



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.16.16.47-TDI

REGISTRO AUTOMÁTICO DE IMAGENS SAR INTERFEROMÉTRICAS

Roberto Neves Salles

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Leila Maria Garcia Fonseca, e José Cláudio Mura, aprovada
em 31 de agosto de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A9KHRP>>

INPE
São José dos Campos
2011

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

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

Membros:

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

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

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

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

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

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.16.16.47-TDI

REGISTRO AUTOMÁTICO DE IMAGENS SAR INTERFEROMÉTRICAS

Roberto Neves Salles

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Leila Maria Garcia Fonseca, e José Cláudio Mura, aprovada
em 31 de agosto de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A9KHRP>>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Salles, Roberto Neves.

Sa33r

Registro automático de imagens SAR interferométricas / Roberto Neves Salles. – São José dos Campos : INPE, 2011. xxii+93 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.16.16.47-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Leila Maria Garcia Fonseca, e José Cláudio Mura.

1. InSAR. 2. Registro. 3. Correlação. 4. Filtro espectral. 5. Interferometria. I. Título.

CDU 528.8.044.2

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dr. Camilo Daleles Rennó



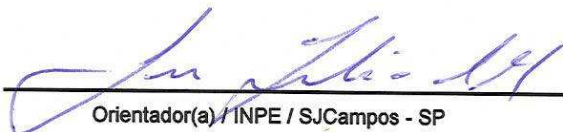
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. José Cláudio Mura



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Luciano Vieira Dutra



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. David Fernandes



Convidado(a) / ITA / SJC Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Roberto Neves Salles

São José dos Campos, 31 de agosto de 2011

A meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores pela paciência ao lidar com minha pessoa e por jamais faltar com o apoio. Agradeço às pessoas do IEAv pelo ótimo ambiente de trabalho, em especial à Cibele e à Leidiane, pela companhia como colegas nessa caminhada. Agradeço ao Maj. Eng. Marcus Vinícius Monteiro pelas informações sobre a aeronave R-99. À CAPES, pela bolsa concedida.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma metodologia para registro automático de imagens SAR interferométricas. Primeiramente as imagens SAR, no formato complexo, são registradas grosseiramente utilizando técnicas de correlação, que resultam em deslocamento em alcance e azimute, na escala de pixel, aplicados à segunda imagem, sem necessidade de interpolação. Opcionalmente pode ser aplicada a filtragem espectral em azimute nas imagens corregistradas, para a melhoria da coerência interferométrica entre elas. A segunda etapa do registro consiste na aplicação do registro fino, através de uma grade de pequenas janelas distribuídas de forma regular sobre cada uma das imagens, onde, para cada janela, é calculado o deslocamento fracionário (da ordem de subpixel) por correlação, resultando em uma grade de deslocamentos, de onde são calculados os polinômios de deformação nos sentidos de alcance e azimute, para a reamostragem da segunda imagem. A partir das imagens corregistradas pode-se aplicar opcionalmente a filtragem espectral no sentido de alcance, para a melhoria da coerência interferométrica entre elas. A qualidade do registro final pode ser avaliada através da análise da imagem de coerência e/ou pelo método dos resíduos aplicados na fase interferométrica gerada a partir das imagens corregistradas. Os algoritmos foram implementados em IDL/ENVI e testados em diversos conjuntos de dados.

AUTOMATIC REGISTRATION OF INTERFEROMETRIC SAR IMAGES

ABSTRACT

This work presents an automatic registration method for interferometric SAR images. First the SAR images, in complex format, are coarse registered using correlation techniques. This results in range and azimuth shifts on a pixel scale, that are applied on the second image, without need for interpolation. Optionally the azimuth spectral filtering can be applied to the corregistered pair, to enhance the interferometric coherence between them. The second step is the fine registration. By using a grid of small regularly distributed windows over both images, a grid of subpixel shifts is calculated by correlation, from which deformation polynomial equations in range and azimuth are calculated and applied to resample the second image. Spectral range filtering can be optionally applied on the corregistered pair, to enhance interferometric coherence between them. The final registration quality can be measured by analysis of the coherence image and/or by residues method applied to the interferometric phase. The algorithms were implemented in IDL/ENVI and tested on many data.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - SAR iluminando um terreno.	6
Figura 2.2 - SAR interferométrico instalado numa aeronave.....	8
Figura 2.3 - Cálculo de B_n e ΔR através das componentes vertical e horizontal.9	9
Figura 2.4 - Configuração InSAR de duas passagens.	11
Figura 2.5 - Adição cumulativa de distorções geométricas: (A) translação, (B) variação de escala, (C) rotação, (D) rotação residual e (E) quebra do paralelismo.	13
Figura 2.6 - Par interferométrico, banda X, R-99, zona rural próxima a Campinas.	16
Figura 2.7 - Comparativo entre (a) correlação cruzada, (b) de fase e (c) de gradiente.	21
Figura 2.8 - Esquema do Registro Grosseiro utilizando a Correlação de Fase.22	22
Figura 2.9 - Registro Fino aplicado às imagens f_1 e f_2' utilizando Correlação de Fase.	24
Figura 2.10 - Deslocamentos (a) sem e (b) com "zero-padding" no domínio do espaço.....	26
Figura 2.11 - Sensor interferométrico (trajetória de vôo perpendicular ao plano)	29
Figura 2.12 - Fase interferométrica da região do Grand Canyon nos EUA, TerraSAR-X.....	32
Figura 2.13 - Comparação entre aquisições. Linha-base de 50 m (a) e de 250 m (b).....	36
Figura 2.14 - Interferograma sem terra plana, região do Grand Canyon, TerraSAR-X.....	37
Figura 2.15 - Descasamento espectral das imagens.	38
Figura 2.16 - Interpretação geométrica do deslocamento espectral.....	39
Figura 2.17 - Espectro no solo do sinal SAR em alcance.	40
Figura 2.18 - Geometria de aquisição com diferentes ângulos de "yaw".	42
Figura 2.19 - Espectro no solo do sinal SAR em azimute.	44
Figura 2.20 - Definição do gradiente de fase.....	45
Figura 2.21 - Esquema do cálculo de resíduos.	45
Figura 3.1 - Monte Etna, SIR-C, banda L, Itália.....	47
Figura 3.2 - Região do Tapajós, ALOS/PALSAR, banda L (HH).....	48
Figura 3.3 - Região do Grand Canyon, TerraSAR-X, banda X.....	49
Figura 3.4 - Região do Campinas, R-99, banda X.....	49
Figura 3.5 - Região de Campinas, R-99, banda L (HH).	50
Figura 3.6 - Fluxograma geral da geração de um DEM através do InSAR.	51
Figura 3.7 - Fluxograma de processamento para registro automático de imagens interferométricas SAR.....	51
Figura 3.8 - Interface do módulo de registro.....	53

Figura 3.9 - Interface disponível para uso da rotina de Filtro Espectral de Alcance.....	55
Figura 3.10 - Estimativa do Doppler central - imagem SIR-C (Etna).....	56
Figura 3.11 - Interface do filtro espectral em azimute.	57
Figura 3.12 - Interface para a geração do produtos interferométricos.....	58
Figura 4.1 - Histogramas de coerência sem e com filtros espectrais.	61
Figura 4.2 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) filtros espectrais, SIR-C, Etna.	61
Figura 4.3 - Fase interferométrica com (a) e sem a fase da Terra plana (b) e a imagem de resíduos (c).....	62
Figura 4.4 - Histograma da coerência sem e com filtros espectrais.	64
Figura 4.5 - Fase interferométrica com Terra plana ilustrando a densidade das franjas.....	65
Figura 4.6 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) filtros espectrais, ALOS/PALSAR.....	66
Figura 4.7 - Imagem da fase interferométrica sem fase da Terra plana (a) e a imagem de resíduos (b).....	67
Figura 4.8 - Histograma da coerência sem e com filtros espectrais.	69
Figura 4.9 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) os filtros espectrais.....	69
Figura 4.10 - Fase interferométrica sem componente de fase da Terra plana (a) e imagem de resíduos (b).....	70
Figura 4.11 - Histograma da coerência sem e com filtros espectrais.	72
Figura 4.12 - Fase interferométrica com fase da Terra plana.....	72
Figura 4.13 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) os filtros espectrais.	74
Figura 4.14 - Fase interferométrica sem a componente de fase da Terra plana (a) e imagem dos resíduos (b).	74
Figura 4.15 - Histograma da coerência sem e com filtros espectrais.....	76
Figura 4.16 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) os filtros espectrais.	77
Figura 4.17 - Comparação entre as fases interferométricas dos Registros Finos.	78
Figura A.1 - Imagem original ao lado da mesma imagem em coordenadas log-polar.	92

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 - Parâmetros do Registro Fino, primeiro par de imagens.....	60
Tabela 4.2 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao primeiro par de imagens.....	60
Tabela 4.3 - Parâmetros do Registro Fino, segundo par de imagens.	63
Tabela 4.4 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao segundo par de imagens.....	63
Tabela 4.5 - Parâmetros do Registro Fino, terceiro par de imagens.	68
Tabela 4.6 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao terceiro par de imagens.....	68
Tabela 4.7 - Parâmetros do Registro Fino, quarto par de imagens.....	70
Tabela 4.8 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao quarto par de imagens.....	71
Tabela 4.9 - Parâmetros do Registro Fino, quinto par de imagens.	75
Tabela 4.10 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao quinto par de imagens.....	75

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i> , arquitetura de computação paralela
DFT	<i>Discreet Fourier Transform</i> ou Transformada Discreta de Fourier
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> ou Transformada Rápida de Fourier
FFTW	<i>Fastest Fourier Transform in the West</i> , biblioteca grátis e portátil que implementa FFT.
GSP	<i>Ground SAR Processor</i> , software de processamento original do R-99
InSAR	<i>Interferometric SAR</i> ou SAR Interferométrico
PROSAR-BR	Processador SAR desenvolvido pelo Instituto de Estudos Avançados
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i> ou Radar de Abertura Sintética

LISTA DE SÍMBOLOS

α	ângulo de inclinação do terreno
B	linha-base
B_n	linha-base normal
B_x	componente x da linha-base
B_y	componente y da linha-base
γ	coeficiente de correlação complexo ou coerência
γ_g	coeficiente de correlação complexo geométrico
γ_{SNR}	coeficiente de correlação complexo da relação sinal ruído
γ_t	coeficiente de correlação complexo temporal
$\Delta\rho$	resolução em range
$\Delta\Phi$	diferença de fase ou fase interferométrica
$\Delta\theta$	diferença do ângulo de visada de duas antenas
Δf_r	deslocamento espectral em alcance
Δf_D	deslocamento espectral em azimute (Doppler)
ΔR	diferença da distância em alcance entre duas antenas
Δx	deslocamento espacial na direção x
Δy	deslocamento espacial na direção y
$E[]$	esperança
f_0	frequência central
f_{DC}	frequência Doppler Centroid
θ	ângulo de visada de uma antena
θ_{sq}	ângulo de "squint"
h	altura de um ponto em relação à altura zero
H	altitude do sensor
Φ	fase
λ	comprimento de onda
R	distância em alcance
$W \{ \}$	operador do cálculo de resíduo
Ψ	ângulo de "yaw"

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Aquisição SAR e InSAR.....	5
2.2 Registro de Imagens.....	12
2.2.1 Métodos de registro locais ou por Pontos de Controle (PCs).....	14
2.2.2 Métodos de registro globais	16
2.3 Técnicas de Correlação.....	17
2.3.1 Correlação Cruzada	17
2.3.2 Correlação de Fase	18
2.3.3 Correlação de Gradiente	19
2.4 Registro Interferométrico Grosseiro	22
2.5 Registro Interferométrico Fino.....	23
2.5.1 Disposição das janelas.....	25
2.5.2 Técnica de "zero-padding" no domínio do espaço	25
2.5.3 Técnica de "zero-padding" no domínio da frequência	27
2.5.4 Transformação polinomial	28
2.6 Geração do Interferograma.....	29
2.7 Descorrelação entre as imagens SAR interferométricas	32
2.8 Filtragem Espectral	37
2.8.1 Filtragem Espectral em Alcance.....	39
2.8.2 Filtragem Espectral em Azimute.....	42
2.9 Método dos Resíduos	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 Descrição do material.....	47
3.2 Metodologia.....	50
3.2.1 Avaliação pela coerência interferométrica.....	52
3.2.2 Avaliação pela contagem de resíduos.....	52

3.2.3	Avaliação da rotação e escala no algoritmo de registro	53
3.2.4	Implementação do Registro Grosseiro	53
3.2.5	Implementação do Registro Fino.....	54
3.2.6	Implementação do Filtro Espectral em Alcance	55
3.2.7	Implementação do Filtro Espectral em Azimute	56
3.2.8	Geração dos produtos interferométricos	57
4	RESULTADOS	59
4.1	Par interferométrico do sensor SIR-C	59
4.2	Par interferométrico do sensor ALOS/PALSAR.....	63
4.3	Par interferométrico do sensor TerraSAR-X.....	67
4.4	Par interferométrico do sensor R-99 (Banda X)	70
4.5	Par interferométrico do sensor R-99 (Banda L).....	75
5	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
	GLOSSÁRIO	87
	APÊNDICE A - DETECÇÃO DE ROTAÇÃO E ESCALA	89
A.1	Imagens com Translação e Rotação	89
A.2	Imagens com Translação, Rotação e Escala.....	90

1 INTRODUÇÃO

A interferometria SAR (InSAR) é uma técnica comprovada e estabelecida de obtenção de informações através da diferença de fase de duas imagens de um Radar de Abertura Sintética (SAR) no formato complexo. Por permitir a abordagem de uma grande área num único método, a interferometria tem sido adotada em larga escala em pesquisas e nas áreas operacional e comercial (ROSEN et al., 2000).

Esta técnica teve como principal aplicação a produção de modelos digitais de elevação. Hoje ela se estende à análise de series temporais de imagens InSAR para estimativa de deformação e subsidência (MORA et al., 2003; WU et al., 2008), bem como para mapeamento de alterações na superfície causadas por terremotos, deslocamento de geleiras ou atividade vulcânica (WANG et al., 2001).

Os radares operam com ondas de rádio, em geral microondas, ao contrário de sensores ópticos, e emitem sua própria iluminação, sendo portanto independentes de condições meteorológicas e da iluminação do sol. A contrapartida destas vantagens é a maior necessidade de processamento de sinais, de grande potência de transmissão e uma imagem de geometria resultante não convencional (BAMLER; HARTL, 1998).

Em 2004, o projeto PROSAR-BR, desenvolvido na divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), viabilizou as necessidades operacionais de processamento de imagens de radar do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), substituindo uma arquitetura de alto custo e performance insuficiente por computadores pessoais de baixo custo interligados em rede.

Apesar de concluído com sucesso, o sistema não contempla a geração de modelo digital de elevação utilizando um par de imagens SAR no formato complexo. O sistema de processamento interferométrico atualmente disponível

para o SAR da aeronave R-99, chamado GSP, apresenta os mesmos problemas que o sistema já substituído: arquitetura de alto custo e performance insuficiente. Além destes problemas, o software requer muita intervenção de operadores e produz resultados limitados (ZALOTI, 2008).

Dentro deste contexto, este trabalho tem como meta buscar uma solução viável para a implementação da interferometria numa futura atualização do PROSAR-BR. Para tanto, o registro automático de imagens complexas, que é o primeiro passo para a interferometria, é fundamental e o foco do trabalho proposto.

O sucesso deste trabalho permitirá, futuramente, a produção de modelos digitais de elevação com dados capturados pelas aeronaves R-99 através de software nacional e de código disponível para a Força Aérea. Os modelos produzidos poderão ser utilizados, dentre outras aplicações, para preenchimento do vazio cartográfico amazônico, que está sendo conduzido pela Casa Civil da Presidência da República. Neste último, cabe ao R-99 cobrir uma área de 658.000 km². Como a produção cartográfica requer a geração de modelos digitais de elevação, que por sua vez demandam tempo e recurso computacionais, a automação de registro proposta vem de encontro a estas necessidades no sentido de reduzir estes dois fatores.

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver uma metodologia e implementar um método de registro automático de imagens *single-look* SAR interferométricas utilizando técnicas de correlação.

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) Avaliar a qualidade do registro das imagens SAR interferométricas através das medidas de resíduo e de coerência;
- b) Comparar o método de correlação de fase com outros métodos de registro baseados em área;
- c) Comparar o efeito dos filtros espectrais na qualidade da coerência interferométrica final.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conceito da interferometria de radar para mapeamento topográfico foi pela primeira vez apresentado por Graham (1974). Na época desta demonstração, as informações capturadas pelo radar e a respectiva diferença de fase entre elas eram gravadas em filme fotográfico, não havendo processamento posterior. Uma década mais tarde estas informações seriam gravadas digitalmente e, desde então, processamentos adicionais tornaram-se possíveis, permitindo grandes avanços na interferometria. A geração de um interferograma tem como uma etapa imprescindível o registro entre as imagens SAR no formato complexo.

Este capítulo apresenta os aspectos mais importantes de um radar interferométrico. A seção 2.1 explica sucintamente a aquisição de imagens através de um Radar de Abertura Sintética (SAR), bem como o conceito da interferometria e configurações que permitem a geração de um interferograma através da aquisição interferométrica (InSAR). A seção 2.2 explica conceitos básicos de registro. A seção 2.3 expõe três técnicas de correlação utilizadas neste trabalho. As seções 2.4 e 2.5 tratam dos mecanismos de registro utilizados para produção de interferogramas. A seção 2.6 aborda a geração de interferogramas. A seção 2.7 explica os fatores que causam a descorrelação em interferogramas enquanto a seção 2.8 define filtros que, idealmente, eliminam toda a descorrelação geométrica. Por fim a seção 2.9 explica os resíduos.

2.1 Aquisição SAR e InSAR

Um radar faz imageamento de regiões utilizando-se de uma antena direcional, cujos pulsos de microondas emitidos atingem o solo e se espalham em diversas direções. Parte deste espalhamento retorna à antena, sendo então gravado para processamento posterior. O sinal gerado a partir do restoespalhamento é dependente da frequência e polarização da onda eletromagnética, da geometria da região imageada, além de fatores que

alterem a constante dielétrica do alvo como a unidade. A resolução fina é obtida pela técnica de abertura sintética (GRAHAM, 1974).

No imageamento por radar de visada lateral, os objetos em três dimensões são projetados em duas dimensões, de acordo com sua posição em alcance e linha de vôo ou azimute. Esta configuração de aquisição de dados, quando processada, gera o que se chama de imagem em "slant range" ou coordenadas do radar. Uma imagem na projeção "slant range" pode ser corrigida para coordenadas de projeção no solo. A Figura 2.1 ilustra a projeção de uma superfície em coordenadas de alcance do radar.

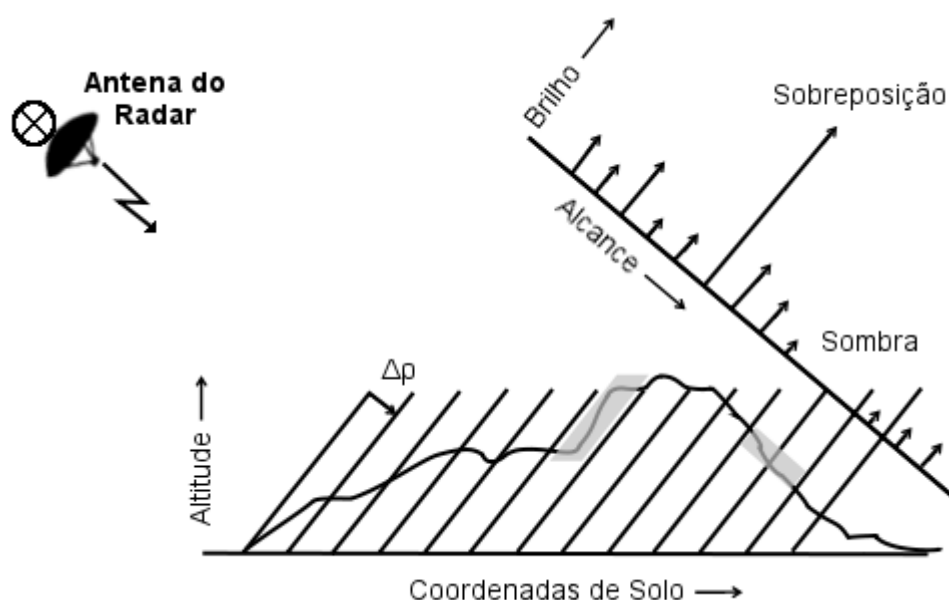


Figura 2.1 - SAR iluminando um terreno.
Fonte: Adaptado de Rosen et al. (2000).

Observa-se na Figura 2.1, que as coordenadas de solo são projetadas de acordo com o eixo alcance do radar. Isso gera efeitos de sobreposição ("layover") e de sombra. $\Delta\rho$ refere-se à resolução em alcance. Nota-se a influência do terreno quando a frente de onda atinge o solo. A intensidade do retorno está associada ao brilho da imagem, este último representado por setas perpendiculares ao eixo do alcance - quanto maior a seta, maior o brilho. O

círculo com um X representa a plataforma que transporta o radar, numa trajetória perpendicular ao plano da imagem.

Em imageamento por radar em terreno acidentado, apesar do sistema de visada lateral, é possível que dois ou mais pontos possuam exatamente o mesmo alcance. Quando isto ocorre, todos estes pontos são representados (i.e. suas respostas somadas) na mesma coordenada de radar da imagem "*slant range*". Logo, pela configuração apresentada na Figura 2.1, não é possível recuperar a informação de altitude.

A Figura 2.2 ilustra uma plataforma de radar com duas antenas em operação, separadas por uma dada distância chamada de linha-base. Nesta configuração, dois pontos A e B eqüidistantes da Antena 1 possuem distâncias diferentes até a Antena 2, ou seja, mesmo quando dois pontos possuem as mesmas coordenadas de radar devido ao relevo para uma das antenas, a outra antena terá capturado coordenadas de radar diferentes para os mesmos pontos, resolvendo o problema da ambigüidade. Este é o conceito fundamental de um radar interferométrico (InSAR).

Devido à pequena mudança de geometria proporcionada pela separação entre as antenas, a diferença de fase entre as aquisições da Antena 1 e da Antena 2 varia de acordo com a altura do alvo iluminado (LI; GOLDSTEIN, 1990).

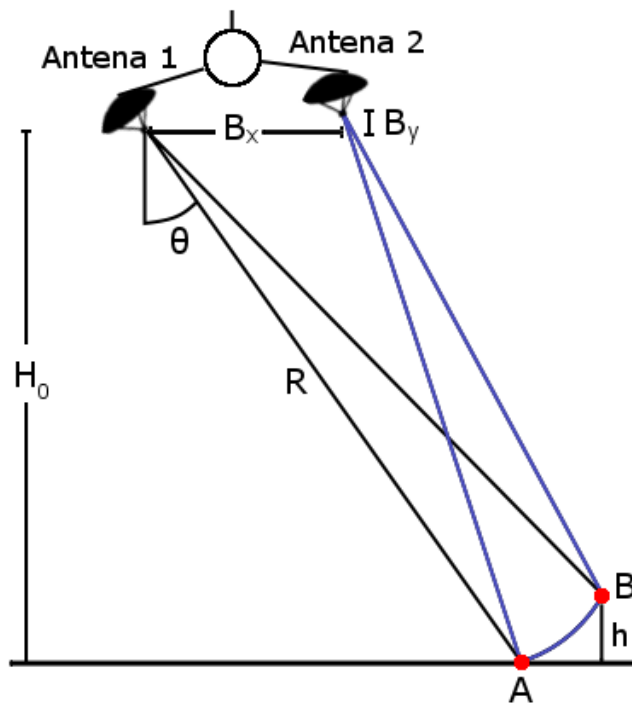


Figura 2.2 - SAR interferométrico instalado numa aeronave.
 Fonte: Adaptado de Li e Goldstein (1990).

