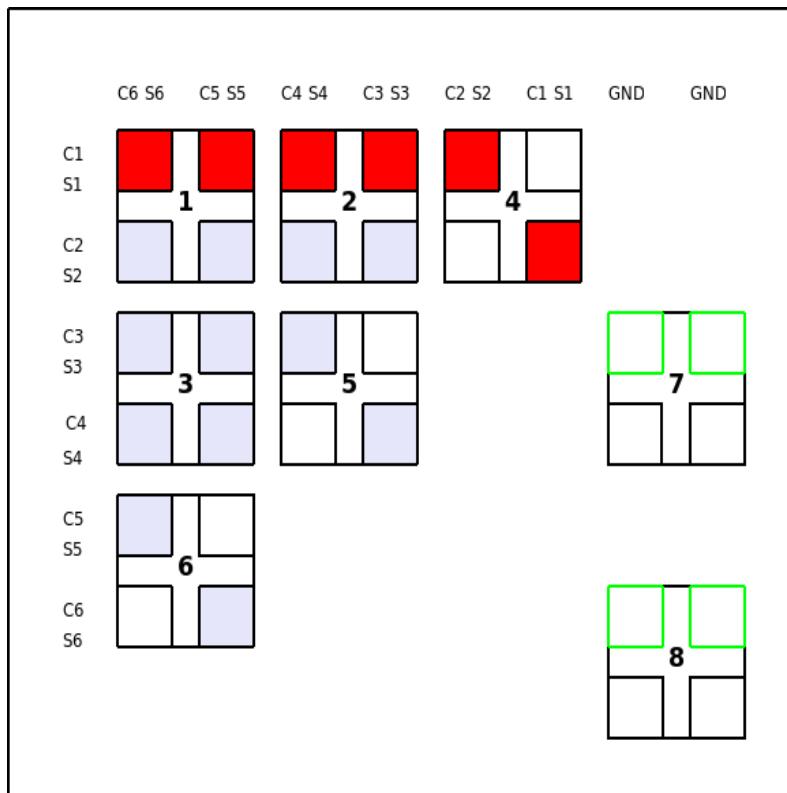


Figura 3.4 - Diagrama dos chips Nobeyama no correlacionador PBDA. Os chips são os quadrados maiores numerados de 1 a 8. Os quadrados menores representam a saída de um par de correlações (cosseno, seno), em cinzas os que estão operando atualmente, em vermelho os não operativos e os de cor branco não possuem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

e um número de filas que depende do número total de mostras e da segunda integração. Este programa usa um arquivo externo chamado *Lookup.dat*, no incluído no manual de instruções, e que forneceria a ordem das correlações.

Atualmente o correlacionador PBDA usa um *software* de adquisição 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 por o programa *bda_ana.m* escrito em *MATLAB* por Ubiratán Santos Freitas e cuja última versão corresponde a 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 filas (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.

3.2.3 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 correlacionado, pós demodulação *Walsh* (Sec. 3.4). A importância de este último procedimento para observações solares é explicitamente sinalada:

..."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 a 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 fazer ênfase na aplicação correta e periódica destes procedimentos para a obtenção de dados válidos que possam ser transformados em mapas úteis do Sol.

¹If 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 PROBLEMAS ENCONTRADOS NA ELABORAÇÃO DOS MAPAS

Neste capítulo são descritos os problemas encontrados na 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 pretendia apresentar mapas unidimensionais do Sol 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 centrado da sombra dos alimentadores nos pratos da antenas, enquanto o sistema de rastreio acompanhava o deslocamento do Sol durante alguns minutos.

A observação de *Cygnus A* ($\sim 1600Jy$, $AR\ 19h\ 59'\ 28.36''$, $Dec\ 40^\circ\ 44'\ 02.1''$) 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 considerar ela 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 ($\sim 1050Jy$, $AR\ 05h\ 34'\ 31.97''$, $Dec\ 22^\circ 00' 52.1''$) 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 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 *raw* são gravados num disco rígido e podem ser recuperados para processamento posterior.

A operação de demultiplexação levemente modificada, 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 diferente origem é eliminado aplicando filtros passa - bandas *Butterworth* em cada visibilidade com o programa *bw_filter_redux.m*. Depois de este processamento inicial, os dados devem ser calibrados em amplitude e fase.

4.2.1 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 \(1999\)](#) em Gauribidanur.

4.2.2 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 for verdadeiramente pontual ou deveria diminuir segundo um padrão *gaussiano* caso seja 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:

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

As deflexões de amplitude obtidas com o PBDA na observação do Sol, *Cygnus A* e *Taurus A*, mostram anomalias que poderiam-se atribuir 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 às 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.