Observando a Figura 2.2, é possível relacionar a diferença de fase com a diferença das distâncias. Tomando ΔR como a diferença entre as distâncias de um ponto no solo até as Antenas 1 e 2, pode-se formular a diferença de fase $\Delta\Phi$ da seguinte maneira:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R . \quad (2.1)$$

Sendo a fase uma medida proporcional ao comprimento de onda, as medições do InSAR tornam-se muito precisas e sensíveis à topografia (LI; GOLDSTEIN, 1990).

Ainda com base na Figura 2.2, pode-se relacionar a fase com o ângulo de visada θ e este último com a altura h de um ponto. Os parâmetros citados são os mesmos utilizados na Figura 2.2, onde B_x e B_y são componentes da

distância de separação entre as antenas (linha-base) e θ é o ângulo de visada. A relação é dada por:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [B_x \sin\theta - B_y \cos\theta] . \quad (2.2)$$

A linha-base efetiva que causa a variação de fase, também conhecida como linha-base normal é dada por:

$$B_n = B_x \cos\theta + B_y \sin\theta . \quad (2.3)$$

A diferença ΔR entre os alcances de cada antena até o alvo pode ser expressa pelas componentes vertical e horizontal da linha-base por:

$$\Delta R = B_x \sin\theta - B_y \cos\theta . \quad (2.4)$$

A Figura 2.3 ilustra o cálculo de B_n e ΔR através das componentes vertical e horizontal da linha-base.

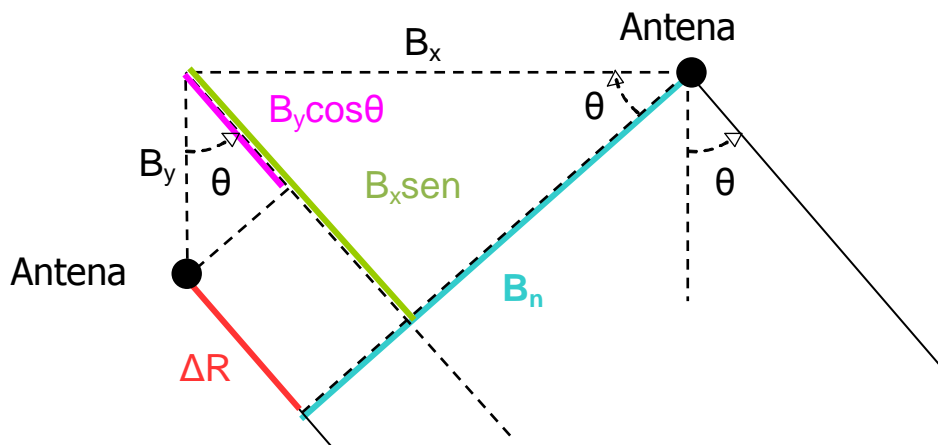


Figura 2.3 - Cálculo de B_n e ΔR através das componentes vertical e horizontal.

Conhecendo-se o ângulo de visada, da respectiva distância R até o alvo e da altitude da plataforma H_0 , pode-se então calcular a altura h de um ponto.

$$h = H_0 - R(\cos\theta) \quad (2.5)$$

A incerteza de cada parâmetro R , B_x , B_y , H_0 e Φ contribui para incertezas nos cálculos de medidas da altura h . Incertezas de alcance R são causadas por problemas do relógio interno do radar (*clock jitter*) ou por características da propagação da onda eletromagnética na atmosfera, quando for orbital. O tamanho da linha-base também define a precisão do cálculo da altura. Uma linha-base curta causa imprecisão enquanto uma muito longa causa perda da coerência, impossibilitando a medição da diferença de fase. Esta linha-base limite é chamada de linha-base crítica e suas conseqüências serão exploradas na seção 2.8. Já a imprecisão da linha de vôo H_0 causa erros diretos no cálculo, conforme a Equação 2.5. Erros na fase Φ são gerados por quatro contribuições principais: relação sinal ruído, descorrelação por causa da linha-base e pixels registrados incorretamente (LI; GOLDSTEIN, 1990).

Esta última contribuição foi o foco deste trabalho pois, segundo Lin et al. (1992), para se obter os padrões de interferência, também conhecidos como franjas, as imagens necessitam estar corregistradas com precisão de subpixel. Vale mencionar que existem outras abordagens mais custosas sendo estudadas atualmente, que formam, focalizam e fazem a interferência simultaneamente (PAYNE, 2003).

Apesar da Figura 2.2 ilustrar duas antenas numa mesma plataforma, a interferometria de imagens SAR pode ser realizada com duas passagens distintas, utilizando-se uma única antena, como ilustrado na Figura 2.4, normalmente para sistemas orbitais. Existe também a operação em "tandem", quando, por exemplo, dois satélites diferentes operam conjuntamente na captura de dados (KRIEGER et al., 2007). Ambas as abordagens causam, no entanto, mais um tipo de impacto, a descorrelação temporal, causada por

mudanças geométricas ou de composição da superfície ou ainda deslocamento da mesma.

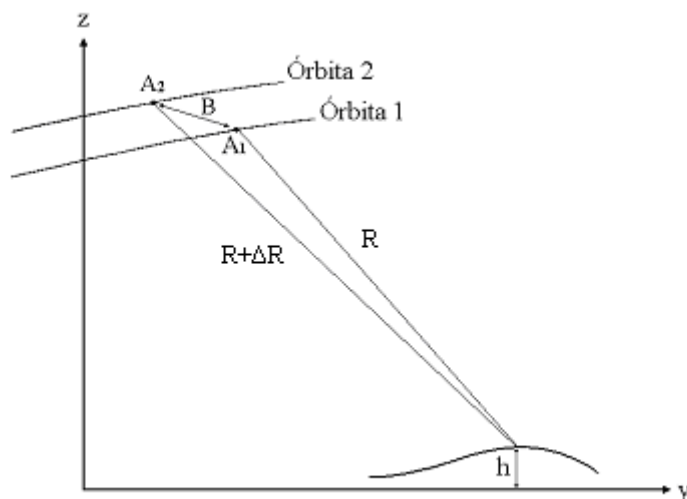


Figura 2.4 - Configuração InSAR de duas passagens.

As configurações interferométricas citadas até o momento são chamadas de "*cross-track*", pois as antenas ficam, idealmente, perpendiculares ao sentido de vôo ou órbita durante a captura dos dados. Existe ainda uma configuração alternativa para o InSAR que se aproveita das mudanças temporais ou deslocamentos para realizar medições. Um exemplo de aplicação é a detecção de movimentos de correntes oceânicas. Neste caso específico são chamados radares interferométricos "*along-track*" (ROSEN et al., 2000). Para este trabalho foram utilizados apenas os InSAR "*cross-track*", como é o caso do R-99 e configurações orbitais de duas passagens.

Para os InSAR "*cross-track*", principalmente de duas passagens, o controle da separação (linha-base) entre as antenas ou passagens é muito importante para se obter bons resultados com a interferometria. Segundo Zebker e Villasenor (1992), esse é um dos componentes que mais influenciam um sistema interferométrico de radar.

Zebker e Villasenor (1992) realizaram uma simulação exploratória de rotação de um elemento de resolução utilizando parâmetros equivalentes aos do SEASAT. Foi constatado que o sinal se descorrelaciona conforme o ângulo de rotação, ficando quase que completamente descorrelacionado em torno de $2,8^\circ$ para a banda L e $0,7^\circ$ para a banda C. Os dados reais do satélite com os quais trabalharam tinham órbitas paralelas com margem de $0,02^\circ$, tornando estes efeitos desprezíveis. A simulação demonstra de forma clara que o controle da geometria de aquisição é uma consideração fundamental para o registro de imagens interferométricas, principalmente quando suas trajetórias podem sofrer maiores alterações, como no caso dos radares aerotransportados.

Por esta mesma razão, outro fator que não pode ser ignorado para um bom interferograma é a compensação de movimento. Mudanças na atitude da plataforma causam mudanças distintas nas antenas e isso causa uma grave descorrelação da fase. Este fator torna a compensação de movimento de vital importância para a alta resolução de um sistema interferométrico SAR (MADSEN et al., 1993).

2.2 Registro de Imagens

O registro é o procedimento pelo qual se associa a pontos de uma imagem de referência M (*master*) pontos de uma segunda imagem S (*slave*), respeitando o posicionamento geográfico. Desta forma, dado um ponto (x,y) da imagem M, as coordenadas (x,y) representarão a mesma localização geográfica em S. Apesar de ser um conceito simples, vários fatores dificultam o processo de registro.

Exemplos de distorções sistemáticas existentes em imagens interferométricas que podem ser corrigidas pela aplicação de registro são: translação, escala, rotação, rotação residual e quebra do paralelismo. A Figura 2.5 ilustra estas distorções cumulativamente: (A) representa uma translação, (B) uma translação com variação de escala, (C) uma translação com variação de escala e rotação, (D) uma translação com variação de escala, rotação e rotação

residual e (E) além dos efeitos anteriores, possui também a quebra do paralelismo.

Note que estes são os princípios mais básicos. Nas imagens de sensoriamento remoto é bastante comum a presença de distorções sistemáticas na imagem como um todo, pois a trajetória e a geometria de aquisição tendem a ser muito controladas na tentativa de evitar estes efeitos em primeiro lugar. Este cuidado é ainda maior na aquisição de pares de imagens interferométricas.

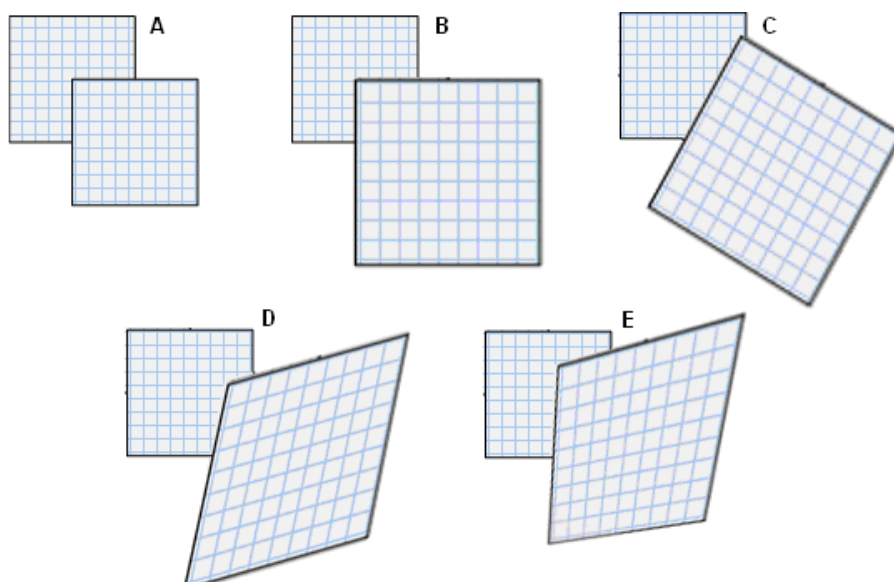


Figura 2.5 - Adição cumulativa de distorções geométricas: (A) translação, (B) variação de escala, (C) rotação, (D) rotação residual e (E) quebra do paralelismo.

De forma geral, o registro de duas imagens é dividido em quatro etapas (FONSECA; MANJUNATH, 1996):

- a) *Identificação de Feições*. Identifica um conjunto de feições relevantes nas duas imagens, tal como contornos, interseções ou regiões. Cada feição por sua vez possui associada a ela um ponto de controle (PC).

- b) *Casamento de Feições*. Estabelece a correspondência entre as feições, de modo que a mesma feição seja encontrada em ambas as imagens.
- c) *Transformações Espaciais*. Determina as funções de mapeamento, utilizando-se de pontos de controle (PCs), para determinar o casamento dos restantes pontos da imagem.
- d) *Interpolação*. Reamostra uma das duas imagens com relação à outra, utilizando as funções de mapeamento.

O registro de imagens pode ainda ser dividido em métodos locais e métodos globais (XIE et al., 2003). Métodos globais envolvem encontrar uma única transformação e aplicá-la na imagem como um todo. A feição, neste caso, é única e equivale à imagem inteira. Já os métodos locais são conhecidos como métodos de pontos de controle, através dos quais várias feições são definidas e associadas a pontos de controle e vice-versa. Neste último, as funções de mapeamento advém do mapeamento gerado pela associação entre os pontos de controle das feições correspondentes encontradas em cada imagem.

2.2.1 Métodos de registro locais ou por Pontos de Controle (PCs)

O primeiro passo dos métodos locais de registro é a obtenção dos pontos de controle (PCs). Baseado nestes PCs, uma segunda imagem S (*slave*) é corrigida e mapeada para a imagem de referência M (*master*).

Pontos de controle podem ser obtidos através de assistência humana. Neste caso o registro é conhecido como Registro Manual (FONSECA; MANJUNATH, 1996). O procedimento é tedioso e pode ser impraticável quando há uma quantidade muito grande de dados.

Os pontos de controle também podem ser obtidos de forma automática. Existem, basicamente, dois métodos: métodos baseados em área e os baseados em feições. No primeiro caso, o ponto de controle é o centro de uma

janela de pontos e no segundo cada feição é associada a um ponto de controle (FONSECA; MANJUNATH, 1996).

Para a extração de feições, a imagem pode estar representada tanto no domínio do espaço como no domínio da frequência. São utilizados cruzamentos, bordas, regiões, linhas, descontinuidade de curvaturas entre outros, sendo bordas e regiões os mais comumente utilizados. Na etapa seguinte, casamento das feições, os algoritmos usam os atributos destas feições como forma, perímetro, cor, textura entre outros para encontrar feições correspondentes nas duas imagens.

Conforme mencionado anteriormente, para a geração de interferogramas é desejável o registro da ordem de subpixel. Bentoutou et al. (2005) propôs um algoritmo de registro automático baseado em feições capaz de realizar registro de imagens com precisão subpixel. Dois pontos importantes foram discutidos em seu artigo. O primeiro é a execução de um registro grosseiro quando as distorções geométricas são grandes ou quando se deseja um registro mais rápido. Este ponto é importante para um órgão operacional como a Força Aérea. No entanto, o segundo ponto é que seu algoritmo é robusto e confiável desde que existam feições únicas nas imagens. O algoritmo falha se as imagens não contém feições únicas, como foi o caso de regiões de montanha abordado no artigo. Considerando que o procedimento pesquisado poderá ser, no futuro, aplicado para a região da floresta amazônica, fica claro, pela possibilidade de ambigüidade de feições, que não é ideal.

É preciso lembrar que, no caso interferométrico, as imagens são do tipo "*Single-Look Complex*" (SLC). Estas imagens possuem um forte efeito de ruído *speckle* e poucas feições únicas. A Figura 2.6 mostra um trecho de um par interferométrico SLC em amplitude da banda X do R-99. A imagem ilustra a dificuldade de realizar o casamento de feições em um par de imagens InSAR, mesmo em regiões não muito homogêneas como a zona rural apresentada.

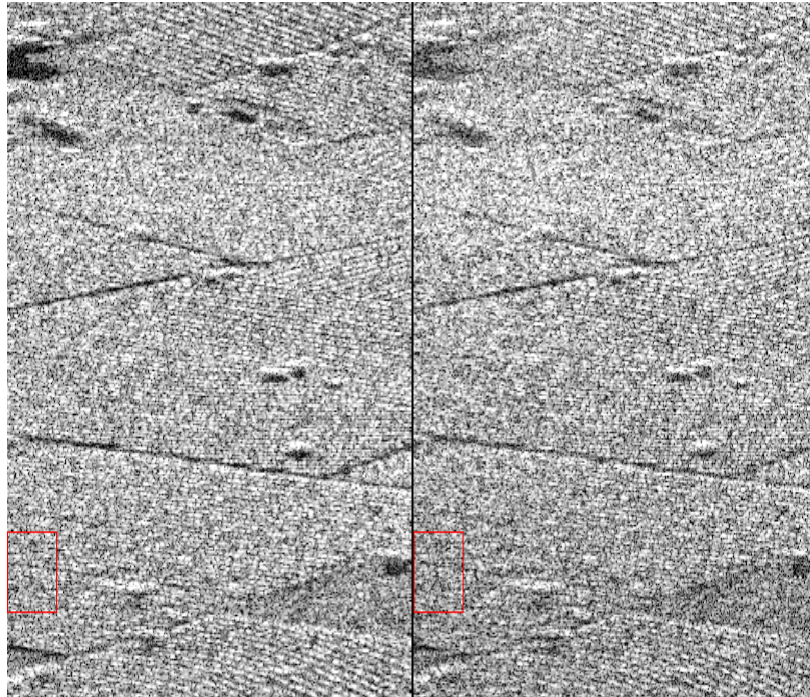


Figura 2.6 - Par interferométrico, banda X, R-99, zona rural próxima a Campinas.

2.2.2 Métodos de registro globais

Os métodos globais caracterizam-se por utilizar a imagem toda ou uma única janela contida nas imagens para o cálculo das distorções, sendo assim baseado em área. O registro por área pode ser feito utilizando diretamente os valores dos pixels de uma imagem ou utilizando métodos baseados na transformada discreta de Fourier (DFT).

Métodos que utilizam DFT ou a transformada rápida FFT são conhecidos como técnicas de correlação. Neste trabalho foram estudadas as técnicas de correlação cruzada, correlação de fase e correlação de gradiente. A principal característica dos métodos de correlação é a robustez com relação a ruídos tais como variações na iluminação da cena. De Castro e Morandi (1987) explicam a correlação de fase, e expandem o método para incluir detecção de rotação. Reddy e Chatterji (1996) adicionam detecção de escala a esta técnica, tornando-a bastante flexível, citando em seus experimentos robustez na

presença de ruídos. Abdelfattah e Nicolas (2004) também usam uma técnica semelhante buscando precisão subpixel. A fase do domínio da frequência em imagens possui características bastante interessantes e não é surpreendente que seja alvo de estudos há décadas (OPPENHEIM; LIM, 1981).

Além dos fatores citados, as técnicas de correlação são automáticas, ou seja, permitem a criação de um algoritmo automático mesmo considerando as limitações inerentes destes métodos, isto é, não abordarem rotação residual e quebra de paralelismo. O InSAR tem requisitos fortes de geometria de aquisição, por exemplo rotas idealmente paralelas, com o objetivo de evitar as causas de descorrelação citadas anteriormente. Logo as distorções entre as imagens tendem a ser distorções simples e as técnicas de correlação suficientes para o registro.

2.3 Técnicas de Correlação

Três técnicas de correlação foram implementadas neste trabalho: Correlação Cruzada, Correlação de Fase e Correlação de Gradiente. As duas últimas são variantes da técnica tradicional, mas com características específicas. Recentemente, Tzimiropoulos et al. (2010) fez uma revisão de todas estas técnicas. Suas definições e principais diferenças são mostradas a seguir.

2.3.1 Correlação Cruzada

Sejam dois sinais complexos f_1 e f_2 iguais, exceto por um deslocamento (x_0, y_0) , isto é,

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) . \quad (2.6)$$

O deslocamento (x_0, y_0) pode ser estimado como o valor máximo da função de correlação cruzada bidimensional

$$C(x, y) = f_1(x, y) * f_2^*(-x, -y) \quad (2.7)$$

onde a estrela representa a convolução e o asterisco o complexo conjugado. Através do teorema da convolução da transformada de Fourier, a Equação 2.7 é equivalente a encontrar o valor máximo de

$$C(x, y) = \text{DFT}^{-1}(F_1(\xi, \eta)F_2^*(\xi, \eta)) \quad (2.8)$$

onde F_1 e F_2 são as respectivas transformadas discretas de Fourier dos sinais f_1 e f_2 , DFT^{-1} representa a transformada discreta inversa de Fourier e o asterisco representa o complexo conjugado.

2.3.2 Correlação de Fase

A correlação de fase é bastante semelhante ao método anterior. A técnica aplicada a registro de imagens foi pela primeira vez apresentada por Kuglin e Hines (1975).

Considerando dois sinais f_1 e f_2 iguais, exceto por um deslocamento (x_0, y_0) , conforme a Equação 2.6, aplicando-se a transformada de Fourier em ambos os lados da equação, suas correspondentes transformadas de Fourier F_1 e F_2 estarão relacionadas da seguinte maneira:

$$F_2(\xi, \eta) = e^{-j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} \times F_1(\xi, \eta) . \quad (2.9)$$

O espectro de potência cruzado entre f_1 e f_2 é então definido por:

$$\frac{F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)}{|F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)|} = e^{j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} . \quad (2.10)$$

O teorema do deslocamento da transformada de Fourier (*Fourier shift theorem*) (LYONS, 2004) garante que a fase do espectro de potência cruzado é equivalente a diferença de fase entre os dois sinais. Ao tomar a transformada inversa da Equação 2.10, tem-se a uma função que é um impulso, isto é, ela é aproximadamente zero em toda a sua extensão, exceto na posição que representa o deslocamento (x_0, y_0) que é necessário para registrar as imagens em relação à translação.

Ou seja, enquanto a correlação cruzada procura encontrar o valor máximo da seqüência definida pela equação 2.8, a Correlação de Fase PC consiste em encontrar o valor máximo de

$$PC(x, y) = \text{DFT}^{-1} \left(\frac{F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)}{|F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)|} \right). \quad (2.11)$$

2.3.3 Correlação de Gradiente

Segundo Argyriou e Vlachos (2003), a correlação de gradiente é um método que produz resultados melhores que a correlação de fase, no que se refere à resolução da ordem de subpixel, apesar de ter um custo computacional maior.

A Correlação de Gradiente é definida da seguinte maneira: para cada localização de pixel, excetuando-se os pixels da borda, gradientes horizontais e verticais aproximados são estimados usando diferenciação central, ou seja:

$$g_i^h(x, y) = f_i(x + 1, y) - f_i(x - 1, y) \quad (2.12)$$

$$g_i^v(x, y) = f_i(x, y + 1) - f_i(x, y - 1) \quad (2.13)$$

onde h e v representam os gradientes horizontal e vertical e $i=1,2$ representa o par de imagens. Ambos os termos são combinados numa única representação complexa

$$g_i(x, y) = g_i^h(x, y) + jg_i^v(x, y) \quad (2.14)$$

que contém as informações de magnitude e fase para cada pixel. Considerando os novos sinais g_1 e g_2 , calcula-se a correlação cruzada entre eles, conforme a subseção 2.3.1. Desta maneira, a Correlação de Gradiente consiste em encontrar o valor máximo de

$$GC(x, y) = \text{DFT}^{-1}(G_1(\xi, \eta) G_2^*(\xi, \eta)) \quad (2.15)$$

onde G_1 e G_2 são as transformadas de Fourier de g_1 e g_2 , respectivamente.

A Figura 2.7 ilustra o resultado da aplicação das três técnicas em um par deslocado de imagens de 600x600. Os eixos da base dos gráficos representam os eixos da imagem, enquanto o eixo vertical representa o valor normalizado dos módulos das coerências em cada posição. O gráfico (a) representa a correlação cruzada, enquanto o gráfico (b) representa a correlação de fase e o gráfico (c) representa a correlação de gradiente.

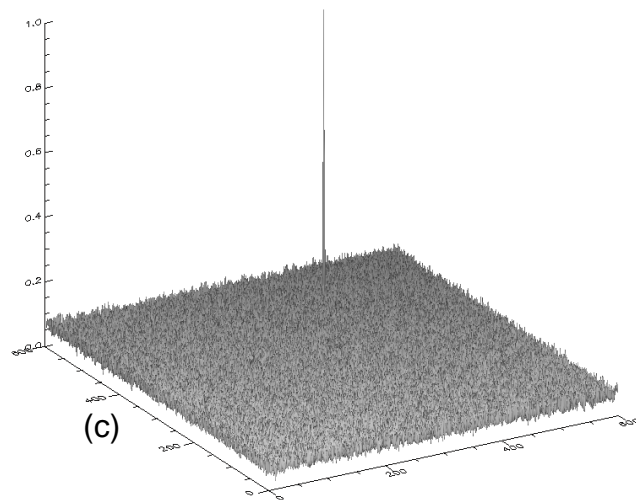
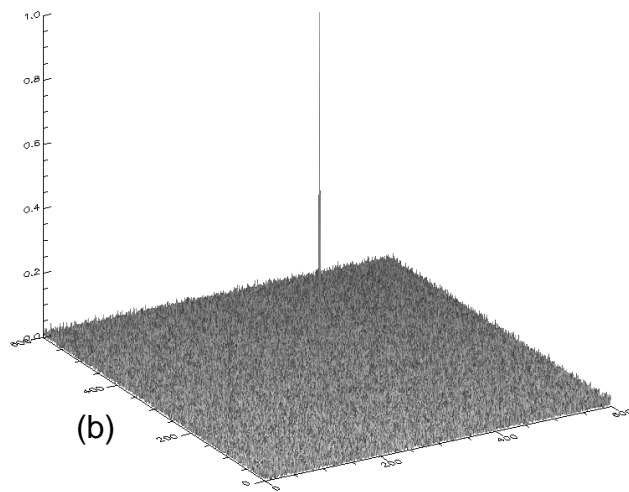
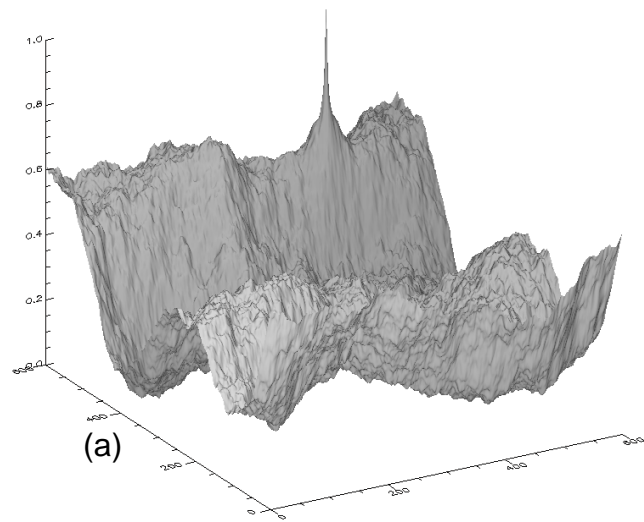


Figura 2.7 - Comparativo entre (a) correlação cruzada, (b) de fase e (c) de gradiente.

Como pode ser observado, a correlação cruzada apresenta vários valores elevados porém um único pico. Este pico tende a se achatar e se perder na medida em que as imagens se tornam menos semelhantes, por exemplo, por causa de ruído. Já a correlação de fase e a correlação de gradiente apresentam picos bastante agudos e estreitos e esta tendência permanece mesmo após uma razoável quantidade de ruído. Em todos os gráficos o pico se localiza na posição de maior similaridade entre as imagens, portanto representa a posição de registro estimada.

2.4 Registro Interferométrico Grosseiro

O Registro Grosseiro utiliza a magnitude das duas imagens complexas do par interferométrico como sinais de entrada para um dos métodos de correlação apresentados anteriormente. O uso do termo grosseiro se deve à sua resolução estar na escala de pixel. O Registro Grosseiro fornece apenas correção sistemática quanto à translação. Em contrapartida a esta desvantagem, não há a necessidade de interpolação. Ao final são obtidos os deslocamentos não fracionários necessários para ajustar o par de imagens. A Figura 2.8 ilustra o procedimento utilizando a Correlação de Fase.

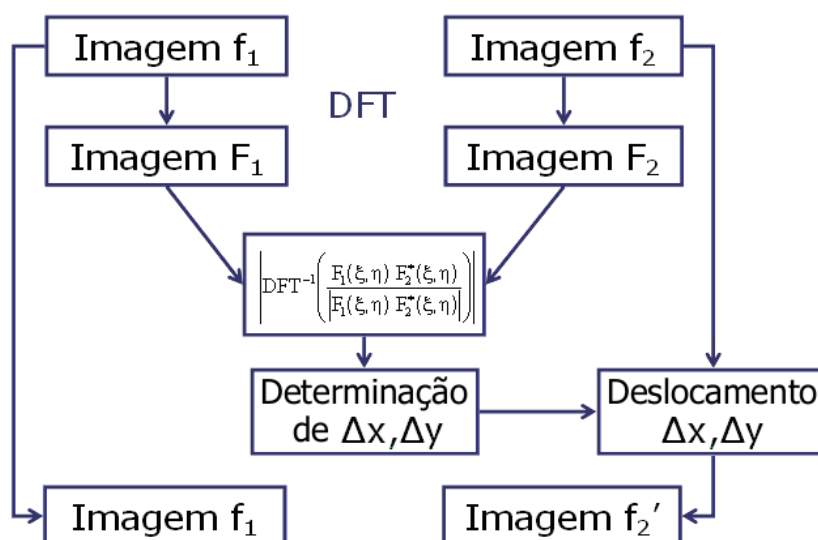


Figura 2.8 - Esquema do Registro Grosseiro utilizando a Correlação de Fase.

A Figura 2.8 mostra cada etapa do Registro Grosseiro. Primeiramente, ambas as imagens são transformadas para o domínio da frequência. Em seguida o deslocamento ideal é estimado através do pico da correlação de fase, embora qualquer uma das correlações poderia ser utilizada. Por fim a imagem f_2 é corrigida com os deslocamentos não fracionários obtidos, Δx e Δy , gerando uma nova imagem corrigida f_2' . Cada posição de pixel (x,y) de f_2' é calculado com a seguinte transformação rígida aplicada à imagem f_2 :

$$\begin{aligned}x' &= x + \Delta x \\y' &= y + \Delta y\end{aligned}\tag{2.16}$$

Como pode ser observado na Equação 2.16, nenhuma interpolação ocorre. As coordenadas x e y de um pixel na imagem f_2 são acrescidas dos valores de translação inteiros Δx e Δy e as coordenadas resultantes x' e y' de f_2' coincidem com a grade de pontos da imagem f_2 .

2.5 Registro Interferométrico Fino

O Registro Fino tem como objetivo obter o registro subpixel e adaptar-se a diferentes tipos de distorção além da translação. O Registro Fino também utiliza uma técnica de correlação para cálculo de deslocamentos horizontais (na direção de alcance) e verticais (na direção de azimute), porém o faz em uma grade de pequenas janelas distribuídas regularmente no par de imagens já registrado grosseiramente.

Para atingir um ajuste da ordem de subpixel, cada par de pequenas janelas é expandido por interpolação por um fator K , permitindo com isso atingir espaçamento $1/K$ pixel. Ou seja, realiza o cálculo de diversos deslocamentos locais com espaçamento subpixel. Os deslocamentos calculados na grade de janelas ficam associados a Pontos de Controle (PC) definidos como a posição central do par de janelas. A partir da grade de deslocamentos fracionários obtidos (da ordem de subpixel), calcula-se os polinômios de deformação nos

sentidos de alcance e azimute, que são utilizados na reamostragem da segunda imagem. A Figura 2.9 ilustra o algoritmo de forma esquemática enquanto as subseções seguintes detalham seu funcionamento.

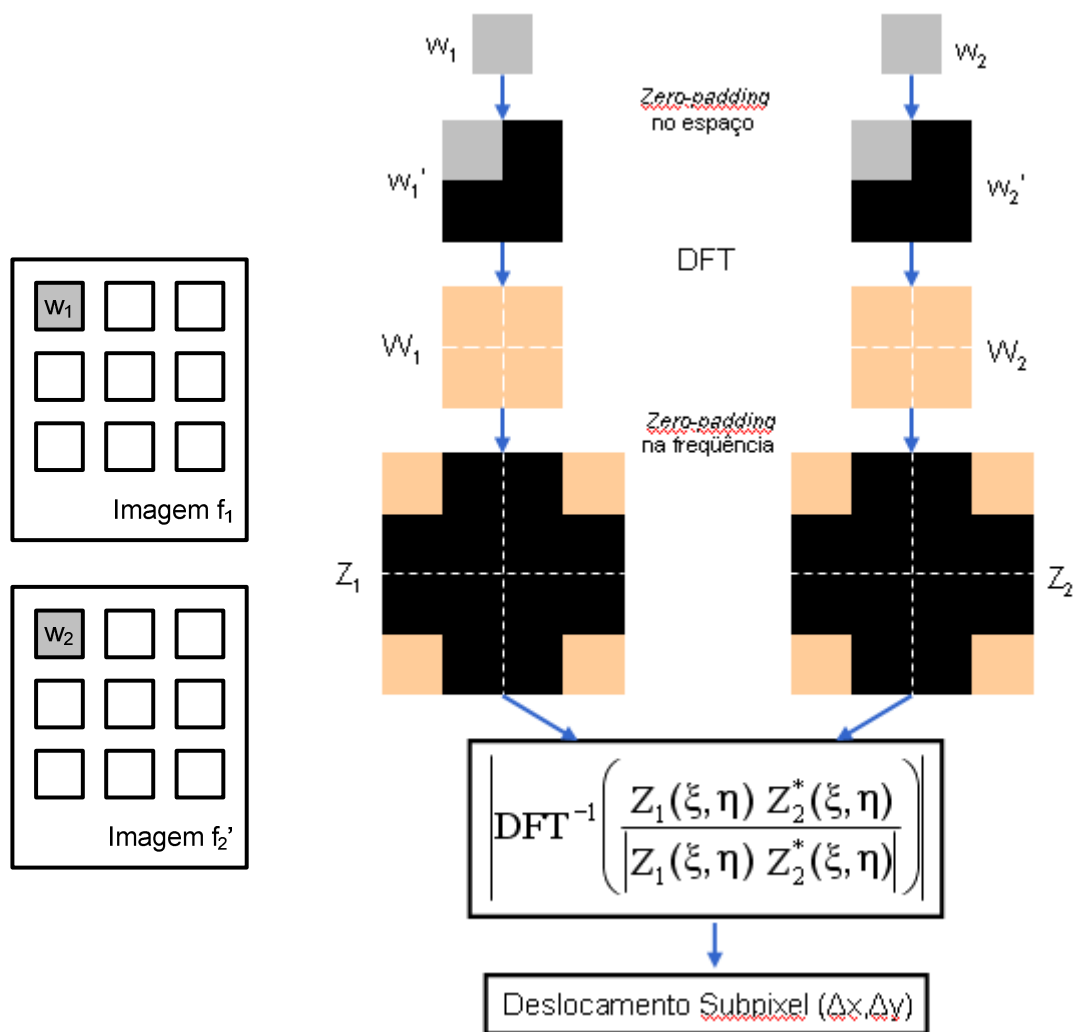


Figura 2.9 - Registro Fino aplicado às imagens f_1 e f_2' utilizando Correlação de Fase.

Alguns parâmetros são necessários para o Registro Fino, tais como: o tamanho da janela, w_1 e w_2 ; a distância da borda; o número de janelas no eixo x e no eixo y; o fator de expansão, cujo valor igual a 10 detecta até 0,1 pixel de deslocamento; o grau do polinômio utilizado na transformação, onde primeiro e

segundo grau são normalmente utilizados no caso de imagens SAR interferométricas.

Definidos estes parâmetros o Registro Fino pode ser executado. Cada passo do algoritmo está descrito nas subseções a seguir.

2.5.1 Disposição das janelas

A disposição das janelas é feita de acordo com o tamanho das imagens subtraindo-se as bordas definidas como parâmetro, caso existam. As janelas são distribuídas conforme uma grade de pontos igualmente espaçada e de tamanho definido pelo número de janelas no eixo x e no eixo y. As janelas e o número de janelas também são parâmetros da operação. A Figura 2.9 ilustra este primeiro passo com a disposição de 9 janelas, na forma de grade 3x3, sobre o par de imagens.

2.5.2 Técnica de "zero-padding" no domínio do espaço

As janelas definidas para o Registro Fino tendem a ser pequenas, algo em torno de 32x32 ou 64x64 pixels usualmente. Esse tamanho é um compromisso entre tempo de processamento e robustez contra ruídos, além da questão do resultado estimado ser suficientemente representativo quanto ao deslocamento que será associado ao PC da janela.

No caso de imagens interferométricas, as pequenas janelas combinadas com ruído *speckle* e com o efeito inerente da convolução circular, afetam a busca de um ajuste da ordem de subpixel, podendo causar casamentos incorretos. Para amenizar estes efeitos, aplica-se o preenchimento com zeros ("*zero-padding*") no domínio do espaço. Este passo é ilustrado na Figura 2.9 como a transição de w_1 e w_2 para w_1' e w_2' , onde a região escura representa os zeros inseridos. Isso dobra o tamanho das janelas, porém evita a convolução circular do conteúdo original, minimizando assim o casamento incorreto das mesmas.

Posteriormente, aplica-se a DFT nas janelas w_1' e w_2' , obtendo-se as janelas W_1 e W_2 no domínio da frequência.

A Figura 2.10 ilustra o efeito benéfico da inclusão do "zero-padding" no domínio do espaço. Neste exemplo foram utilizadas 10x10 janelas de tamanho 128x128 pixels e correlação de fase num par imagens interferométricas de baixa coerência. Isso gerou uma grade de deslocamentos 10x10 cujos pontos coincidem com as localizações dos PCs. Em (a) são exibidos os deslocamentos encontrados sem o "zero-padding" e em (b) os deslocamentos encontrados com o "zero-padding". Nota-se que a grade de deslocamentos fica mais consistente (menos caótica) quando se utiliza o "zero-padding".

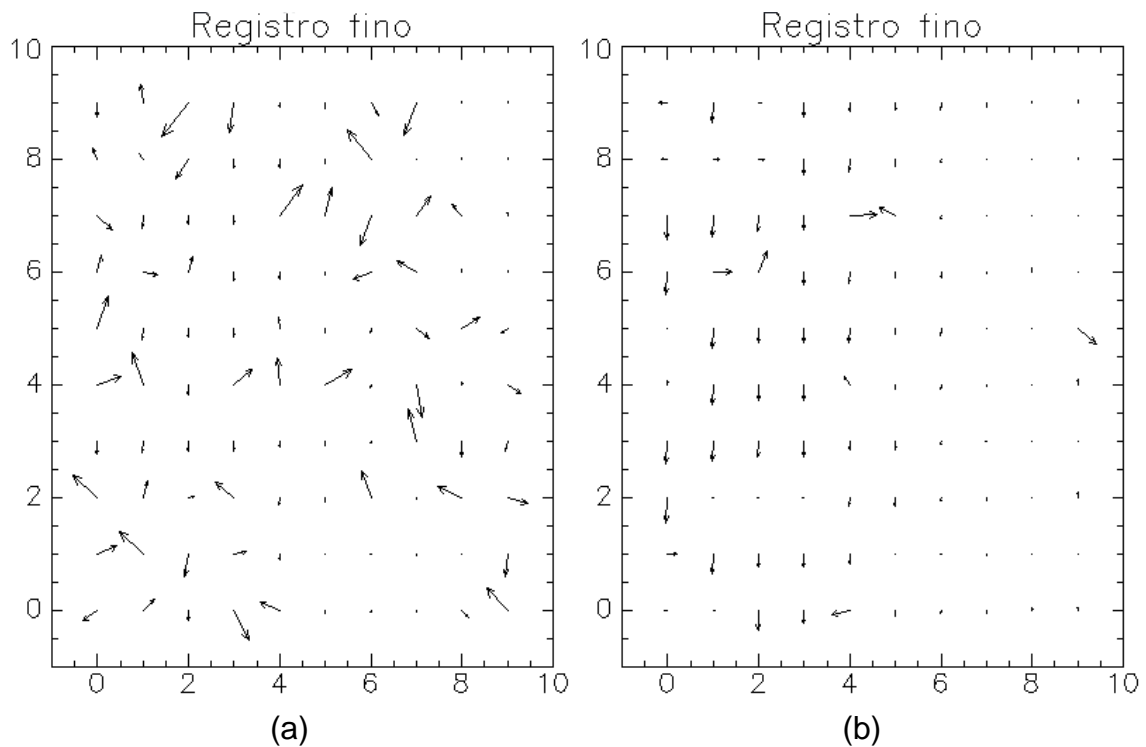


Figura 2.10 - Deslocamentos (a) sem e (b) com "zero-padding" no domínio do espaço.

2.5.3 Técnica de "zero-padding" no domínio da frequência

O registro de cada janela com resolução da ordem de subpixel só é possível através de alguma forma de interpolação. Existem variadas técnicas para interpolação de valores no domínio do espaço na literatura.

Um dos princípios básicos do processamento de sinais digitais postula que adicionar zeros ("zero-padding") em um domínio aumenta a frequência de amostragem no outro domínio. O caso mais conhecido é o de se adicionar zeros ao fim de uma seqüência no domínio do espaço. Assim, ao se aplicar a Transformada Discreta de Fourier (DFT), o espectro de potência terá mais amostras, o que se traduz em menor espaçamento, além de evitar a convolução circular dos dados originais. Isto é conhecido como interpolação espectral e é resultado do preenchimento com zeros no domínio do espaço.

De maneira semelhante é possível interpolar o domínio do espaço através do preenchimento com zeros no domínio da frequência. Neste caso os zeros devem ser adicionados após a metade da seqüência complexa do espectro, ou seja, após a frequência mais alta positiva do espectro. Isto é feito para que se mantenha a simetria espectral. Ao se tomar a DFT^{-1} desta nova seqüência o resultado é uma seqüência interpolada no domínio do espaço. Este é o interpolador de domínio do espaço utilizando DFT^{-1} e "zero padding" no domínio da frequência, que segundo Lyons (2010), equivale a realizar uma interpolação do tipo *sinc*.

Vale ressaltar que o resultado desta interpolação é uma seqüência de dados no formato complexo. Caso o sinal original no domínio do espaço seja real, após a DFT^{-1} , o sinal interpolado terá a parte imaginária igual a zero (ou próxima de zero, devido a arredondamentos de cálculo do computador). Ou seja, o sinal interpolado será a parte real do sinal complexo.

A Figura 2.9 ilustra o procedimento ao gerar Z_1 e Z_2 a partir de W_1 e W_2 . O fator de expansão, parâmetro predefinido, é aplicado na forma de zeros no domínio

da frequência. Na representação adotada a alta frequência está no centro de W_1 e W_2 , a partir de onde é realizado o preenchimento com zeros. Caso fosse aplicada DFT^{-1} em Z_1 e Z_2 seriam obtidas w_1' e w_2' com interpolação *sinc*, mas esta operação não é necessária. Como Z_1 e Z_2 representam as transformadas das janelas interpoladas, pode-se aplicar uma correlação utilizando seus respectivos dados. Este procedimento também está ilustrado na Figura 2.9. Ao final da correlação, os deslocamentos expandidos obtidos são divididos pelo fator de expansão empregado para obter-se os deslocamentos da ordem de subpixel na escala original, ou seja, os deslocamentos fracionários Δx e Δy .

Este passo se repete para cada par de janelas da grade disposta no par de imagens. Ao final de cada iteração obtém-se um PC tomado como o ponto central das janelas w_1 e w_2 e o respectivo deslocamento subpixel, que melhor registra ambas as janelas. Estes PCs e seus respectivos deslocamentos são armazenados numa lista para a próxima etapa.

2.5.4 Transformação polinomial

O último passo do Registro Fino é a transformação polinomial e interpolação. Uma nova imagem f_2'' é gerada com base em f_2' utilizando a seguinte transformação

$$f_2''(x, y) = f_2'(x', y') \quad (2.17)$$

onde

$$\begin{aligned} x' &= \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N P_{i,j} x^j y^i \\ y' &= \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N Q_{i,j} x^j y^i \end{aligned} \quad (2.18)$$

e $P_{i,j}$ e $Q_{i,j}$ são coeficientes obtidos através do método dos mínimos quadrados utilizando como entrada as observações dos PCs e seus respectivos deslocamentos. N representa o grau desejado do polinômio. De modo geral são utilizados polinômios de grau 1 ou no máximo grau 2. Como os pixels a serem buscados em f_2' provavelmente serão indexados com números fracionários, é necessário utilizar uma interpolação. Neste trabalho foi utilizada a interpolação bilinear.

2.6 Geração do Interferograma

Após o processo completo de registro das imagens interferométricas, o interferograma pode então ser gerado. O interferograma representa a diferença de fase definida em termos da diferença da distância em alcance entre as antenas dividido pelo comprimento de onda do radar, segundo a Equação 2.1. Na prática, o interferograma é gerado pela multiplicação ponto a ponto da primeira imagem com o complexo conjugado da segunda imagem registrada. Bamler e Hartl (1998) demonstram como ambos os conceitos se relacionam. Considere a Figura 2.11.

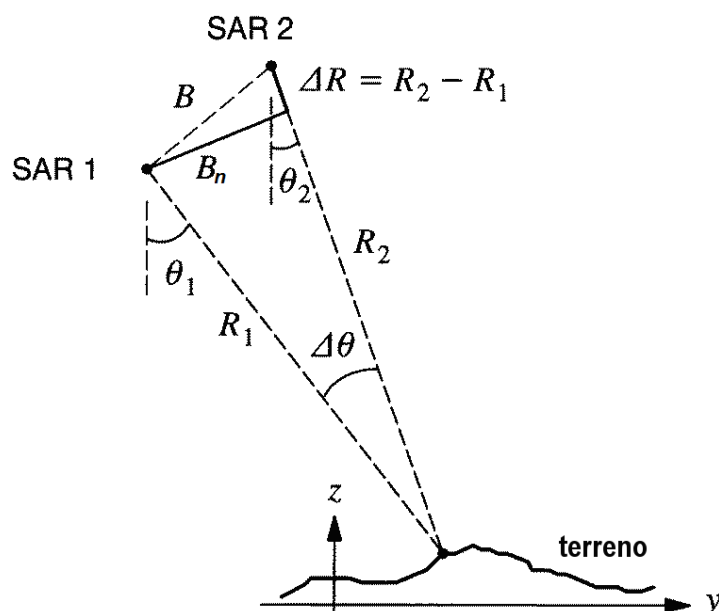


Figura 2.11 - Sensor interferométrico (trajetória de vôo perpendicular ao plano)
 Fonte: Adaptado de Bamler e Hartl (1998)

B representa a linha-base, B_n representa a linha-base normal, $R_{1,2}$ e $\theta_{1,2}$ os alcances e ângulos de visada das antenas SAR 1 e SAR 2, ΔR e $\Delta\theta$ suas respectivas diferenças.

Sejam u_1 e u_2 imagens corregistradas definidas em função do alcance R e azimute x como

$$\begin{aligned} u_1(R, x) &= |u_1(R, x)| \exp\{j\phi_1(R, x)\} \\ u_2(R, x) &= |u_2(R, x)| \exp\{j\phi_2(R, x)\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

formando o interferograma v dado por:

$$v = u_1 u_2^* = |u_1| |u_2| \exp\{j\phi\} \quad (2.20)$$

onde

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.21)$$

é a fase interferométrica.

A fase de cada resposta de um ponto é proporcional ao alcance mais um possível deslocamento de fase devido ao espalhamento, ou seja,

$$\phi_1 = -2kR_1 + \phi_{\text{espalhamento},1} \text{ e } \phi_2 = -2kR_2 + \phi_{\text{espalhamento},2} \quad (2.22)$$

onde $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda.

Supondo que o espalhamento seja o mesmo em ambas as imagens, a fase interferométrica se torna uma medida bastante sensível à diferença de alcance

$$\phi = 2k\Delta R = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R . \quad (2.23)$$

Note que a Equação 2.23 é idêntica à Equação 2.1, exceto por um fator de 2, pois neste caso foi considerado o InSAR de duas passagens.

Para a geração de interferogramas de alta qualidade, o par de imagens deve ser expandido por um fator de 2 na direção do alcance (FERRETTI et al., 2007), evitando com isso o "*aliasing*" na multiplicação complexa. Como o equivalente da multiplicação no domínio do espaço é a convolução no domínio da frequência, a banda espectral será dobrada após a multiplicação complexa do par de imagens InSAR da Equação 2.20 (KETELAAR, 2009). A expansão do azimuth acaba muitas vezes sendo desconsiderada, pois os efeitos das franjas em azimuth são muito mais limitados (FERRETTI et al., 2007).