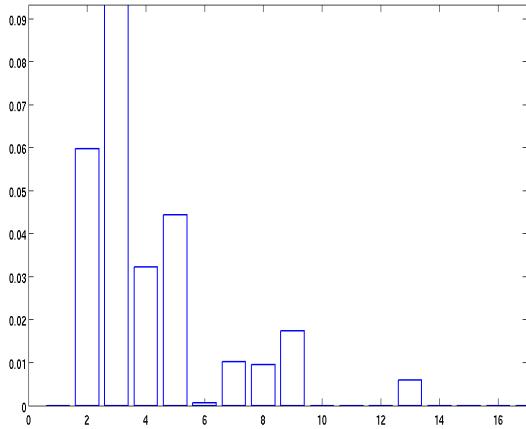


Figura 4.1 - Espectro de amplitudes de visibilidade do Sol no dia 21 de setembro de 2007. A amplitude da linha de base de 36 m (pos. 3) é maior que as outras linhas de base. Essa anomalia é atribuível a um erro instrumental mais que à emissão solar.

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', no suposto 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, esta 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 $\left(\frac{G_{ij}^{true}}{G_{max}^{true}} \right)_{cal}$. 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 pobre calibração instrumental do correlacionador, i.e. verificar o correto funcionamento dos *chips* no correlacionador e aplicar os testes mencionados no Cap. 3. Uma pobre 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.

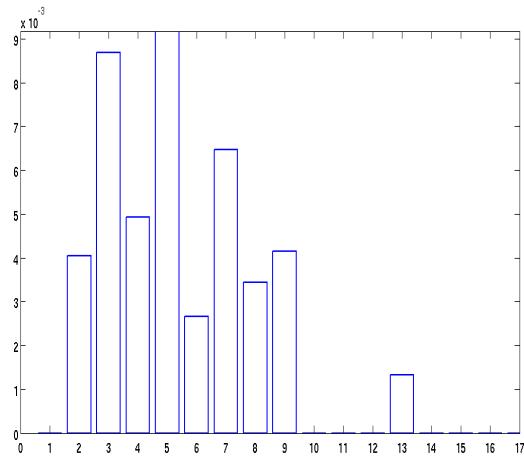


Figura 4.2 - Espectro de amplitudes de visibilidade de *Cygnus A* no dia 21 de setembro de 2007. As amplitudes mostram um comportamento anômalo com à alternância de valores acima e abaixo de 5×10^{-3} .

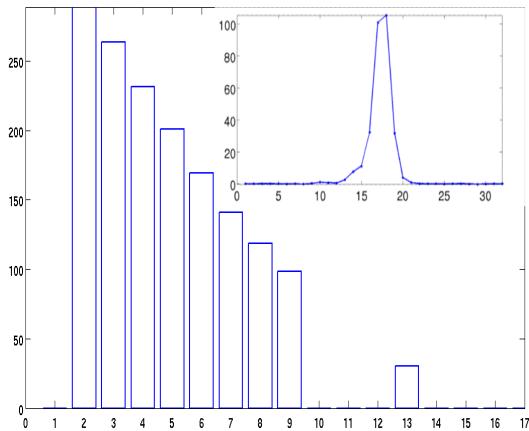


Figura 4.3 - Espectro de amplitudes de visibilidade do modelo de fonte pontual. O mapa unidimensional do modelo se mostra inserido na mesma figura.

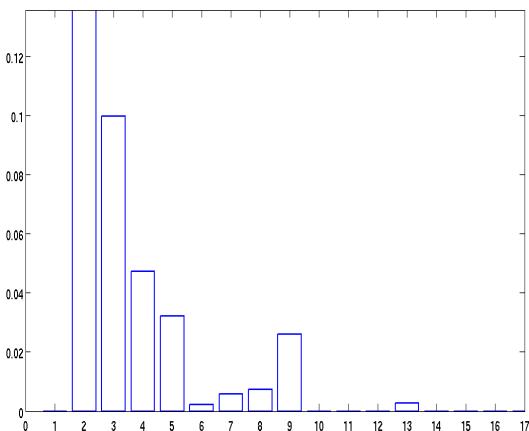


Figura 4.4 - Espectro de amplitudes do Sol no dia 21 de setembro depois da calibração. As amplitudes corrigidas ficam ainda muito diferentes dos valores esperados segundo as simulações.