A Figura 2.12 mostra um exemplo da fase interferométrica gerada após a multiplicação do par SLC corrigido, conforme a Equação 2.20. A região é a do Grand Canyon nos EUA. No quadrante superior direito é possível notar mudanças bruscas causadas pelo relevo acidentado. As regiões ruidosas são regiões de baixa relação sinal ruído ou até mesmo inexistentes quando fora da visão do radar (regiões de sombra). As franjas verticais predominantes são causadas pela geometria de visada lateral, também conhecidas como efeito da terra plana.

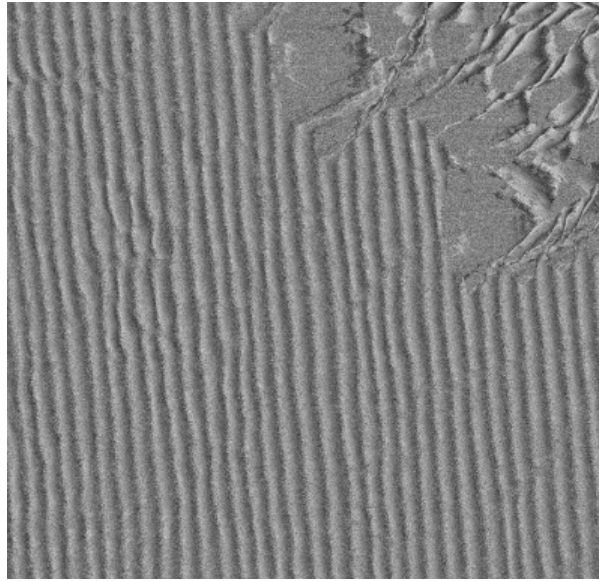


Figura 2.12 - Fase interferométrica da região do Grand Canyon nos EUA, TerraSAR-X.

2.7 Descorrelação entre as imagens SAR interferométricas

Ecos captados por um radar são coerentes, isto é, os valores medidos de amplitude e fase em uma primeira aquisição estão correlacionados com os valores medidos em uma segunda aquisição, caso representem a mesma interação com os espalhadores de uma célula de resolução. Em radares imageadores o efeito é percebido como um mesmo padrão de ruído *speckle*.

Supondo o caso onde uma célula de resolução possui o tamanho de muitos comprimentos de onda, e que os espalhadores sejam aleatoriamente posicionados no intervalo $[-\pi, \pi]$, a fase resultante será aleatória e a soma será caracterizada por média zero. Caso o experimento seja feito com o radar na mesma posição e com a mesma visada, o sinal retornado será idêntico ao sinal originalmente medido (ZEBKER; VILLASENOR, 1992).

Quaisquer alterações no padrão de espalhamento vão gerar mudanças na amplitude e fase do sinal de retorno. Um meio de verificar a ocorrência de mudanças é através da utilização do coeficiente de correlação complexo, mais

precisamente através de seu módulo, também conhecido como coerência interferométrica, definido por (TOUZI et al., 1999):

$$\gamma = \frac{E[u_1 u_2^*]}{\sqrt{E[|u_1|^2]} \sqrt{E[|u_2|^2]}} , |\gamma| \leq 1 \quad (2.24)$$

onde u_1 e u_2 formam o par de imagens complexas e $E[]$ é o valor esperado.

A decorrelação (ou perda de coerência) detectada pode ser separada em algumas contribuições principais. Mudanças na geometria de aquisição, devido à linha-base, geram mudanças nas posições relativas dos espalhadores, portanto pode-se definir uma contribuição geométrica. No caso do InSAR de duas passagens, mudanças físicas nos espalhadores como posição ou umidade também causam decorrelação, assim sendo, geram uma contribuição temporal. Por fim a relação sinal ruído também é bastante impactante na coerência.

Segundo Zebker e Villasenor (1992), a coerência pode então ser formulada como o produto de três contribuições dominantes, a de relação sinal ruído, a geométrica e a temporal, dada por:

$$\gamma = \gamma_{\text{SNR}} \gamma_g \gamma_t \quad (2.25)$$

onde $0 \leq |\gamma| < 1$.

A decorrelação causada pela relação sinal ruído não pode ser tratada. Em regiões de sombra, a solução é imagear novamente a região onde ocorreu o problema utilizando outra configuração de trajetória. Normalmente os radares imageadores, são construídos de maneira que o ruído térmico seja baixo em

relação ao sinal recebido, contudo em regiões de baixo sinal de retorno, a relação sinal ruído é pequena, degradando a fase interferométrica.

Este coeficiente de correlação entre as imagens, segundo Zebker e Villasenor (1992), supondo que a relação sinal ruído seja a mesma para as duas imagens, é dado por:

$$\gamma_{\text{SNR}} = \frac{1}{1 + \text{SNR}^{-1}}, |\gamma| \leq 1 \quad (2.26)$$

A descorrelação temporal, é um importante fator de decréscimo da correlação entre as imagens interferométricas. A descorrelação temporal ocorre em sistemas de duas passagens devido às mudanças físicas na superfície imageada, no intervalo de tempo entre as aquisições. No caso de sistema InSAR de uma passagem, como o da banda X da aeronave R-99, por exemplo, este tipo de descorrelação não ocorre, pois as aquisições são simultâneas. Vale lembrar no entanto que estudos de movimentações de geleiras e análise de subsidência, utilizam-se destas mudanças temporais para gerar um interferograma cuja diferença de fase é traduzida em deslocamento no relevo. Para tanto, utilizam duas passagens em datas distintas porém com trajetórias idênticas.

O grau de descorrelação temporal em termos do deslocamento médio quadrático da superfície imageada foi verificada por Zebker e Villasenor (1992), dada por:

$$\gamma_t = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \cdot (\sigma_{\text{my}}^2 \text{sen}^2 \theta + \sigma_{\text{mz}}^2 \text{cos}^2 \theta)\right\}, |\gamma| \leq 1 \quad (2.27)$$

onde σ_{my}^2 e σ_{mz}^2 são respectivamente, o movimento médio quadrático horizontal e vertical a superfície.

A descorrelação geométrica é causada pela mudança na geometria de aquisição, necessária para a produção de interferogramas com informação de relevo. No entanto, seus efeitos podem ser minimizados através de filtros espectrais específicos.

A precisão da altitude de um DEM gerado a partir de um interferograma será tanto melhor quanto maior for a linha-base. Porém, quanto maior a linha-base, maior a descorrelação e a dificuldade de se desdobrar o interferograma devido à densidade das franjas. A Figura 2.13 ilustra a diferença entre os interferogramas quando se varia a linha-base, utilizando dados do ERS-1 na região do Vesúvio na Itália. A aquisição (a) foi realizada com uma linha-base de 50 metros, gerando franjas mais espaçadas, enquanto que na aquisição (b), realizada com uma linha-base de 250m, as franjas do interferograma estão mais densas, dificultando o processo de desdobramento de fase.

A Figura 2.13 ainda ilustra outro aspecto muito importante: a linha-base normal varia de acordo com o relevo. Ou seja, enquanto o aumento da linha-base é pouco perceptível na região mais plana, na região montanhosa as franjas tornam-se extremamente densas. Em sistemas orbitais de duas passagens, a linha-base depende da distância entre as duas órbitas, e isto nem sempre pode ser escolhido. Normalmente para estes sistemas (por exemplo: ERS-1, ERS-2, JERS-1, Radarsat, Envisat, ALOS e TerraSAR-X) tem-se utilizado o que existe disponível, dentro de uma linha-base aceitável.

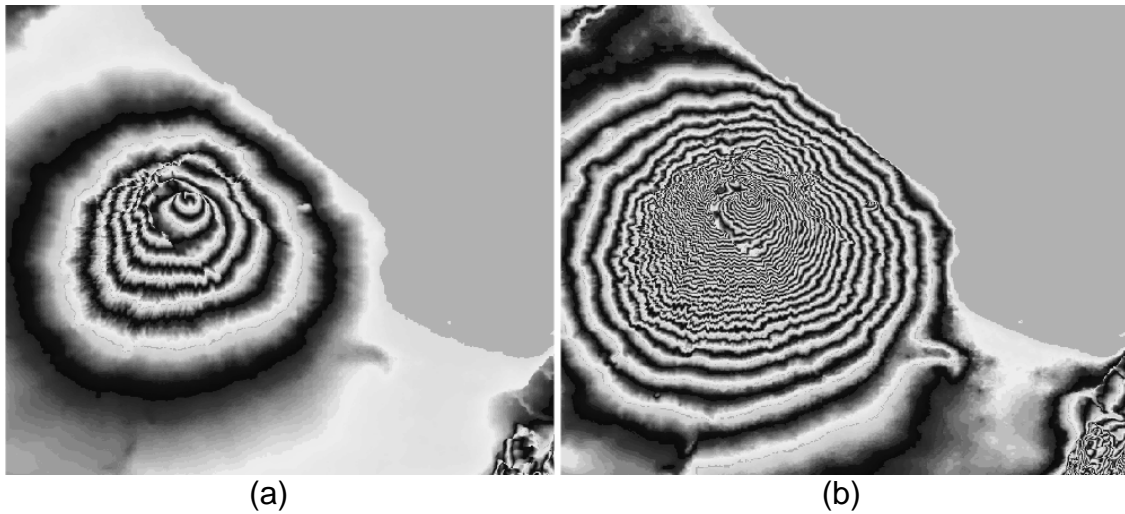


Figura 2.13 - Comparação entre aquisições. Linha-base de 50 m (a) e de 250 m (b).
Fonte: ESA.

O coeficiente de descorrelação geométrico, também é conhecido como descorrelação devido à linha-base. Segundo Zebker e Villasenor (1992), ele é dado por:

$$\gamma_g = \frac{2 \cdot B_n \cdot \Delta\rho \cos^2 \theta}{\lambda \cdot R}, \quad |\gamma| \leq 1 \quad (2.28)$$

onde $\Delta\rho$ é a resolução na direção de "range", B_n a linha-base normal, R a distância em alcance e θ é o ângulo de incidência.

Na Equação 2.27, considerou-se somente a direção de "range", supondo-se que a linha-base não varia durante a aquisição das imagens, o que acontece na maioria dos casos, quando se utiliza duas passagens orbitais.

Para maior facilidade no procedimento do desdobramento da fase interferométrica, a componente de fase introduzida devido a geometria de visada lateral, também conhecida como fase da Terra plana, deve ser retirada. Esta componente da fase pode ser estimada através da detecção da frequência predominante das franjas na fase interferométrica. Normalmente a

remoção desta componente de fase é feito apenas em alcance. Um outro procedimento pode ser realizado através da utilização de um DEM de menor resolução de onde é gerado um interferograma que é subtraído do interferograma original, diminuindo os efeitos do relevo. Com este procedimento consegue-se até mesmo o desdobramento de fase de regiões anteriormente não realizáveis. A Figura 2.14 exibe a fase interferométrica da Figura 2.12 sem a fase da terra plana. Como pode ser visto Figura 2.14, a remoção da fase da terra plana resulta em um interferograma que se assemelha a linhas de contorno do terreno, embora ainda estejam representadas em módulo 2π .

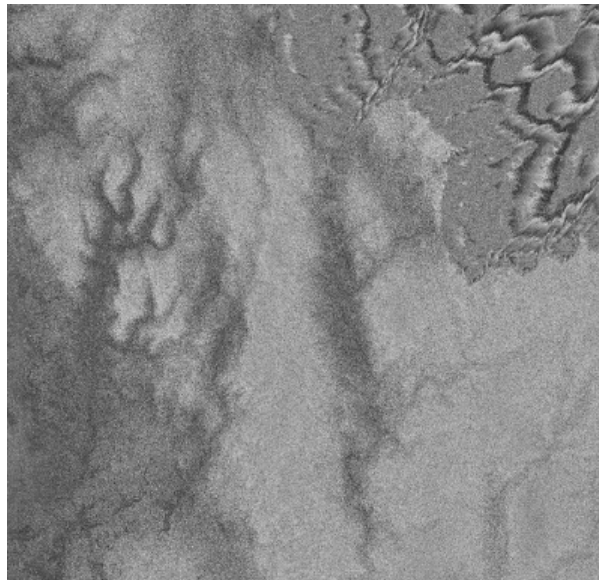


Figura 2.14 - Interferograma sem terra plana, região do Grand Canyon, TerraSAR-X.

2.8 Filtragem Espectral

O descasamento dos espectros das duas imagens nas direções de alcance, causado pela diferença de ângulos de visadas, e de azimute, causado pela diferença de ângulo de "yaw" da antena em cada aquisição e conseqüentemente mudando a freqüência Doppler central de cada imagem, contribuem para o descorrelacionamento das imagens interferométricas,

chamada de descorrelação geométrica, com a perda da coerência interferométrica, segundo Schwabisch e Geudtner (1995), dado por:

$$|\gamma_g| = \left(1 - \frac{|\Delta f_r|}{W_R}\right) \left(1 - \frac{|\Delta f_D|}{W_A}\right), \quad |\gamma| \leq 1 \quad (2.29)$$

onde Δf_r é o deslocamento de frequência espectral na direção de alcance, Δf_D é a diferença das frequências Doppler central entre as duas imagens interferométricas, W_R é a largura de banda do sistema SAR em alcance e W_A a largura de banda do sistema SAR em azimute.

A Figura 2.15 ilustra o descasamento espectral em alcance e azimute para as duas imagens. Os ângulos θ_1 e θ_2 representam os ângulos de incidência para uma dada célula de resolução comum às duas imagens, f_{Dc1} e f_{Dc2} representam as frequências Doppler central da imagem 1 e 2 respectivamente.

O efeito destes descasamentos podem ser reduzidos através de filtros espectrais apropriados que eliminam as contribuições não correlacionadas.

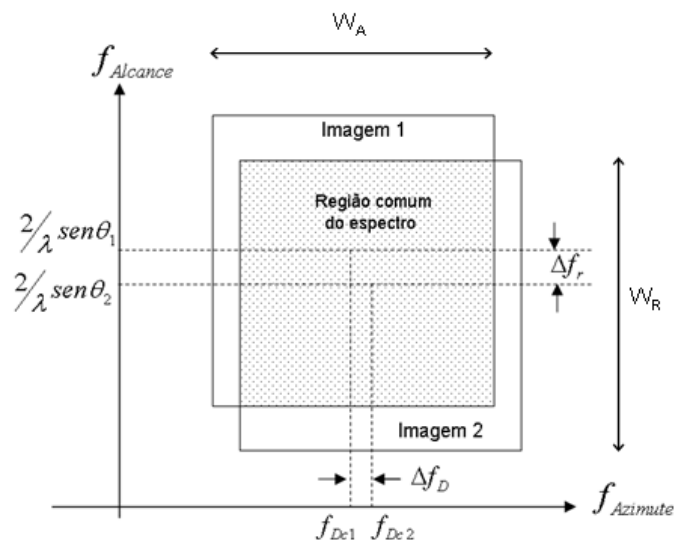


Figura 2.15 - Descasamento espectral das imagens.
Fonte: Adaptado de Schwabisch e Geudtner (1995).

2.8.1 Filtragem Espectral em Alcance

A decorrelação geométrica em alcance é causada pelo deslocamento espectral ("spectral shift") das imagens, devido aos diferentes ângulos de incidência com que um alvo no solo é visto pelas duas antenas. A Figura 2.16 apresenta uma interpretação geométrica do deslocamento espectral. Cada componente de frequência no solo (em "ground range") é mapeada em uma frequência do sinal SAR de acordo com o seno do ângulo de incidência local, que são ligeiramente diferentes para as duas imagens. Ou seja, o mesmo alvo no solo sofre uma variação de frequência Δf no espectro de frequência das imagens.

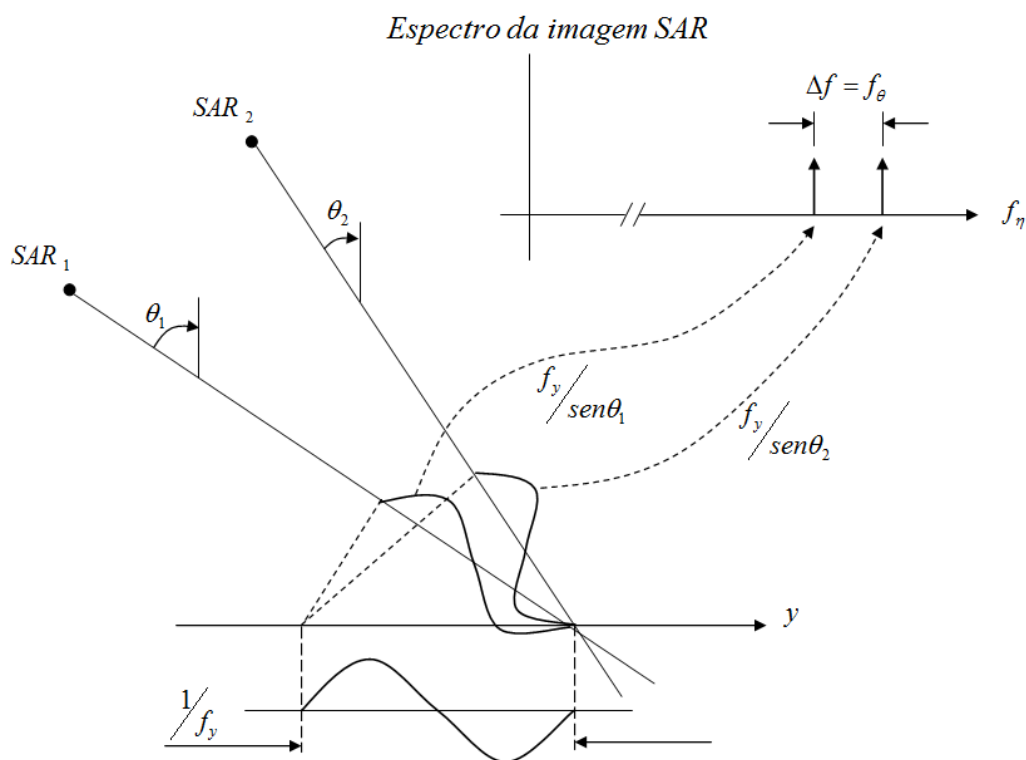


Figura 2.16 - Interpretação geométrica do deslocamento espectral.
Fonte: Adaptado de Bamler e Hartl (1998).

O Filtro Espectral em Alcance consiste em remover a parte do espectro não comum de ambas imagens, como ilustrado na Figura 2.17, reduzindo com isso

a descorrelação geométrica causada pela pequena diferença de ângulo de visada entre as aquisições do InSAR.

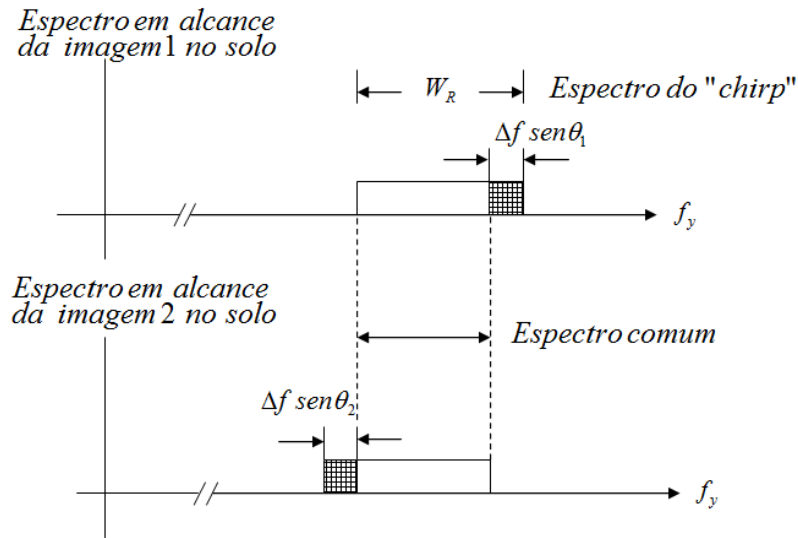


Figura 2.17 - Espectro no solo do sinal SAR em alcance.
 Fonte: Adaptado de Bamler e Hartl (1998).

Este deslocamento foi calculado por Gatelli et al. (1994) para um terreno com inclinação constante α :

$$\Delta f_r = -\frac{f_0 B_n}{R \tan(\theta - \alpha)} \quad (2.30)$$

onde Δf_r é deslocamento espectral, f_0 é a frequência central do radar, B_n é a linha-base normal, θ é o ângulo de visada e R é a distância sensor-alvo.

Através da Equação 2.30 nota-se que, quanto maior a linha-base, maior é o deslocamento espectral, onde a partir de uma certa linha-base, chamada de crítica, não há mais região comum do espectro, resultando em um completo descorrelacionamento entre as imagens, ou seja, coerência interferométrica nula. Nota-se também nesta equação que o deslocamento espectral depende da inclinação do terreno.

O deslocamento de frequência Δf_r da Equação 2.30 pode ser estimado através da frequência dominante das franjas do interferograma (GATELLI et al., 1994), ou seja, da componente de fase da Terra plana, estimado diretamente dos dados. Os filtros espectrais W_{f_1} e W_{f_2} podem ser então criados, segundo as equações:

$$W_{f_1} = W_{f_2} = W_R - \Delta f_r \quad (2.31)$$

$$f_1 = \frac{\Delta f_r}{2} \quad (2.32)$$

$$f_2 = -\frac{\Delta f_r}{2} \quad (2.33)$$

onde W_R representa a banda original do sinal SAR em alcance ("*chirp*") e f_1 e f_2 representam as frequências centrais dos filtros espectrais.

Reigber (1999) relembra que, na análise de Gatelli et al. (1994), a suposição de variação do ângulo ($\Delta\theta$) e linha-base normal (B_n) constantes não é válida para os radares aero transportados, devido à larga variação de ângulo de incidência na faixa imageada. Neste caso a diferença de ângulo $\Delta\theta$ tende a variar bastante do início ao fim da faixa de imageamento, conseqüentemente B_n . Isso pode ser percebido através de uma das configurações de aquisição do R-99, onde o alcance inicial gera um ângulo de visada de 48° e o alcance final um ângulo de 67° aproximadamente.

Nestes casos, o deslocamento Δf_r varia a todo o momento devido à variação de ângulo de incidência, e com a variação do ângulo α de inclinação do terreno. Assim sendo, o caso ideal seria a utilização de filtros adaptativos que variam em alcance e que sejam dependentes da inclinação do terreno, obtido através de Modelos de Elevação, como discutido em (REIGBER, 1999). Neste trabalho foi considerado o deslocamento Δf_r no centro da faixa imageada.

2.8.2 Filtragem Espectral em Azimute

Na interferometria SAR de duas passagens, as aquisições em geral são realizadas com diferentes ângulos de "yaw", devido a rotação da terra, no caso orbital, e devido a ventos laterais, no caso de aerotransportados, como ilustrado na Figura 2.18, causando diferentes deslocamentos de frequência no espectro de potência do sinal na direção de azimute de cada imagem.

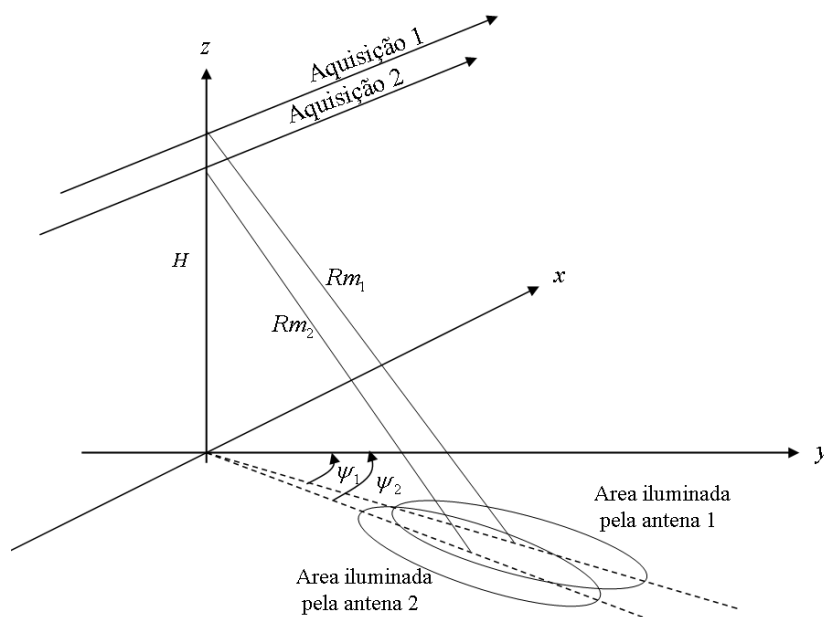


Figura 2.18 - Geometria de aquisição com diferentes ângulos de "yaw".