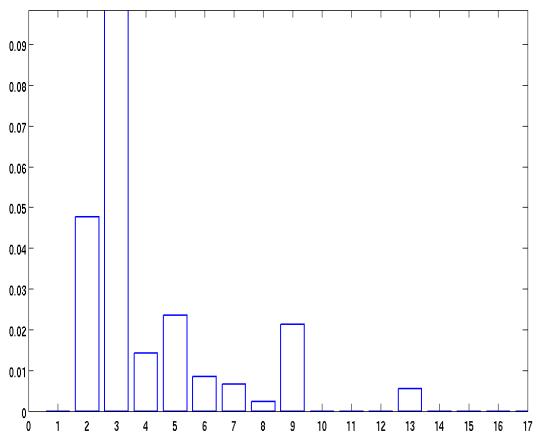


Figura 4.5 - Espectro de amplitudes do Sol no dia 03 de setembro depois da calibração. A anomalia na amplitude da linha de base 36 m persiste depois da calibração.

4.2.3 Calibração de Fase

A calibração de fases no PBDA baseia-se nas soluções implementadas em Gauribidanur por [Ramesh \(1999\)](#) que por sua vez baseia-se nos trabalhos de [Jennison \(1958\)](#). O suposto básico é que as principais fontes de erro na fase de uma linha de base são atribuíveis a erros nos componentes individuais

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

Os erros individuais podem ser eliminados agrupando grupos fechados de 3 ou mais antenas (*closure phase relation*) e as expressões que resultam são iguais às relações fechadas dos valores verdadeiros de fase

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

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

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 por 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 uma incógnita assumindo que a fase da linha de base $A3 \times A4$ é zero. A consequência

do último suposto é uma incerteza de $\pm\pi$ na fase da menor 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 - Pemrose*. O cálculo está baseado na técnica de descomposição em valores singulares (*singular value decomposition*, SVD) ([Mathworks](#), [MATLAB](#),). 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. Uma análise em detalhe, revela incertezas de 25% em 2 das 8 fases

$$\phi_{23} = 0,75\phi_{23} - 0,25(\phi_{24} + \phi_{12} - \phi_{25}) \quad (4.6)$$

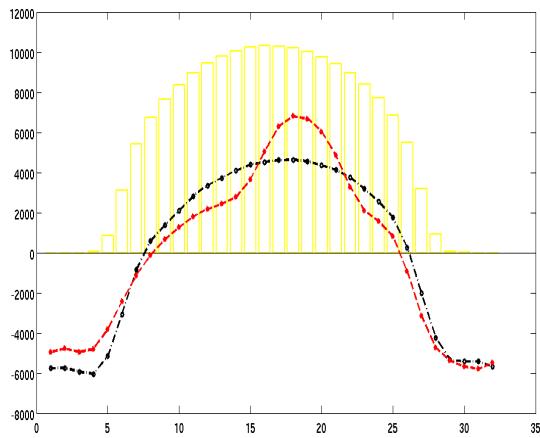


Figura 4.6 - Mapa simulado do Sol submetido a correção *closure phase*. As barras amarelas representam o mapa original, o traco em preto é o mapa recuperado sem *closure phase* e o mapa em traço vermelho com o falso abrillantamento, é o mapa recuperado aplicando *closure phase*.

$$\phi_{24} = 0,75\phi_{23} - 0,25(\phi_{23} + \phi_{25} - \phi_{12}) \quad (4.7)$$

e valores ainda maiores para as outras, $\sim 36\%$ e 44% . Isso quer dizer, 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 abrillantamento real no disco solar.

4.2.4 Mapas

Vistas as limitações de ordem teórico e as dificuldades instrumentais encontradas na elaboração de mapas unidimensionais do Sol, são apresentados aqui uns poucos exemplos representativos de mapas feitos como 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 coreção de fase nehuma, e em ambos foi aplicada a correção de amplitude.

Nenhum dos mapas apresenta as características esperadas segundo as simulações do Cap. 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