Na Figura 2.18, $R_{m_{1,2}}$ são alcances médios, $\Psi_{1,2}$ são os ângulos de "yaw" durante as aquisições e H a altura da aquisição.

O deslocamento do espectro em azimute é dado pela frequência central do Doppler, segundo a equação:

$$f_{DC} = \frac{2V_{st}}{\lambda} \sin\theta_{sq} \quad (2.34)$$

onde V_{st} é a velocidade do sensor em relação ao solo e θ_{sq} é o ângulo de "squint" dado pela seguinte relação:

$$\theta_{sq} = \arctg \left\{ \operatorname{tg}(\psi) \frac{\sqrt{Rm^2 - H^2}}{Rm} \right\} \quad (2.35)$$

O ângulo de "squint" varia de acordo com a distância em alcance entre o sensor e a posição na imagem. Neste trabalho foi utilizada a distância média (Rm), ou seja, a distância entre o sensor e o centro da faixa imageada.

O deslocamento de frequência do espectro em azimute é dado pela diferença entre as frequências de Doppler central, segundo a equação:

$$\Delta f_D = f_{DC1} - f_{DC2} \quad (2.36)$$

O Filtro Espectral em Azimute consiste em remover as partes não comuns do espectro de potência das duas imagens, como ilustrado na Figura 2.19, melhorando com isto o registro e conseqüentemente a coerência inteferometrica final. Segundo Tao et al. (2004), esta filtragem deve ser realizada após o registro grosseiro das imagens.

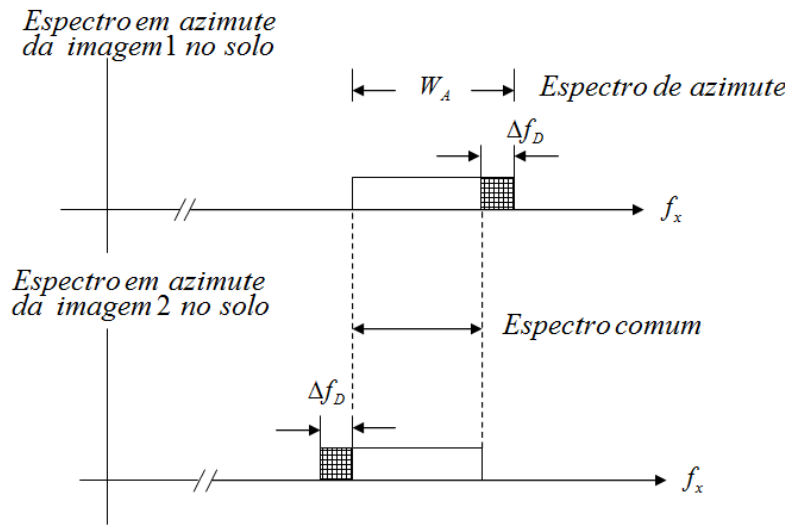


Figura 2.19 - Espectro no solo do sinal SAR em azimute.

2.9 Método dos Resíduos

O método dos resíduos foi criado por Goldstein et al. (1988), onde denominaram de resíduos os locais onde há descontinuidade da diferença de fase, impedindo uma única solução de desdobramento, isto é, gerando ambigüidade. O método dos resíduos pode ser utilizado como medida da qualidade do interferograma, através da contagem dos resíduos, que representam pontos de inconsistência da fase interferométrica.

Este método pode ser colocado da seguinte maneira: considerando a fase interferométrica como sendo uma grade de pontos, define-se um operador $W\{\}$, que coloca seu argumento para a faixa de $-\pi$ a π pela adição ou subtração de um número inteiro de 2π em seu argumento. Por exemplo:

$$\begin{aligned} \phi = 5.3\pi &\Rightarrow W\{\phi\} = 5.3\pi - 3 * 2\pi = -0.7\pi \\ \phi = -3.2\pi &\Rightarrow W\{\phi\} = -3.2\pi + 2 * 2\pi = 0.8\pi . \end{aligned} \quad (2.37)$$

Este método parte do pressuposto de que a diferença de fase entre pontos adjacentes de um interferograma deve ser menor ou igual a π (segundo critério

de Nyquist), quando os dados estão corretamente amostrados (metade do período de 2π), ou seja, quando não há ruído local ou problema de sombra ou inversão nas imagens. Pode-se então definir o gradiente de fase entre amostras conforme a Figura 2.20:

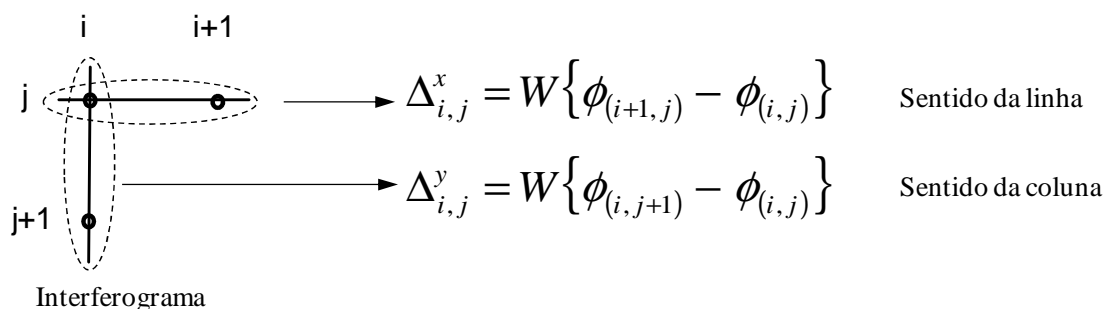


Figura 2.20 - Definição do gradiente de fase.

O método dos resíduos baseia-se na localização de pontos de inconsistência de fase feita através da integração ao redor de um caminho fechado, em 4 pixels vizinhos, computando os gradientes de fase no sentido horário, conforme ilustrado na Figura 2.21:

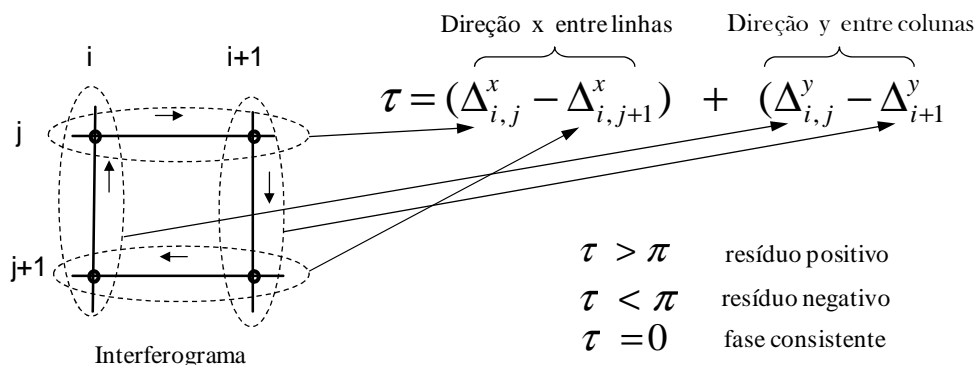


Figura 2.21 - Esquema do cálculo de resíduos.

O número de resíduos é um indicador de qualidade da fase interferométrica, pois quanto maior este número mais ruidosa é a fase. Logo a contagem do número de resíduos pode ser utilizada como parâmetro de medida da qualidade final de um interferograma.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os dados SAR utilizados e a metodologia empregada nesta pesquisa. Todos os dados de imagens utilizados estão no formato "*Single Look Complex*" (SLC) e foram obtidos com sensores orbitais e aerotransportados. Foram utilizadas imagens de diferentes sensores operando em diferentes bandas, para que o algoritmo fosse testado em distintas condições além de tipos diferentes de terreno. Na seção seguinte são listadas as imagens utilizadas, suas características e uma visualização de conteúdo em amplitude.

3.1 Descrição do material

O primeiro par de imagens utilizado foi da missão SIR-C, banda L, na região do Monte Etna, Itália, adquiridas em duas passagens, com tamanho de pixel de 14,76 m em alcance e 3,9 m em azimute.

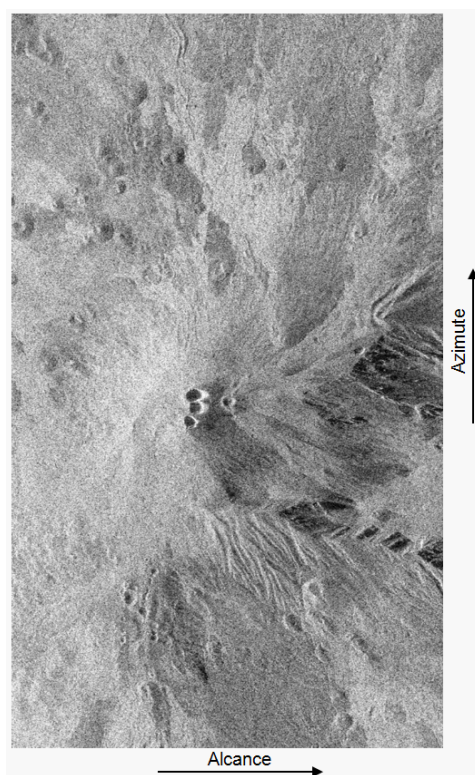


Figura 3.1 - Monte Etna, SIR-C, banda L, Itália.

O segundo par de imagens utilizado foi da missão ALOS/PALSAR, na banda L, no modo PLR, adquiridas próximas à região do rio Tapajós em duas passagens, com tamanho de pixel de 10 m em alcance e 4,5 m em azimute.



Figura 3.2 - Região do Tapajós, ALOS/PALSAR, banda L (HH).

O terceiro par de imagens utilizado foi da missão TerraSAR-X, na banda X, na região do Grand Canyon, EUA, adquiridas em duas passagens, com tamanho de pixel de 1,2 m em alcance e 3,0 m em azimute.

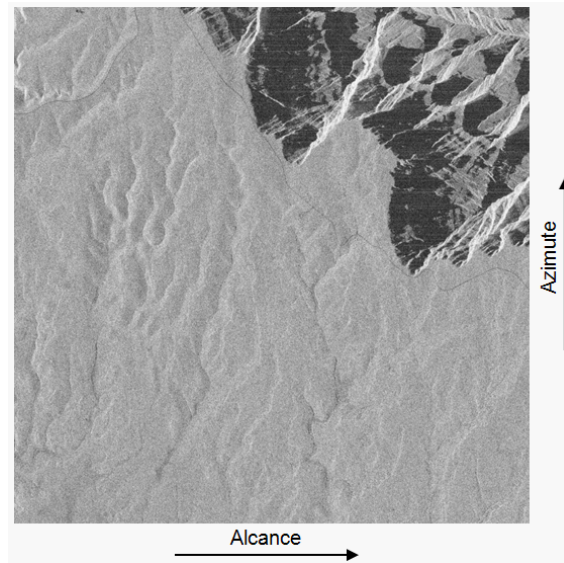


Figura 3.3 - Região do Grand Canyon, TerraSAR-X, banda X.

O quarto par de imagens utilizado foi da aeronave R-99, na banda X, na região de Campinas, adquiridas em uma passagem, com tamanho de pixel de 3,0 m em alcance e 0,6 m em azimute.

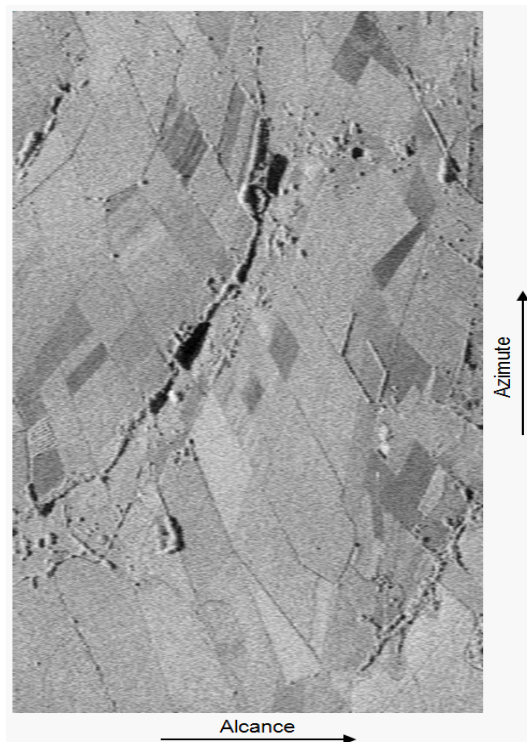


Figura 3.4 - Região do Campinas, R-99, banda X.

O quinto e último par de imagens utilizado foi da aeronave R-99, na banda L, na região de Campinas, adquiridas em duas passagens, com tamanho de pixel de 3,0 m em alcance e 0,6 m em azimute.

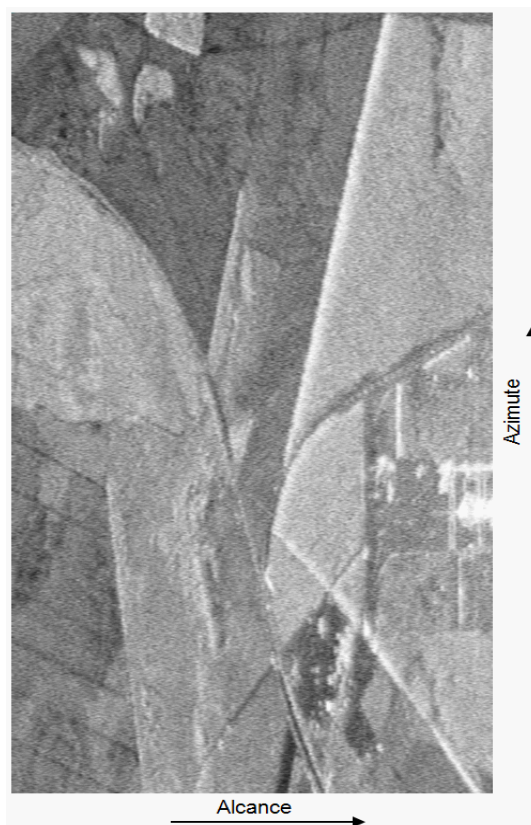


Figura 3.5 - Região de Campinas, R-99, banda L (HH).

3.2 Metodologia

A metodologia aplicada neste trabalho consistiu da implementação e teste dos módulos que compõem o registro automático de imagens SAR. Richards (2007) divide a geração de um DEM através da interferometria em três grandes etapas: 1) estimação da fase interferométrica dobrada, 2) desdobramento da fase interferométrica resultando na fase interferométrica desdobrada, e 3) estimação do DEM a partir da fase interferométrica desdobrada. Este trabalho limitou-se à primeira etapa. A Figura 3.6 ilustra este procedimento.

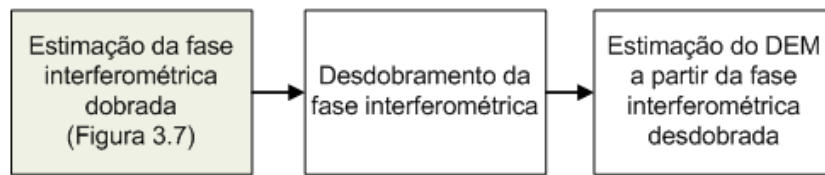


Figura 3.6 - Fluxograma geral da geração de um DEM através do InSAR.

A Figura 3.7 ilustra a seqüência dos módulos de processamentos implementados e testados neste trabalho.

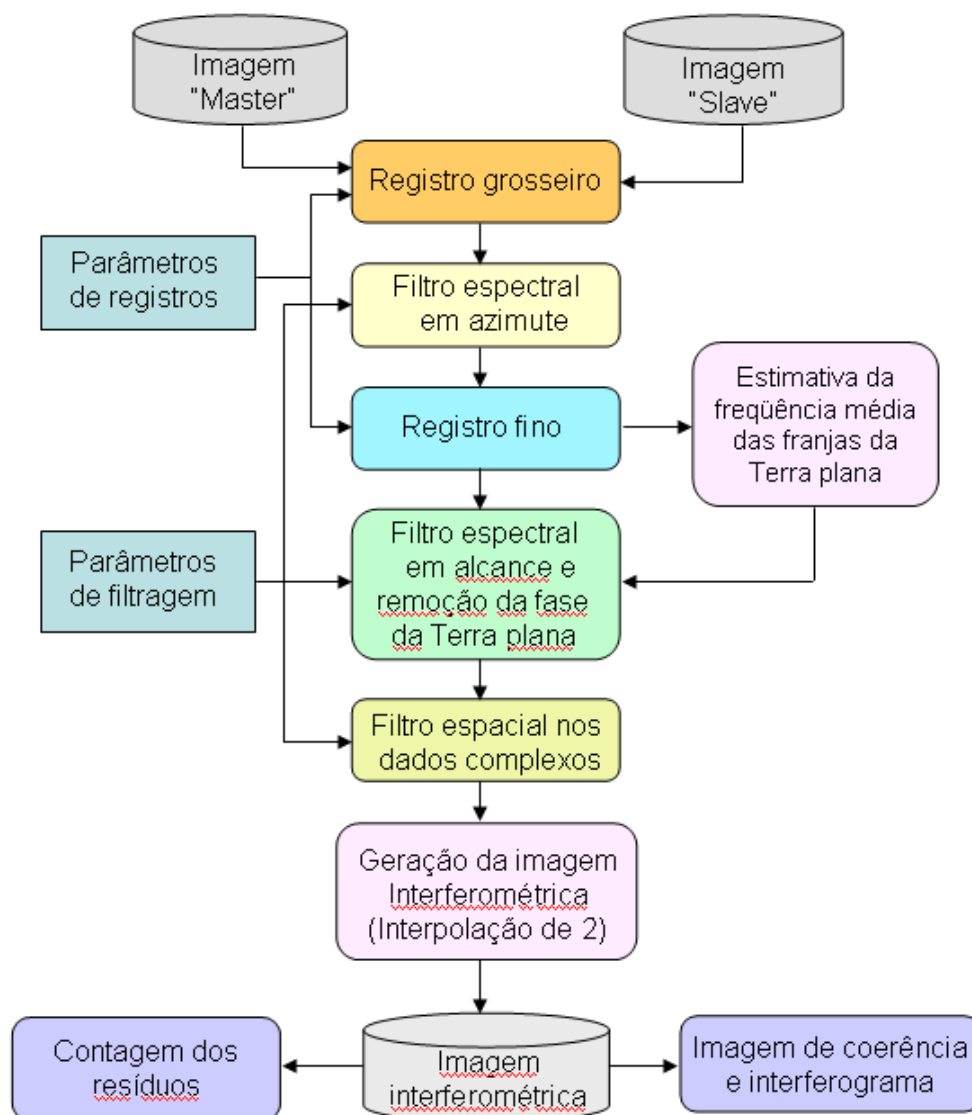


Figura 3.7 - Fluxograma de processamento para registro automático de imagens interferométricas SAR.

A avaliação quantitativa foi feita através de rotinas específicas que não fazem parte do algoritmo de registro e filtragem. Foram selecionados como critérios de avaliação a coerência e a contagem de resíduos. Os algoritmos foram todos implementados em linguagem IDL, versão 6.3, no ambiente IDL/ENVI, versão 4.3, e Windows XP 32 bits.

3.2.1 Avaliação pela coerência interferométrica

A análise da qualidade de um registro de imagens interferométricas pode ser feita pela observação visual da imagem de coerência gerada ou pelo histograma desta. Esta análise pode ser feita entre as etapas do registro para verificar a eficácia de alguma etapa de processamento. Por exemplo, pode-se verificar a influência da aplicação ou não do filtro espectral no resultado final do registro interferométrico.

Para implementação da avaliação através de coerência, a definição da Equação 2.23 precisa ser transformada num estimador. O seguinte estimador foi utilizado:

$$\hat{\gamma} = \frac{\langle \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2^* \rangle}{\sqrt{\langle |\mathbf{u}_1|^2 \rangle} \sqrt{\langle |\mathbf{u}_2|^2 \rangle}}, \quad |\hat{\gamma}| \leq 1 \quad (3.1)$$

onde o operador $\langle \rangle$ significa média espacial. Neste trabalho utilizou-se um operador de média espacial igual a uma janela 7x7 pixels para a estimativa da imagem de coerência e as regiões de borda onde não é possível o cálculo foram eliminadas.

3.2.2 Avaliação pela contagem de resíduos

A contagem de resíduos foi também um método utilizado para a análise da qualidade do registro. Esta contagem é realizada no interferograma final, ou

através da espacialização destes resíduos sobre o interferograma para melhor verificar as regiões de inconsistência de fase.

3.2.3 Avaliação da rotação e escala no algoritmo de registro

O algoritmo de Reddy e Chatterji (1996) foi implementado conforme Xie et al. (2003) e testado para a etapa Registro Grosseiro, porém os resultados foram insatisfatórios para a interferometria, sendo eliminado do algoritmo final. Mais informações estão no Anexo A.

3.2.4 Implementação do Registro Grosseiro

A implementação do Registro Grosseiro sofreu algumas alterações em relação ao algoritmo apresentado anteriormente na seção 2.4. A rotina não possui parâmetros necessários para operação exceto a configuração da correlação a ser utilizada e as duas imagens SLC de entrada. Os demais parâmetros não são utilizados. A Figura 3.8 ilustra a interface do processo de registro.

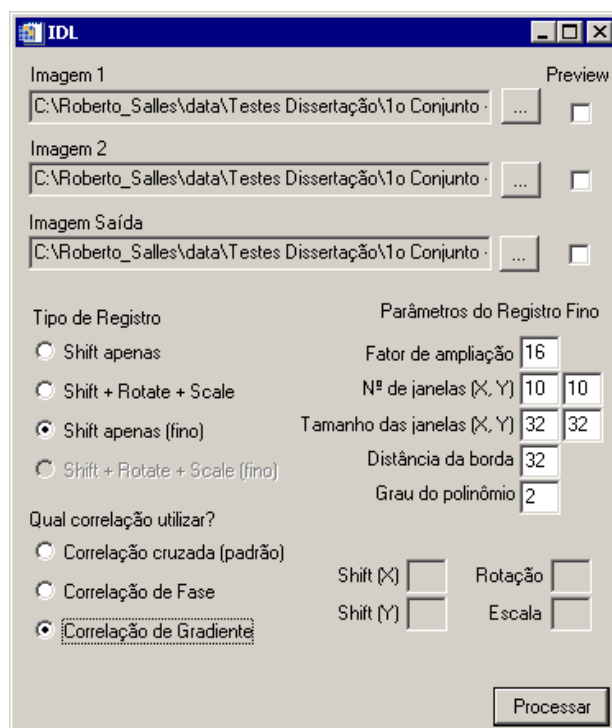


Figura 3.8 - Interface do módulo de registro.

Caso a rotina seja chamada com imagens SLC de diferentes tamanhos, a dimensão menor de uma imagem será completada com zeros até atingir a dimensão da outra imagem maior. Ao final, o deslocamento encontrado é aplicado na segunda imagem, sendo que a região deslocada para fora é perdida, enquanto os vazios gerados são preenchidos com zeros, mantendo o tamanho original das imagens. A imagem registrada é então gravada com o nome informado no campo Imagem Saída. Para procedimentos posteriores ao Registro Grosseiro como o Registro Fino ou o Filtro Espectral, apenas a região comum entre o par de imagens é utilizada.