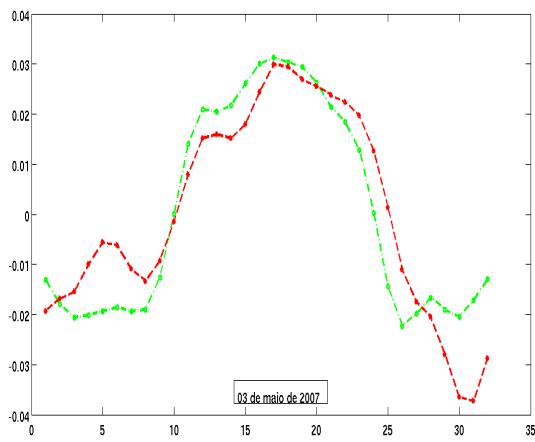


Figura 4.7 - Mapa do Sol do dia 03 de maio de 2007 obtido com o PBDA

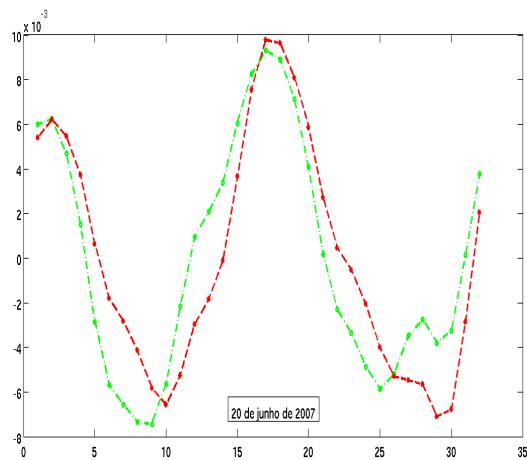


Figura 4.8 - Mapa do Sol do dia 19 de junho de 2007 obtido com o PBDA

as correções de fase e amplitude está incluído no apêndice [B](#)

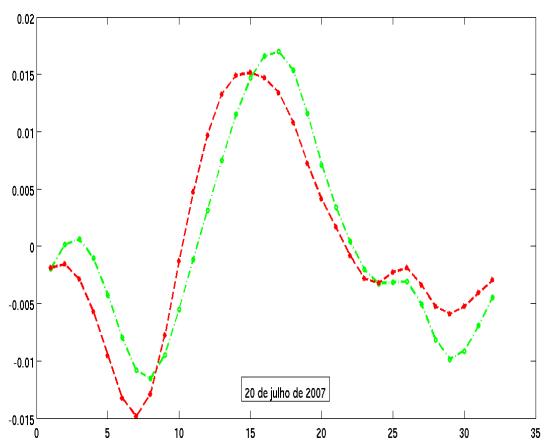


Figura 4.9 - Mapa do Sol do dia 20 de julho de 2007 obtido com o PBDA

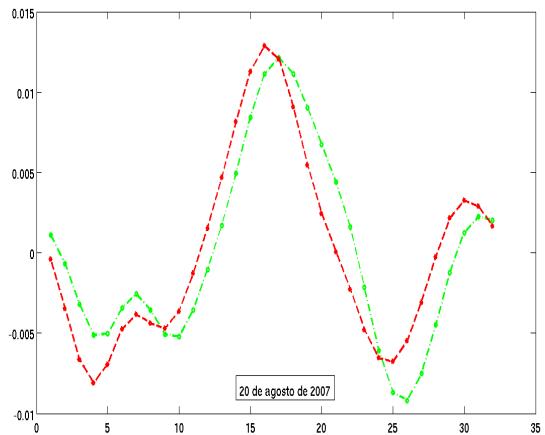


Figura 4.10 - Mapa do Sol do dia 20 de agosto de 2007 obtido com o PBDA

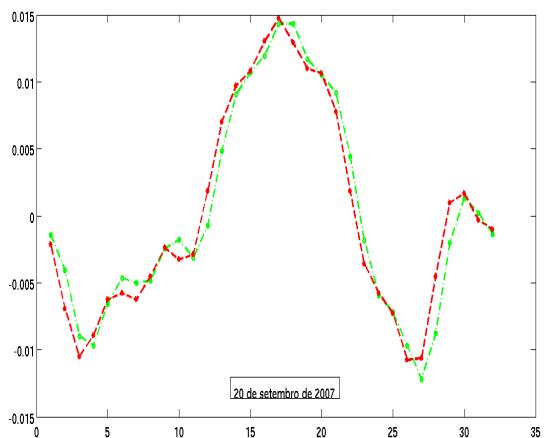


Figura 4.11 - Mapa do Sol do dia 20 de setembro de 2007 obtido com o PBDA

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

- O PBDA é um arranjo prototípico e experimental com limitada capacidade em resolução espacial e resposta dinâmica.
- O PBDA está operando abaixo de suas limitadas capacidades como mostra o fato de não produzir mapas unidimensionais confiáveis do Sol com os valores esperados de resolução espacial e resposta dinâmica.
- A degradação na qualidade dos dados de amplitude que o PBDA fornece, não podem ser corrigidos usando calibração externa com fontes pontuais. Os erros em amplitude dos dados de visibilidade não podem ser atribuídos a 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 do arranjo.

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 inicio das operações serviria para descobrir a natureza de tal degradação.
- O PBDA tem produzido franjas de visibilidade desde o inicio de 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. [20](#)

Bárta, M.; Karlický, M. Radio Signatures of Solar Flare Reconnection. **Astrophysical Journal**, v. 631, p. 612–617, set. 2005. [21](#)

BDA Correlator System. **Instruction Manual.** [S.l.]: Indian Institute of Astrophysics, Publicação Interna do projeto BDA, circa 2002. 30 p. [41](#), [43](#)

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. [26](#), [30](#)

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. [18](#), [23](#), [24](#)

Clark, B. G. An efficient implementation of the algorithm 'CLEAN'. **Astronomy and Astrophysics**, v. 89, p. 377–+, set. 1980. [38](#)

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>>. [26](#), [30](#)

Dulk, G. A. Radio emission from the sun and stars. **Annual Review of Astronomy & Astrophysics**, v. 23, p. 169–224, 1985. [21](#)

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. [19](#)

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. [19](#)

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. [19](#)

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. [27](#)

Högbom, J. A. Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines. **Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 15, p. 417–+, jun. 1974. [38](#)

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. [51](#)

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. [19](#), [20](#)

Mathworks, MATLAB. **MATLAB Documentation**. Disponível em:
[<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html>](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html). Acesso em: 28 dic. 2008. [52](#)

MIT, Haystack Observatory. **Radio astronomy tutorial**. Boston, 2008. Disponível em:
[<http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/materials/RA_tutorial.html>](http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/materials/RA_tutorial.html). Acesso em: 28 dic. 2008. [18](#)

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.; Petrasso, 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. [21](#)

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. [41](#)

_____. NEW NOBEYAMA RADIO HELIOGRAPH. **Journal of Astrophysics and Astronomy Supplement**, v. 16, p. 437–+, 1995. [22](#)

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. [22](#)

Nindos, A.; Aurass, H.; Klein, K.-L.; Trottet, G. Radio Emission of Flares and Coronal Mass Ejections. **Solar Physics**, p. 163–+, out. 2008. [20](#)

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. [21](#)

Ramesh, R. Tese (Doutorado) — , Bangalore University, (1999), 1999. [41](#), [42](#), [45](#), [47](#), [48](#), [51](#), [52](#), [57](#)

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. [41](#), [43](#), [57](#)

Ramesh, R.; Subramanian, K. R.; Sundararajan, M. S.; Sastry, C. V. The Gauribidanur Radioheliograph. **Solar physics**, v. 181, p. 439–453, ago. 1998. [41](#)

Ravindra, D. K. Tese (Doutorado) — , Indian Institute of Science, Bangalore, (1983), 1983. [25](#), [41](#), [42](#)

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. [22](#), [39](#)

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. [5](#), [7](#), [39](#), [40](#)

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. [21](#)

Stahli, M.; Benz, A. O. Microwave emission of solar electron beams. **Astronomy and Astrophysics**, v. 175, p. 271–276, mar. 1987. [21](#)

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. [22](#)

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. [21](#)

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. [51](#)

Udaya Shankar, N. **Application of digital techniques to radio astronomy measurements**. Tese (Doutorado) — Bangalore University, 1986. [42](#)

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. [42](#)

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. [41](#)

Wohlleben, R.; Mattes, H.; Krichbaum, T. **Interferometry in radioastronomy and radar techniques**. [S.l.]: Dordrecht: Kluwer, 1991, 1991. [51](#)

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
axis=linspace(-escala_angular,escala_angular,nobs); %degree

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

figure(21)
plot(axis,TPA,'k')
hold on
plot(axis,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

```

```

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

%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(1:250,Ff(:,2*i-1),'k')
    hold on
    plot(1:250,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]/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
    dencorr1(k)=abs(der(k))*exp(sqrt(-1)*velho(k));
end

for k=1:15
    dencorr2(k)=abs(der(k))*exp(sqrt(-1)*novo(k));
end

% espectros
viscorr1=[0 dencorr1 0 zeros(1,3) conj(dencorr1(12)) zeros(1,3) ...
           conj(dencorr1(8)) conj(dencorr1(7)) conj(dencorr1(6))...
           conj(dencorr1(5)) conj(dencorr1(4)) conj(dencorr1(3))...
           conj(dencorr1(2)) conj(dencorr1(1))];
viscorr2=[0 dencorr2 0 zeros(1,3) conj(dencorr2(12)) zeros(1,3) ...
           conj(dencorr2(8)) conj(dencorr2(7)) conj(dencorr2(6))...
           conj(dencorr2(5)) conj(dencorr2(4)) conj(dencorr2(3))...
           conj(dencorr2(2)) conj(dencorr2(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' )
```