3.2.5 Implementação do Registro Fino

O Registro Fino foi implementado de modo semelhante, porém, como indica a Figura 3.7, ele é executado após o Registro Grosseiro, o que elimina a questão de imagens de tamanhos diferentes.

Ao final da execução, além dos PCs e respectivos deslocamentos da ordem de subpixel, necessários para a geração dos polinômios de deformação, a rotina também armazena as respectivas coerências das janelas. Isso foi feito para tornar possível a criação de um parâmetro de aceitação ou rejeição de PCs, porém a prática demonstrou que apenas a coerência não é um bom parâmetro de aceitação ou rejeição.

Assim sendo as regiões usuais de baixa coerência como água e sombra prejudicam inevitavelmente o cálculo dos polinômios de deformação. Porém, através do uso de muitas janelas (uma grade 20x20 são 400 PCs) os efeitos prejudiciais são amenizados (mínimos quadrados). Permitir o uso de todas as janelas se mostrou mais efetivo do que eliminar as janelas de baixa coerência, porém isso pode ser apenas uma necessidade inevitável ao se tentar registrar imagens de baixa coerência, como é o caso da imagem da região do Tapajós.

3.2.6 Implementação do Filtro Espectral em Alcance

O Filtro Espectral de Alcance se mostra muito eficaz quando é implementado com dados precisos de trajetória e atitude, além de um DEM de menor resolução do que o interferograma. No entanto, os dados de trajetória e atitude não estavam sempre disponíveis, impedindo este tipo de implementação neste trabalho.

Assim sendo, a implementação do Filtro Espectral de Alcance limitou-se a estimar o deslocamento espectral baseado no uso das informações disponíveis no par de imagens. Em outras palavras, limitou-se ao uso da frequência máxima das franjas da fase interferométrica, que também é utilizada para a remoção da Terra plana. A interface disponível ao se executar apenas o filtro fora do processo ilustrado na Figura 3.7 é mostrada na Figura 3.9.

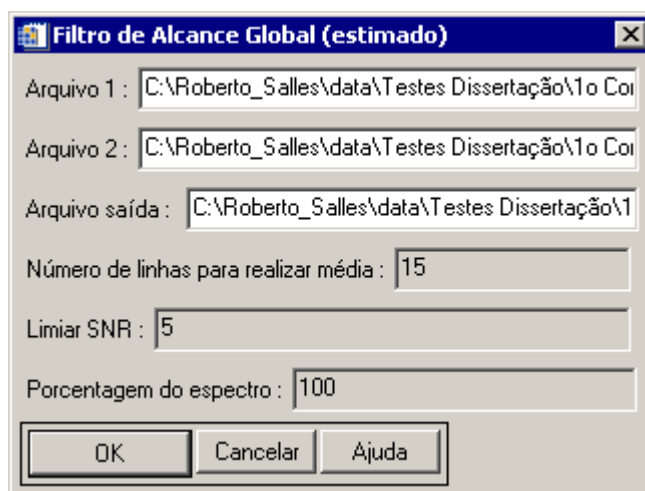


Figura 3.9 - Interface disponível para uso da rotina de Filtro Espectral de Alcance.

Além das imagens registradas necessárias à execução, três parâmetros podem influenciar a execução deste algoritmo. O primeiro é o número de linhas de alcance para se realizar média. Esta média visa diminuir o ruído das franjas contidas em cada imagem. O Limiar de SNR é utilizado como critério de rejeição de linhas cujo pico de frequência máxima esteja muito baixo com relação ao restante do espectro. Por fim a porcentagem do espectro é apenas

um modo do usuário reduzir o espectro válido de uma imagem e pode ser ignorado. Os valores padrão utilizados são mostrados na Figura 3.8.

3.2.7 Implementação do Filtro Espectral em Azimute

A filtragem espectral em azimute está baseada no conhecimento da frequência Doppler central em que cada imagem foi gerada, na frequência de repetição de pulso utilizado ("PRF"). Normalmente estas informações são fornecidas no cabeçalho ("*header*") da imagem. Caso a informação do Doppler central não esteja disponível ela pode ser estimada através do deslocamento do espectro na direção de azimute, como mostrado no exemplo da Figura 3.10, gerado com os dados do SIR-C (Etna). Nota-se que a frequência Doppler central é igual a 425 Hz para a imagem 1 e 585 Hz para a imagem 2, apresentando uma diferença de 160 Hz entre elas, para um largura de banda em azimute, W_A , de aproximadamente de 850 Hz.

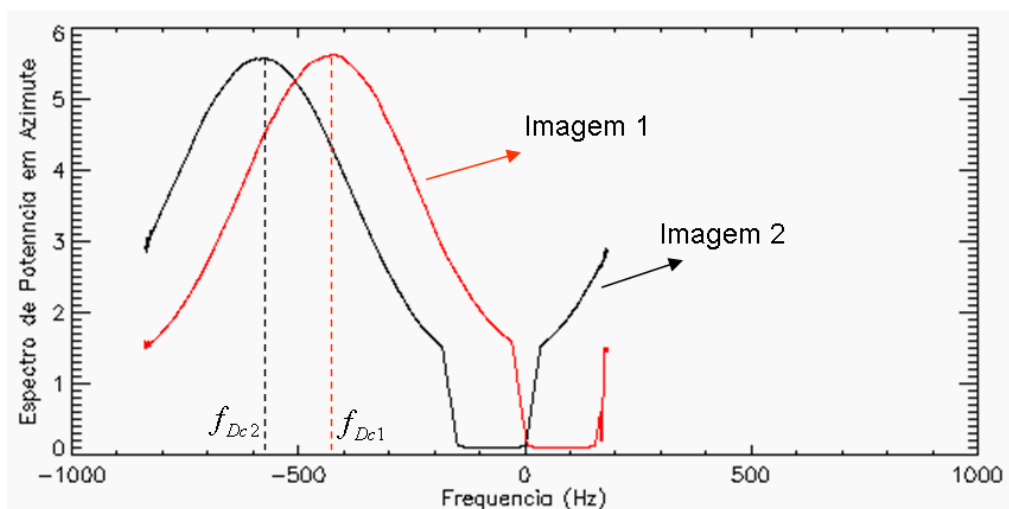


Figura 3.10 - Estimativa do Doppler central - imagem SIR-C (Etna).

A filtragem espectral em azimute consiste em remover a parte do espectro não comum, conforme ilustrado na Figura 2.19. A Figura 3.11 ilustra a interface utilizada para a aplicação da filtragem espectral em azimute implementada na linguagem IDL, quando é chamada fora do algoritmo completo.

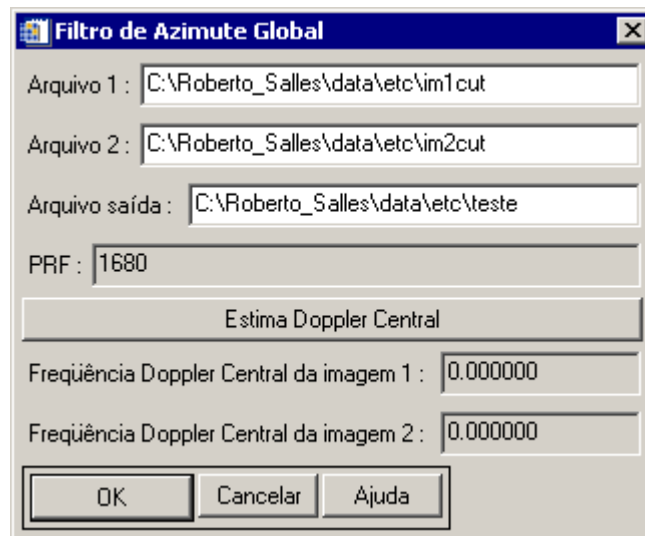


Figura 3.11 - Interface do filtro espectral em azimute.

3.2.8 Geração dos produtos interferométricos

Através das imagens registradas finais pode-se gerar a imagem interferométrica. Para evitar *“aliasing”* no espectro da imagem interferométrica, causada pela multiplicação de dados no formato complexo (imagem 1 vezes o conjugado da imagem 2), as imagens registradas são expandidas através da interpolação utilizando *“zero padding”* no domínio da frequência. Após este procedimento a imagem interferométrica pode ser gerada.

Com o objetivo de reduzir o ruído no interferograma, as componentes da parte real e da parte imaginária da imagem interferométrica são filtradas por um filtro de média espacialmente e em seguida reamostradas, para posterior geração do interferograma. As janelas utilizadas estão descritas no capítulo 4.

Este procedimento de filtragem espacial também é aplicado nas imagens duas imagens registradas para a geração da imagem de coerência, como ilustrado na Equação 3.1. A Figura 3.12 ilustra a interface para a escolha dos produtos interferométricos desejados, bem como o tamanho da janela de filtragem por média espacial sobre os dados complexos.

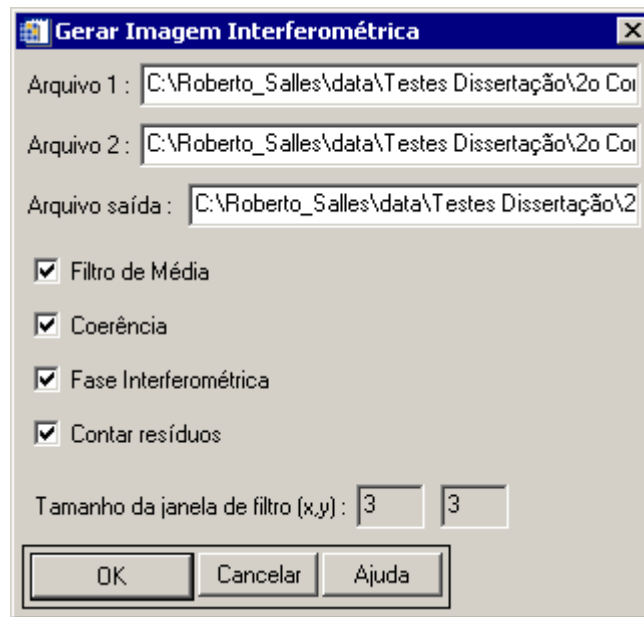


Figura 3.12 - Interface para a geração do produtos interferométricos.

4 RESULTADOS

Os resultados da metodologia proposta para os pares interferométricos são apresentados neste capítulo.

Todos os pares foram processados utilizando nove configurações distintas, onde cada configuração foi codificada utilizando a seguinte notação: <registro> <grau> <correlação>.

O código <registro> refere-se ao tipo de registro, podendo ser Grosseiro ou Fino. Já o código <grau> refere-se ao grau do polinômio, sendo utilizado apenas quando o <registro> for Fino, podendo assumir o valor 1 ou 2. Por fim <correlação> refere-se à correlação utilizada durante todo o procedimento, podendo assumir os códigos C para correlação cruzada, PC para correlação de fase, ou GC para correlação de gradiente.

Por exemplo, quando o código Grosseiro PC é utilizado nas tabelas de resultados, significa que foi feito apenas o Registro Grosseiro utilizando correlação de fase. Já o código Fino 2 GC significa que foi utilizado o Registro Fino com polinômios de 2º grau e correlação de gradiente. Vale lembrar que em toda execução de Registro Fino acontece o Registro Grosseiro como passo anterior, utilizando a mesma correlação definida para o Registro Fino.

As tabelas de resultados apresentam, para cada execução, a contagem de resíduos positivos e o valor do pico do histograma de coerência sem e com filtros espectrais.

4.1 Par interferométrico do sensor SIR-C

O primeiro par de imagens utilizados foi do sensor SIR-C banda L, região do monte Etna. Este par foi processado utilizando para o Registro Fino os parâmetros de execução da Tabela 4.1. A janela do filtro espacial utilizada para filtrar o interferograma foi de 3x7 pixels. Os resultados de cada execução estão apresentados na Tabela 4.2, divididos entre sem e com a aplicação dos filtros

espectrais. Como parâmetros de qualidade são apresentados a contagem de resíduos de carga positiva e o pico do histograma de coerência.

Tabela 4.1 - Parâmetros do Registro Fino, primeiro par de imagens.

Parâmetros	Valor
Fator de Ampliação	16
Número de janelas em X	10
Número de janelas em Y	10
Tamanho da janela (pixels) em X	32
Tamanho da janela (pixels) em Y	32
Distância da borda da imagem	32

Tabela 4.2 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao primeiro par de imagens.

Etna	Sem filtros espectrais		Com filtros espectrais	
	Resíduos +	Coerência	Resíduos +	Coerência
Grossoiro C	13889	0,42	12682	0,51
Grossoiro PC	13889	0,42	12682	0,51
Grossoiro GC	13889	0,42	12682	0,51
Fino 1 C	13071	0,44	12723	0,59
Fino 1 PC	13600	0,44	12975	0,59
Fino 1 GC	12965	0,45	12523	0,61
Fino 2 C	13182	0,47	12819	0,60
Fino 2 PC	14858	0,41	13374	0,58
Fino 2 GC	12931	0,45	12562	0,61

Como pode ser observado na Tabela 4.2, o Registro Fino utilizando polinômio de grau 1 e correlação de gradiente Fino 1 GC foi o mais eficaz considerando a contagem de resíduos e a coerência, após a aplicação dos filtros espectrais. A Figura 4.1 mostra os histogramas das coerências com e sem a aplicação dos filtros, no caso Fino 1 GC. A Figura 4.2 mostra as imagens de coerência sem

(a) e com (b) a aplicação dos filtros espectrais, para esta configuração do algoritmo.

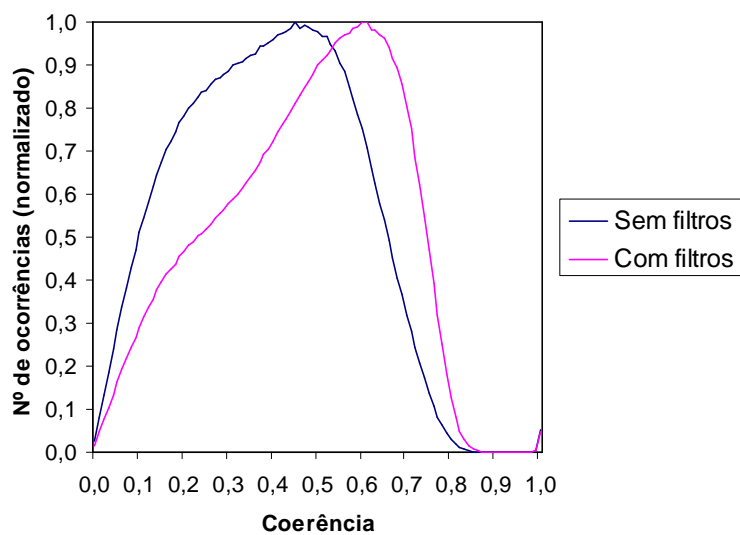


Figura 4.1 - Histogramas de coerência sem e com filtros espectrais.

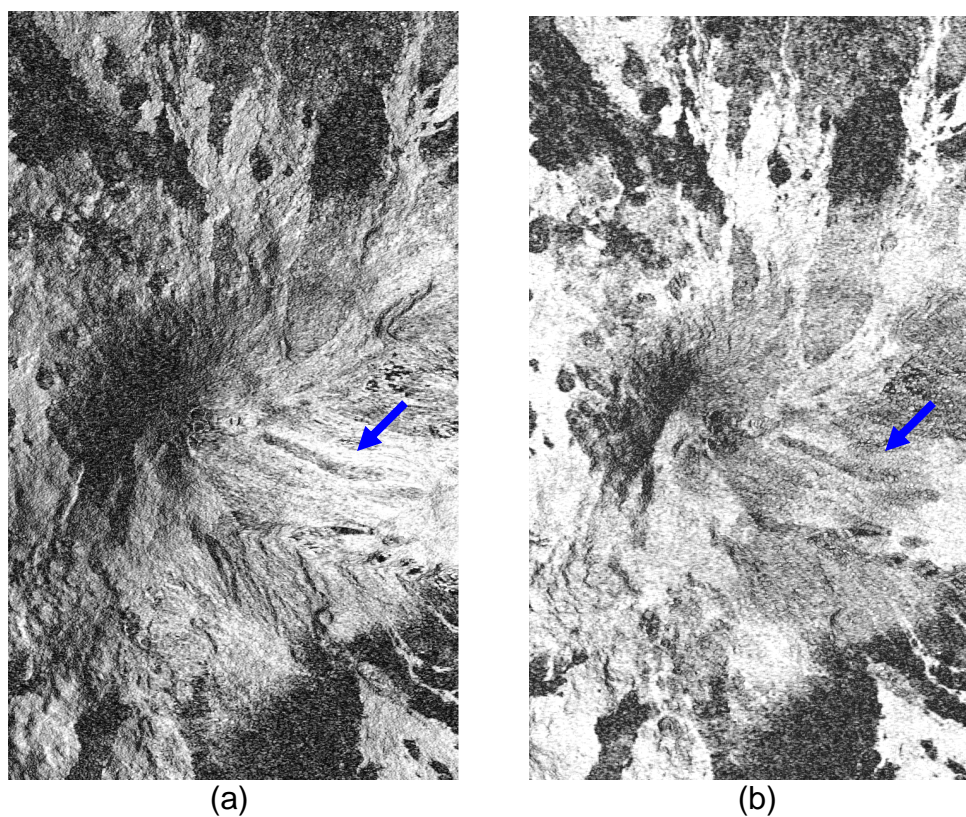


Figura 4.2 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) filtros espectrais, SIR-C, Etna.

Nota-se nas Figuras 4.1 e 4.2 uma melhora significativa quando os filtros espectrais são utilizados. Apesar disso, esta melhora não ocorre na parte central à direita do pico da montanha, como pode ser observado na Figura 4.2 pela região indicada com setas ter se tornado mais escura em (b). A grande variação do terreno na região do monte Etna causa uma grande variação na densidade das franjas, mais densas à esquerda (voltadas ao sensor) e menos densas à direita, conforme Figura 4.3(a). O filtro espectral em alcance implementado, no entanto, detecta a frequência máxima das franjas devido à superfície da Terra plana. Isto equivale apenas a uma rampa constante (ângulo α , Equação 2.29). Para evitar este efeito, deve-se utilizar um filtro espectral adaptativo em alcance, não utilizado no escopo deste trabalho (GATELLI, 1994). A Figura 4.3 apresenta também a fase interferométrica sem Terra plana (b) e a imagem da contagem de resíduos (c).

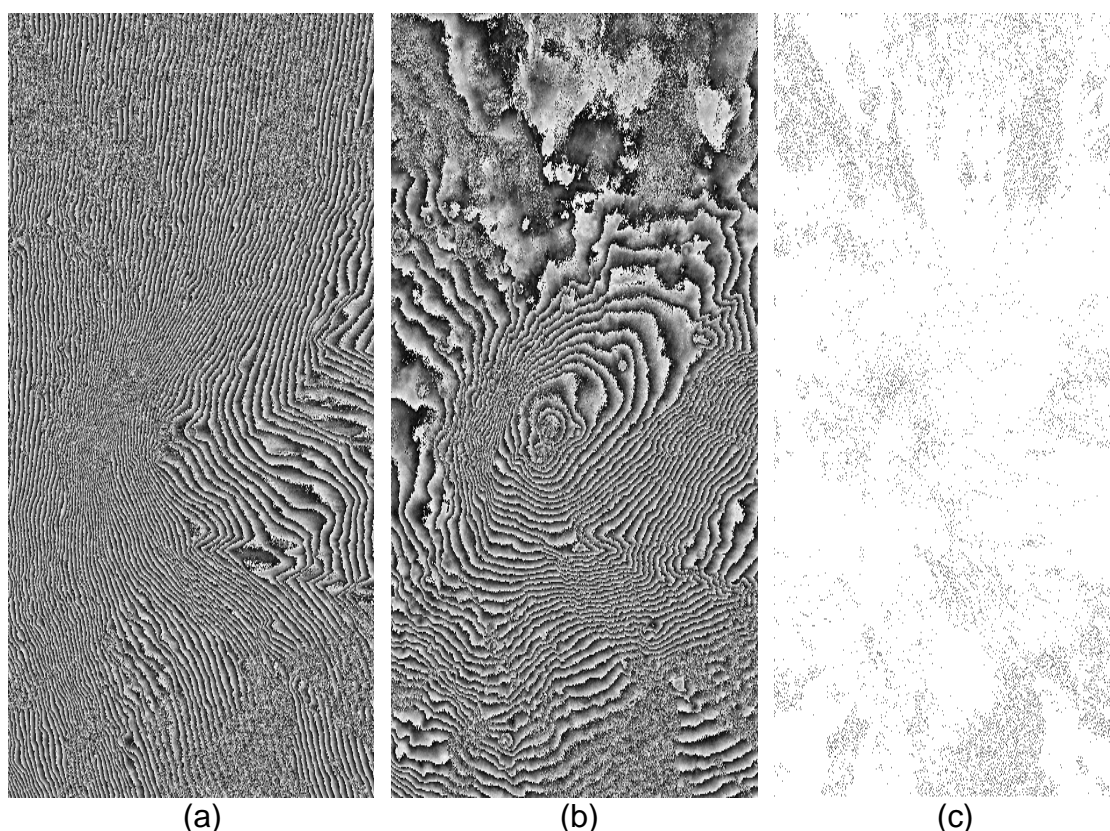


Figura 4.3 - Fase interferométrica com (a) e sem a fase da Terra plana (b) e a imagem de resíduos (c).

4.2 Par interferométrico do sensor ALOS/PALSAR

O segundo par de imagens utilizado foi do sensor ALOS/PALSAR, banda L, região do Tapajós. Este par foi processado utilizando para o Registro Fino os parâmetros de execução da Tabela 4.3. A janela do filtro espacial utilizada para filtrar o interferograma foi de 3x7 pixels. Os resultados de cada execução estão listados na Tabela 4.4, novamente divididos entre antes e após a aplicação dos filtros espectrais. A polarização HH foi utilizada.

Tabela 4.3 - Parâmetros do Registro Fino, segundo par de imagens.

Parâmetro	Valor
Fator de Ampliação	8
Número de janelas em X	10
Número de janelas em Y	6
Tamanho da janela (pixels) em X	64
Tamanho da janela (pixels) em Y	512
Distância da borda da imagem	32

Tabela 4.4 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao segundo par de imagens.

Tapajós	Sem filtros espectrais		Com filtros espectrais	
	Resíduos +	Coerência	Resíduos +	Coerência
Grossoiro C	46012	0,12	44305	0,13
Grossoiro PC	46012	0,12	44305	0,13
Grossoiro GC	46171	0,12	46930	0,11
Fino 1 C	45948	0,12	46019	0,12
Fino 1 PC	46991	0,13	35153	0,15
Fino 1 GC	46834	0,13	41594	0,13
Fino 2 C	45834	0,12	44602	0,12
Fino 2 PC	47138	0,13	35890	0,15
Fino 2 GC	47043	0,13	41073	0,13

Este par de imagens interferométricas, devido a suas características de baixa correlação (áreas de floresta), precisou ser registrado com janelas de maior tamanho, como pode ser observado na Tabela 4.3.

No caso deste par de imagens, o registro grosseiro apresentou resultados diferentes entre os tipos de correlações utilizadas. Os deslocamentos calculados em pixels foram (-1,14) para as correlações cruzada e de fase enquanto a correlação de gradiente estimou um deslocamento (-2,2).

Apesar da Tabela 4.4 induzir a idéia de que não houve praticamente ganho de coerência em nenhum caso, vale ressaltar que a tabela mostra apenas o pico do histograma da imagem de coerência. A Figura 4.4 mostra que houve um certo ganho com a utilização da filtragem espectral, na configuração Fino 1 PC, como pode ser observado nos histogramas.

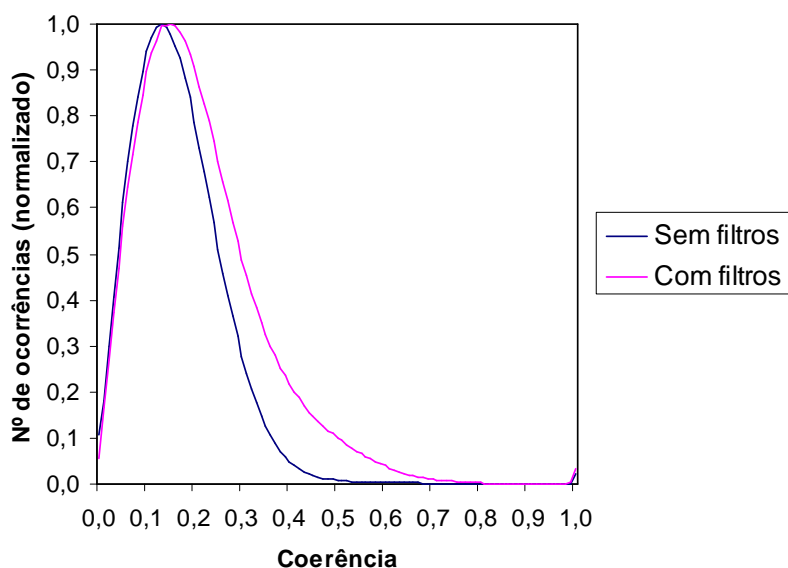


Figura 4.4 - Histograma da coerência sem e com filtros espectrais.

Analisando a Figura 4.5, que representa a fase interferométrica gerada com a componente de fase da Terra plana, nota-se que poucas regiões apresentam franjas, ou seja, somente nas regiões desmatadas da imagem, que possuem um grau de coerência interferométrica maior.

Esta região é bastante plana, sendo as franjas provocadas principalmente devido a linha-base. Neste caso a linha-base normal (2810 m) esta bem próxima da linha-base crítica (3327 m), (SILVA, 2009), gerando franjas bastante densas.

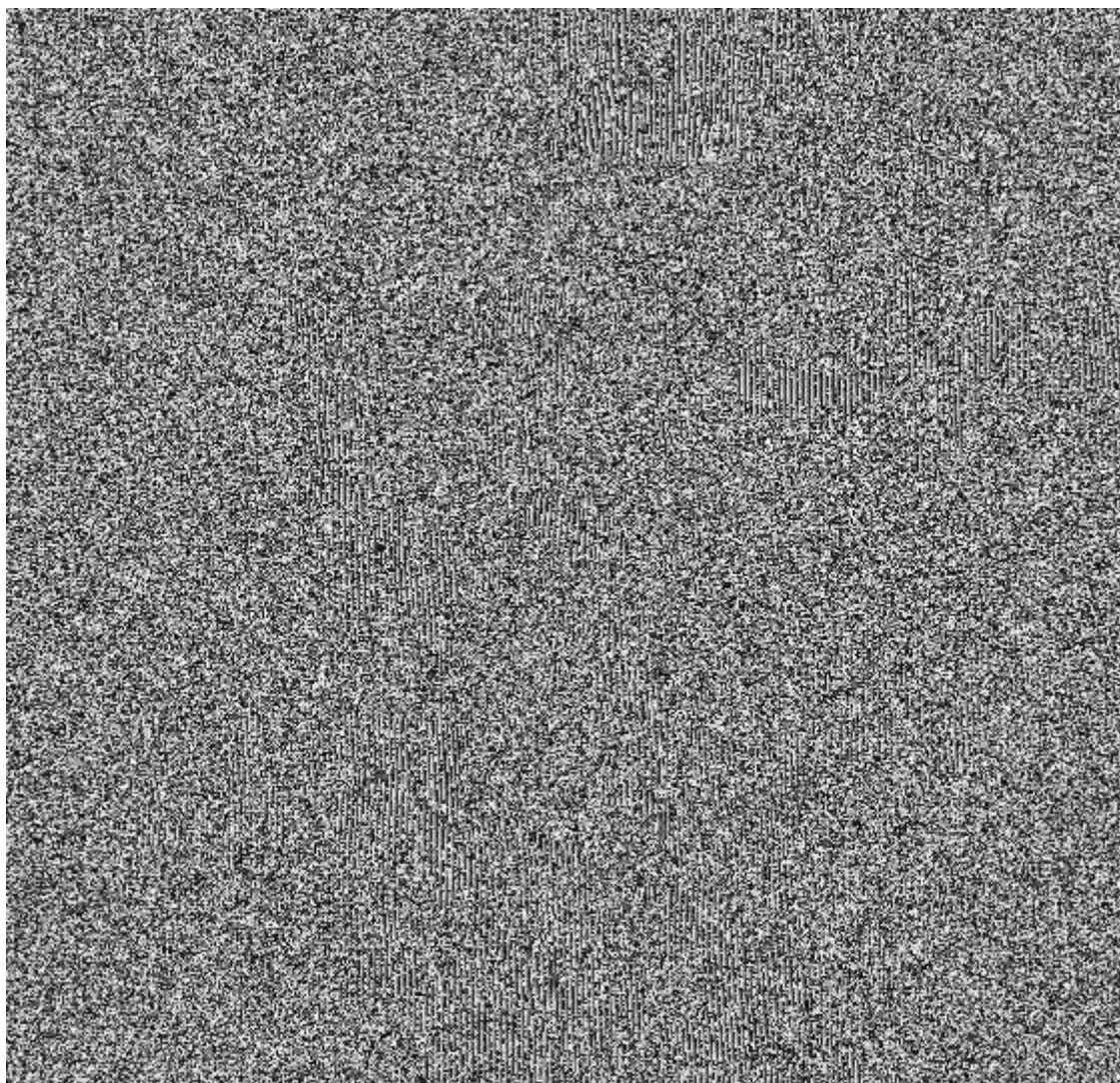


Figura 4.5 - Fase interferométrica com Terra plana ilustrando a densidade das franjas.

A alta frequência das franjas devido a Terra plana é um indicador de um grande descasamento dos espectro de potência na direção de alcance. A Figura 4.6 mostra as imagens de coerência sem (a) e com (b) a filtragem espectral em alcance, ou seja, quando se removeu a parte do espectro não

comum a ambas as imagens houve um melhora significativa na coerência interferométrica, surgindo inclusive regiões com boa coerência antes ausentes, mostrando a efetividade desta filtragem. No exemplo da Figura 4.6 foi utilizado o modo de execução Fino 1 PC.

As regiões de baixa coerência, que representam a maior parte da imagem, ocorreram principalmente devido à diferença de tempo entre as aquisições (42 dias), que em uma região de floresta, como a de Tapajós, causa descorrelação temporal mesmo na banda L. Além da diferença de tempo entre as aquisições, a segunda aquisição ocorreu num mês com maior incidência de chuva, além do normal da região para a época. Isso certamente alterou as propriedades dielétricas dos refletores acentuando a descorrelação temporal.

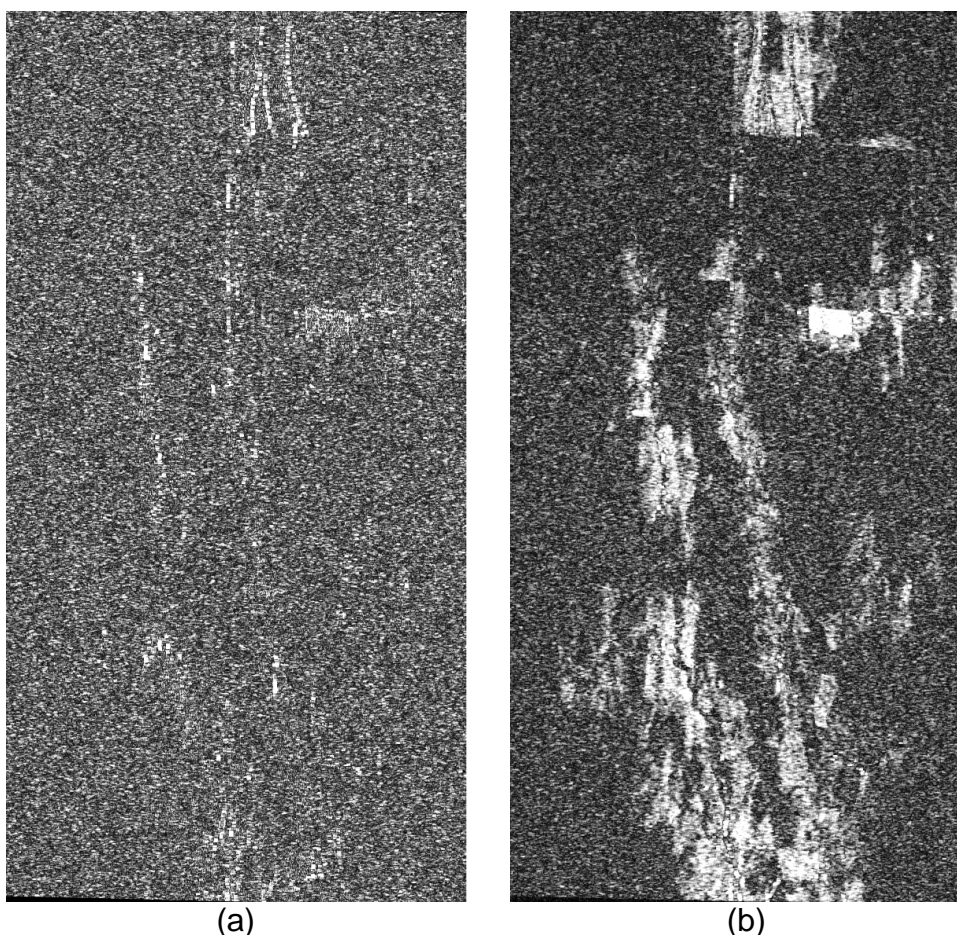


Figura 4.6 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) filtros espectrais, ALOS/PALSAR.

A Figura 4.7 mostra a fase interferométrica sem a componente de fase da Terra plana (a) e a imagem de resíduos (b).

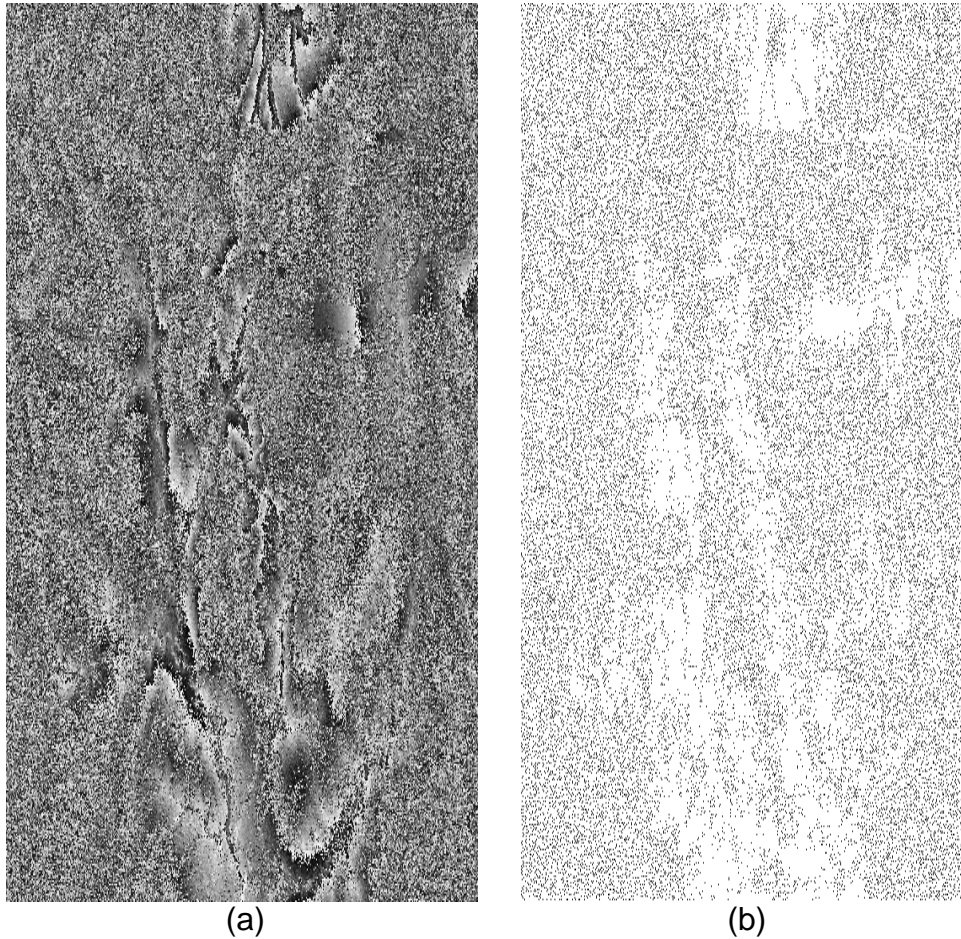


Figura 4.7 - Imagem da fase interferométrica sem fase da Terra plana (a) e a imagem de resíduos (b).

4.3 Par interferométrico do sensor TerraSAR-X

O terceiro par de imagens utilizado foi do sensor TerraSAR-X, banda X, da região do Grand Canyon. Este par foi processado utilizando para o Registro Fino os parâmetros de execução da Tabela 4.5. Como o par é extenso (4096x4096 pixels), foi utilizada uma quantidade maior de janelas. A janela do filtro espacial utilizada para filtrar o interferograma foi de 5x5 pixels, pois o aspecto da imagem era retangular. Os resultados das nove execuções estão

listados na Tabela 4.6, mais uma vez divididos entre sem e com aplicação dos filtros espectrais.

Tabela 4.5 - Parâmetros do Registro Fino, terceiro par de imagens.

Parâmetro	Valor
Fator de Ampliação	16
Número de janelas em X	20
Número de janelas em Y	20
Tamanho da janela (pixels) em X	32
Tamanho da janela (pixels) em Y	32
Distância da borda da imagem	32

Tabela 4.6 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao terceiro par de imagens.

Grand Canyon	Sem filtros espectrais		Com filtros espectrais	
	Resíduos +	Coerência	Resíduos +	Coerência
Grossoiro C	51671	0,52	51091	0,52
Grossoiro PC	51671	0,52	51091	0,52
Grossoiro GC	51671	0,52	51091	0,52
Fino 1 C	51462	0,55	50997	0,54
Fino 1 PC	51782	0,54	51380	0,54
Fino 1 GC	51796	0,55	51096	0,54
Fino 2 C	51635	0,55	51101	0,54
Fino 2 PC	52397	0,54	51745	0,54
Fino 2 GC	52436	0,53	51910	0,54

Na Tabela 4.6, pode-se observar que a melhor configuração em relação ao número de resíduos e coerência é a Fino 1 C.

A aplicação dos filtros espectrais não apresentou melhoras significativas na imagem de coerência, como pode ser observado nas Figuras 4.8 e 4.9. Duas são as prováveis causas deste comportamento. A primeira é que o desvio de frequência espectral em range é muito menor que a largura de banda do

sistema em alcance do TerraSAR-X, que é bem alta (80 MHz), tendo com isto pouca região não comum do espectro em alcance entre as imagens. A segunda causa é que o desvio de frequência Doppler entre as duas imagens, da ordem de 141 Hz, também é bem menor que a largura de banda em azimute (2765 Hz), tornando estas filtragens poucas efetivas.

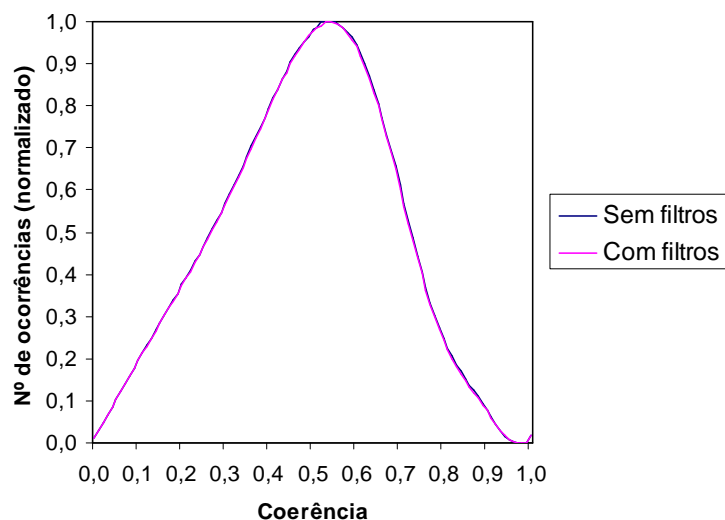


Figura 4.8 - Histograma da coerência sem e com filtros espectrais.

A Figura 4.9 apresenta a imagem de coerência com e sem a aplicação de filtros espectrais.

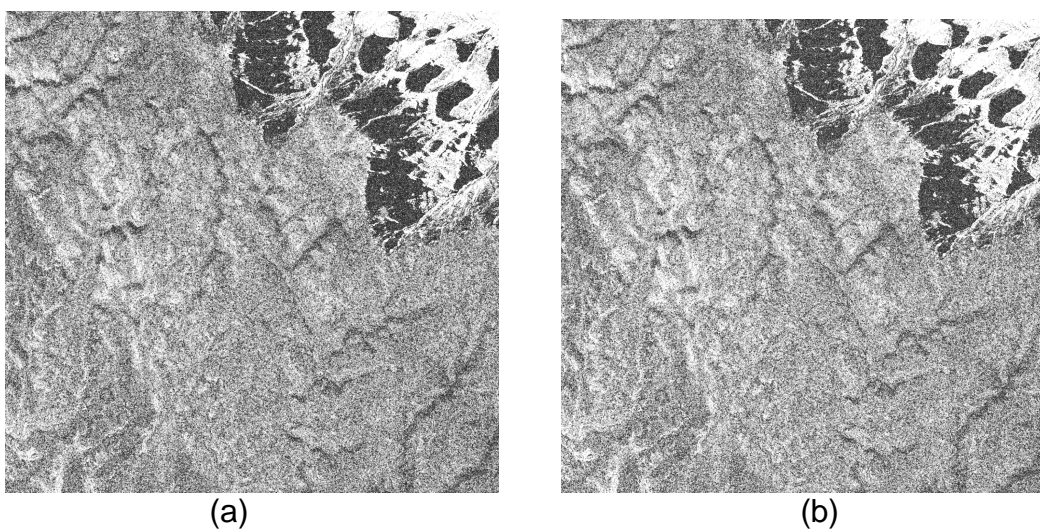


Figura 4.9 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) os filtros espectrais.

A Figura 4.10 apresenta a fase interferométrica sem a componente de fase da Terra plana (a) e a imagem de resíduos (b).

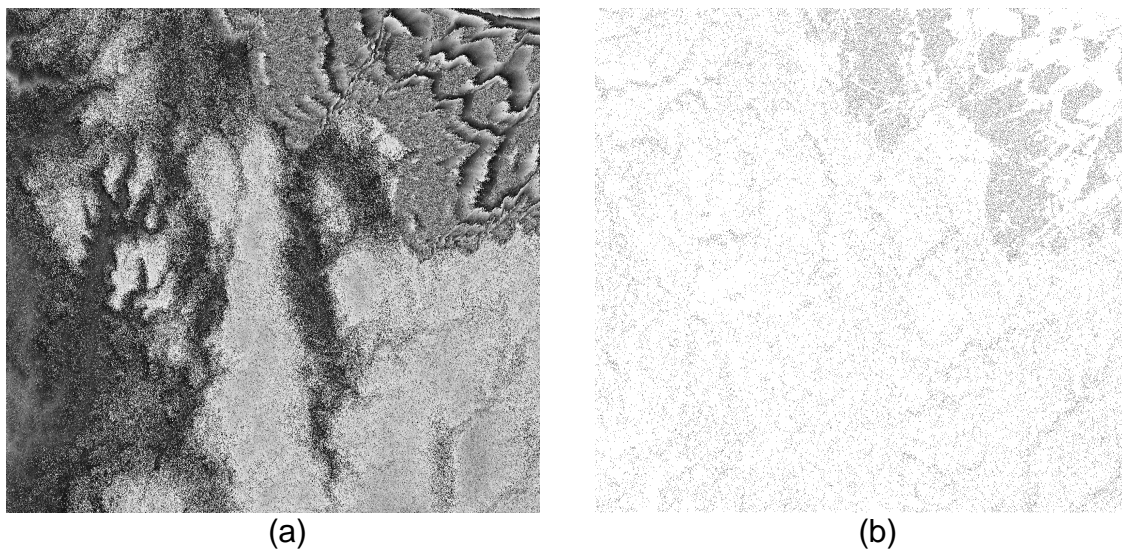


Figura 4.10 - Fase interferométrica sem componente de fase da Terra plana (a) e imagem de resíduos (b).

4.4 Par interferométrico do sensor R-99 (Banda X)

O quarto par de imagens foi do sensor R-99, na banda X, adquirido sobre a região de Campinas. Este par foi processado utilizando para o Registro Fino os parâmetros de execução da Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Parâmetros do Registro Fino, quarto par de imagens.

Parâmetro	Valor
Fator de Ampliação	16
Número de janelas em X	10
Número de janelas em Y	10
Tamanho da janela (pixels) em X	32
Tamanho da janela (pixels) em Y	32
Distância da borda da imagem	32

A janela do filtro espacial utilizada para filtrar o interferograma foi de 3x7 pixels. As nove execuções e seus respectivos resultados estão listados na Tabela 4.8, nos mesmos moldes dos pares anteriores.

Tabela 4.8 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao quarto par de imagens.

Campinas X	Sem filtros espectrais		Com filtros espectrais	
	Resíduos +	Coerência	Resíduos +	Coerência
Grossoiro C	3269	0,66	3352	0,65
Grossoiro PC	3269	0,66	3352	0,65
Grossoiro GC	3269	0,66	3352	0,65
Fino 1 C	3174	0,68	3162	0,67
Fino 1 PC	3167	0,68	3217	0,68
Fino 1 GC	3176	0,69	3223	0,68
Fino 2 C	3196	0,68	3262	0,67
Fino 2 PC	3176	0,68	3151	0,68
Fino 2 GC	3191	0,69	3246	0,68

Com base nos dados da Tabela 4.8, nota-se que a melhor configuração de modo de execução, em relação à contagem de resíduos e coerência, foi o Fino 2 PC. Os dados mostram casos em que os filtros espectrais não foram efetivos. Ao contrário, muitas vezes pioraram o desempenho do registro. Os histogramas da execução Fino 2 PC são apresentados na Figura 4.11, confirmando esta situação.

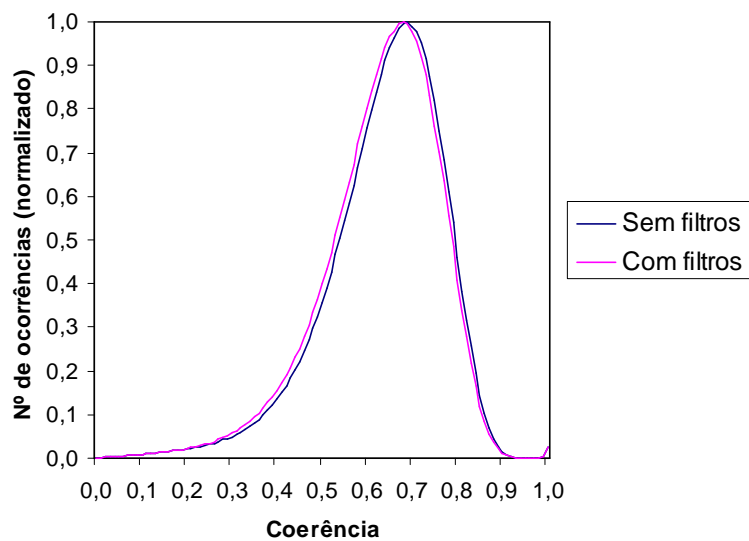


Figura 4.11 - Histograma da coerência sem e com filtros espectrais.

Observa-se na Figura 4.12 a baixa frequência nas franjas no sentido de alcance no interferograma, mesmo sem a remoção da componente da fase da Terra plana.



Figura 4.12 - Fase interferométrica com fase da Terra plana.

A causa deste comportamento é a maneira com que o par de imagens interferométricas foi gerado pelo PROSAR-BR. Por razões internas do software as duas imagens foram levadas para uma única trajetória ideal durante o procedimento de compensação de movimento da aeronave, eliminando com isto a componente da fase da Terra plana. Como o algoritmo de filtragem espectral utiliza esta componente de fase para calcular a componente não comum do espectro, a filtragem em range não teve efeito. O filtro espectral de azimute também não produziu efeito, pois praticamente não há diferença da frequência Doppler, já que ambas as antenas da banda X do R-99 estão montadas na aeronave a uma distância fixa, ou seja, não há variação do ângulo de "yaw" entre elas.

Apesar da alta coerência que pode ser obtida pelo fato do R-99 (banda X) ser um sistema interferométrico de uma passagem, não sofrendo descorrelação temporal, a geração das imagens interferométricas, preservando a linha-base, teria grande chance de melhoria na coerência com a aplicação do filtro espectral em alcance.

A Figura 4.13 mostra as imagens de coerência sem (a) e com (b) filtros espectrais. A Figura 4.14 mostra a fase interferométrica sem a componente de fase da Terra plana (a) e a imagem de resíduos (b) da imagem filtrada.

Nota-se na Figura 4.13 e 4.14(a) uma ondulação na coerência e fase no sentido de azimute (vertical) causada provavelmente pela insuficiente compensação de movimento da aeronave.

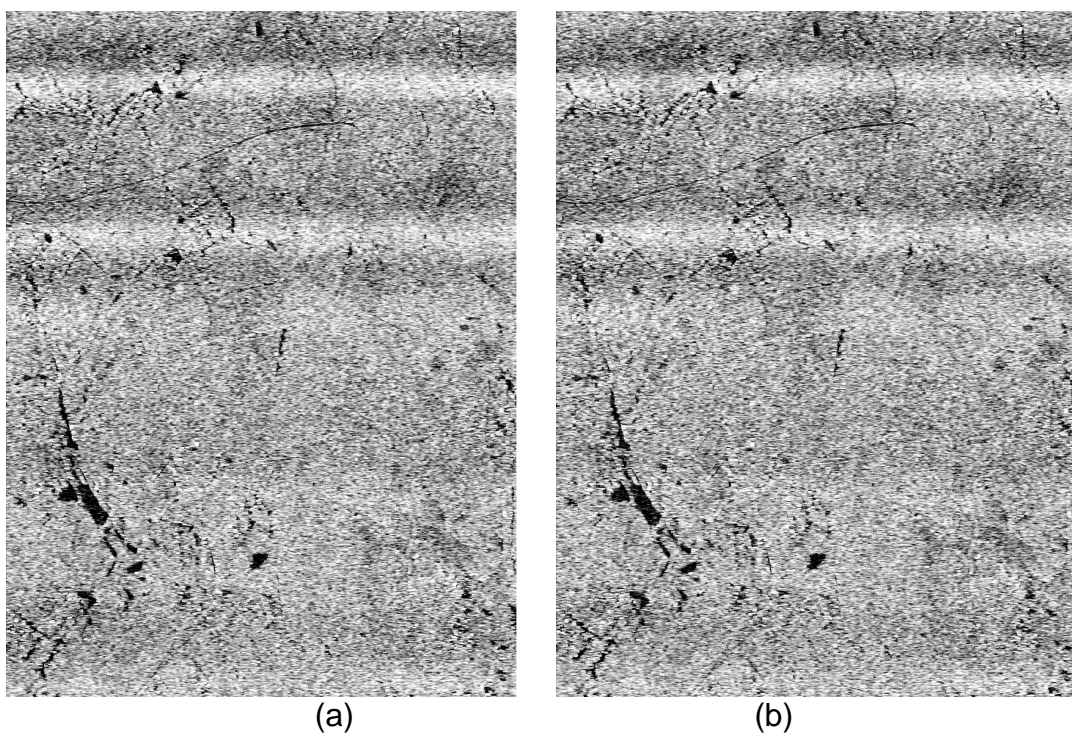


Figura 4.13 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) os filtros espectrais.

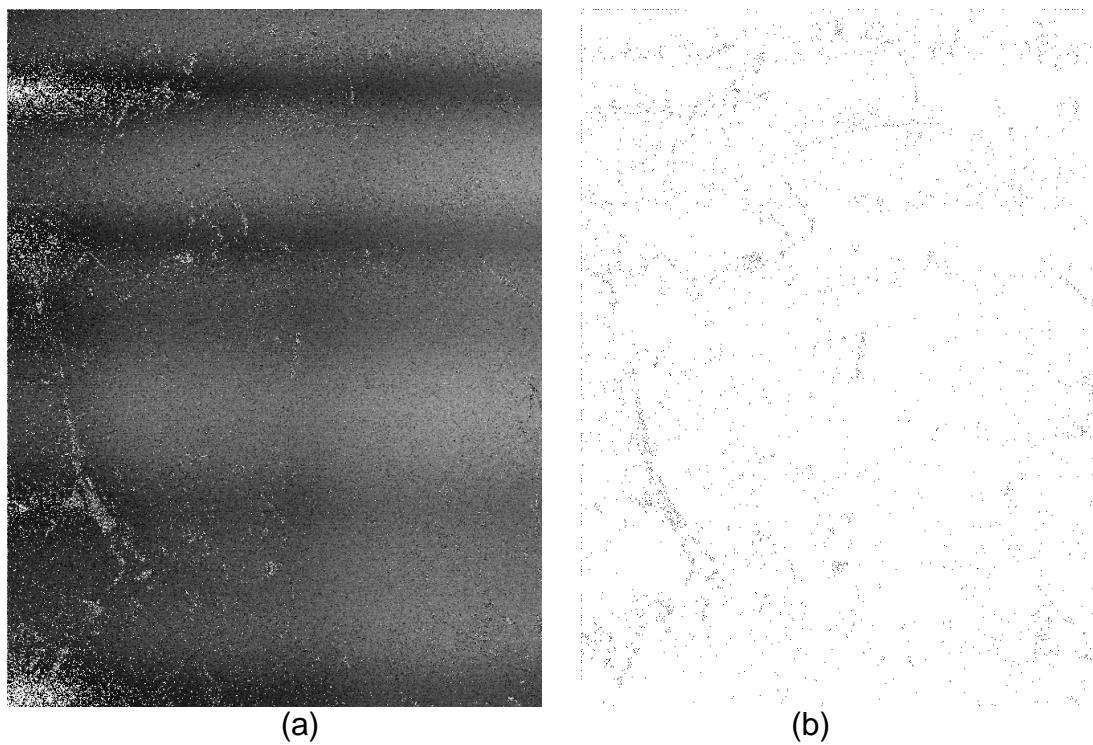


Figura 4.14 - Fase interferométrica sem a componente de fase da Terra plana (a) e imagem dos resíduos (b).

4.5 Par interferométrico do sensor R-99 (Banda L)

O quinto par de imagens utilizadas foi do sensor R-99, banda L (HH), região de Campinas. Este par foi processado utilizando para o Registro Fino os parâmetros de execução da Tabela 4.9. A janela do filtro espacial utilizada para filtrar o interferograma foi de 3x7 pixels. As execuções do algoritmo e respectivos resultados estão listados na Tabela 4.10, no mesmos moldes dos pares anteriores.

Tabela 4.9 - Parâmetros do Registro Fino, quinto par de imagens.

Parâmetro	Valor
Fator de Ampliação	8
Número de janelas em X	5
Número de janelas em Y	7
Tamanho da janela (pixels) em X	32
Tamanho da janela (pixels) em Y	256
Distância da borda da imagem	64

Tabela 4.10 - Avaliação quantitativa do algoritmo aplicado ao quinto par de imagens.

Campinas L	Sem filtros espectrais		Com filtros espectrais	
	Resíduos +	Coerência	Resíduos +	Coerência
Grossoiro C	39014	0,20	42274	0,18
Grossoiro PC	39014	0,20	42274	0,18
Grossoiro GC	39014	0,20	42274	0,18
Fino 1 C	35260	0,22	38756	0,19
Fino 1 PC	38502	0,21	40313	0,19
Fino 1 GC	38703	0,22	38709	0,22
Fino 2 C	34721	0,22	34888	0,23
Fino 2 PC	38055	0,22	38420	0,22
Fino 2 GC	35045	0,22	39923	0,17

Tomando o caso de menor número de resíduos, o modo de execução que apresentou o melhor resultado foi o Fino 2 C. Os histogramas de suas coerências são mostrados na Figura 4.15. No melhor caso, os filtros espectrais não alteram a qualidade da imagem interferométrica.

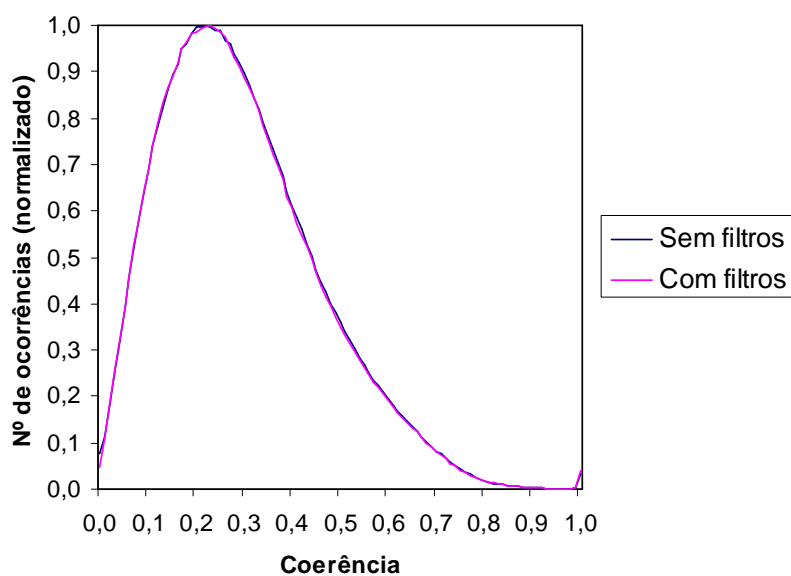


Figura 4.15 - Histograma da coerência sem e com filtros espectrais.

As imagens de coerência com e sem filtros espectrais são mostradas na Figura 4.16 e são visualmente idênticas.

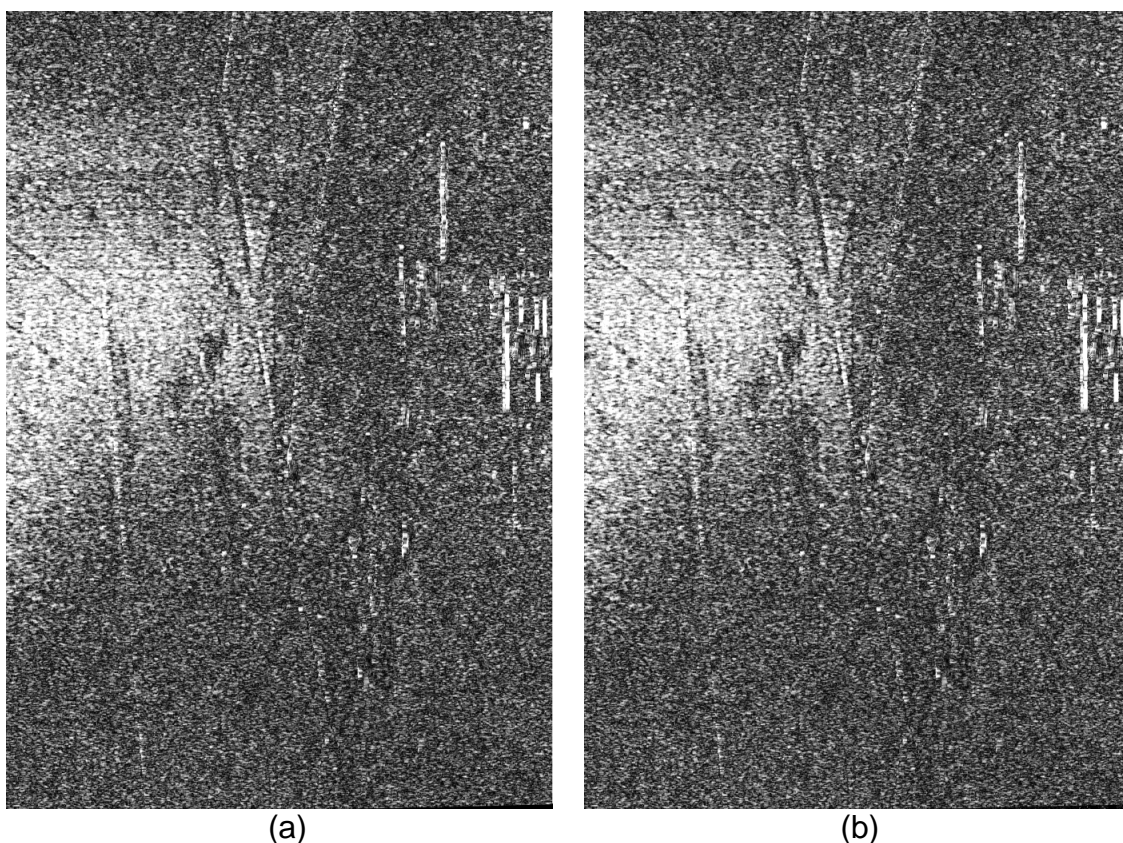


Figura 4.16 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) os filtros espectrais.

Pode-se observar que nas imagens de coerência (Figura 4.16) que existe apenas uma região de maior coerência na imagem. Para uma melhor análise as imagens de coerência e fase, em todos os modos de execução do registro, foram geradas para ter uma idéia mais clara dos problemas ocorridos no registro deste par de imagens.

A Figura 4.17 exibe a fase interferométrica das seis execuções do Registro Fino, em conjunto com a respectiva imagem de coerência: (a) Fino 1 C, (b) Fino 2 C, (c) Fino 1 PC, (d) Fino 2 PC, (e) Fino 1 GC e (f) Fino 2 GC.

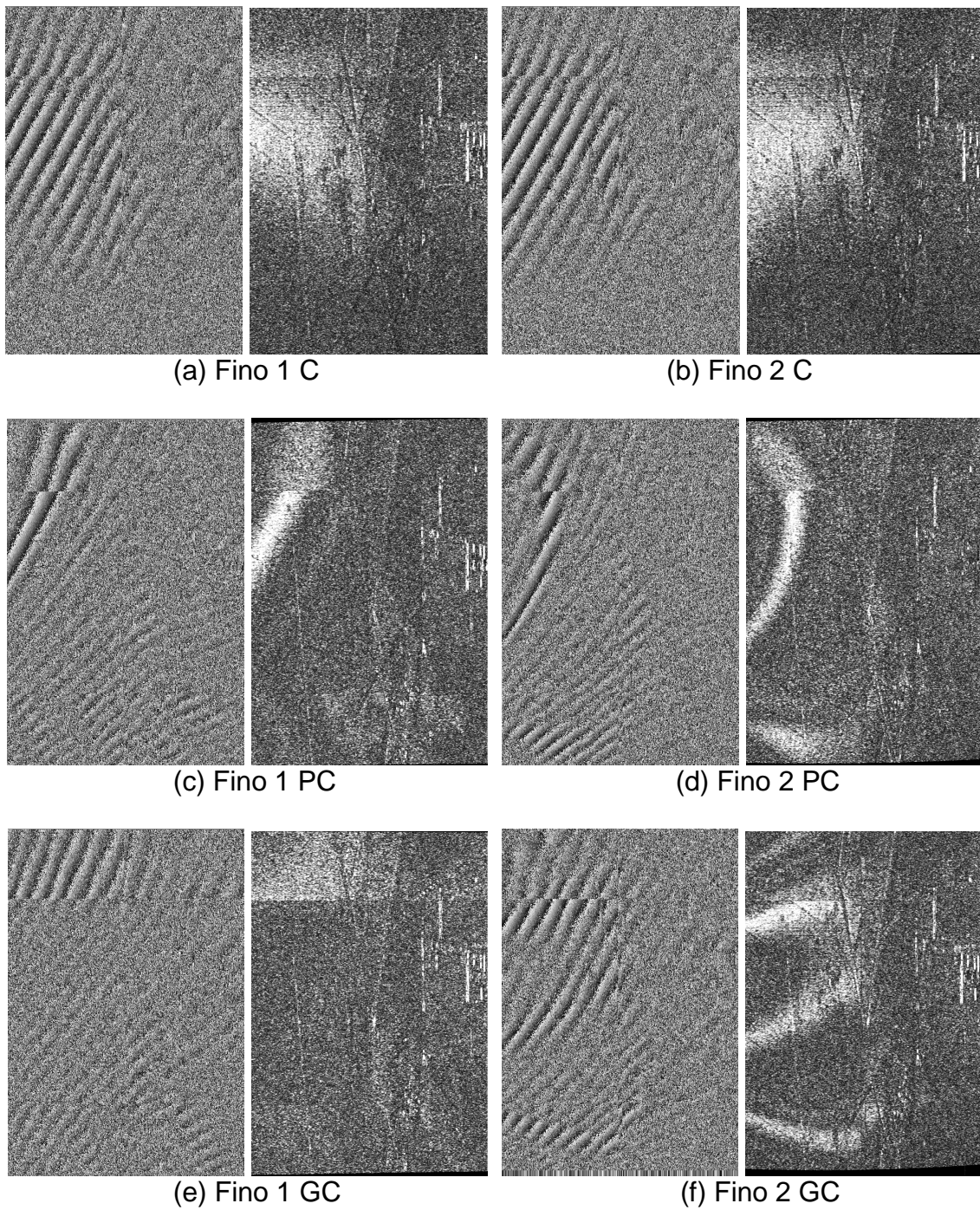


Figura 4.17 - Comparação entre as fases interferométricas dos Registros Finos.

Como pode ser observado na Figura 4.17, existem várias descontinuidades na fase interferométrica, em todos os casos. A causa provável destas descontinuidades é o processamento em blocos realizado pelo PROSAR-BR

na geração das imagens. Embora nas imagens em amplitude não seja perceptível, há uma distorção na fase interferométrica que não pode ser corrigida, ou seja, há uma descontinuidade de fase entre os blocos que compõe cada imagem. Como também pode ser visto, cada técnica de correlação tende a registrar melhor um destes blocos, prejudicando o registro dos outros blocos. Tomando apenas a região de um bloco, é possível produzir resultados limitados, mas isso de forma alguma é uma solução para este problema. Novos algoritmos de processamento precisam ser feitos para que a banda L do R-99 possa ser aproveitada para a interferometria SAR.

5 CONCLUSÕES

Através dos experimentos realizados pode-se concluir que o registro automático de imagens interferométricas SAR, implementado neste trabalho, mostrou-se robusto, no sentido de realizar o registro com dados de diferentes tipos de sensores, adquiridos em diferentes condições.

Dentre os métodos de correlação estudados, é possível concluir que o de Correlação Cruzada é adequado para realizar a etapa de Registro Grosseiro. Devido a sua simplicidade, a sua utilização nesta etapa pode economizar tempo de execução.

No caso do Registro Fino, o método de Correlação de Gradiente apresentou resultados mais consistentes, isto é, quando não foi o melhor método das seis execuções de Registro Fino, foi bastante próximo do melhor método. Os resultados obtidos com a Correlação de Fase também ficaram bem próximos aos da Correlação de Gradiente, sendo notavelmente superiores no caso de primeiro grau do par ALOS/PALSAR. No conjunto de dados testados, o uso de polinômios de primeiro grau foi suficiente para modelar a deformação.

Por meio da análise das imagens de coerência e do método de contagem de resíduos foi possível verificar a qualidade do registro de maneira automática, mesmo sem usar os dados de trajetória e atitude das plataformas.

Além disso, foi possível verificar a eficácia e a necessidade do uso dos filtros espectrais no processo de registro automático de imagens interferométricas SAR, como por exemplo no caso ALOS/PALSAR, representado nas imagens de coerência da Figura 4.6.

A abordagem de registro adotada utilizando FFT também permite explorar, futuramente, soluções de execução paralela das transformadas, tais como as presentes nas bibliotecas FFTW e CUDA. Independente de bibliotecas externas, a etapa de Registro Fino é a mais custosa computacionalmente e

uma boa candidata para paralelização de execução, pois pode-se executar cada janela numa execução independente.

Usando o algoritmo de registro, desenvolvido neste trabalho, foi possível gerar a fase interferométrica com pares de imagens produzidos pelo PROSAR-BR, embora o software não tenha sido projetado especificamente para esta finalidade.

Nos testes realizados com as imagens do R-99, processadas com o software PROSAR-BR, notou-se que existem aspectos na geração das imagens que, apesar de não refletirem nas imagens de amplitude, são refletidos nas fases destas imagens, causando impacto nas imagens de coerência e de fase interferométrica. Estes aspectos, como a eliminação das franjas na banda X e as descontinuidades da fase interferométrica na banda L, precisam ser estudados e corrigidos para a formação de pares interferométricos de qualidade.

Trabalhos futuros podem abordar a implementação do filtro de alcance adaptativo ou ainda a utilização de DEM de baixa resolução para a realização da filtragem adaptativa. Uma técnica para o preenchimento automático dos parâmetros de registro também poderia ser abordada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELFATTAH, R.; NICOLAS, J. M. Sub-pixelic Image Registration for SAR Interferometry Coherence Optimization. In: ISPRS CONGRESS, 20., 2004, Istanbul. **Proceedings...** Stanbul: ISPRS, 2004..

ARGYRIOU, V.; VLACHOS, T. Estimation of sub-pixel motion using gradient cross-correlation. **Electronics Letters**, v.39, n.13, p.980-982, 2003.

BAMLER, R.; HARTL, P. Synthetic Aperture Radar Interferometry. **Inverse Problems**, v.14, n.4, p.R1-R54, 1998.

BENTOUTOU, Y.; TALEB, N.; KPALMA, K.; ROSIN, J. Automatic image registration for applications in remote sensing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.43, n.9, p.2127-2137, 2005.

DE CASTRO, E.; MORANDI, C. Registration of translated and rotated images using finite fourier transforms. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v.PAMI-9, n.5, p.3317-3341, 1987.

FERRETTI, A.; MONTI-GUARNIERI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. **InSAR principles: guidelines for SAR interferometry processing and interpretation**. Noordwijk : ESA Publications, 2007. 246 p. (ESA TM-19).

FONSECA, L.M.G.; MANJUNATH, B.S. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 62, n. 9, p. 1049-1056, 1996.

GATELLI, F.; GUARNIERI, A.M.; PARIZZI, F.; PASQUALI, P.; PRATI, C.; ROCCA, F. Wavenumber shift in SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.32, n.4, p.855-865, 1994.

GOLDSTEIN, R.M.; ZEBKER, H.A.; WERNER, C.L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. **Radio Science**, v.23, n.4, p.713-720, 1988.

GRAHAM, L. C. Synthetic interferometer radar for topography mapping. **Proceedings of the IEEE**, v.62, n.6, p.763-768, 1974.

KETELAAR, V.B.H. Satellite oversampling. In: _____. **Satellite radar interferometry**. 1. Ed. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2009.

KRIEGER, G.; MOREIRA, A.; FIEDLER, H.; HAJNSEK, I.; WERNER, M.; YOUNIS, M. ZINK, M. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.45, n.11, p.3317-3341, 2007.

KUGLIN, C.D.; HINES, D.C. The phase correlation image alignment method. In: IEEE CONF. CYBERNETICS AND SOCIETY, 1975., New York. **Proceedings...** New York: IEEE, 1975. p.163-165.

LI, F. K.; GOLDSTEIN, R. M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.28, n.1, p.88-97, 1990.

LIN, Q.; VESECKY, J. F.; ZEBKER, H. A. New approaches in interferometric SAR data processing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.30, n.3, p.560-567, 1992.

LYONS, R.G. DFT Shifting theorem. In: _____. **Understanding digital signal processing**. [S.l.]: Prentice Hall, 2004. p.63-65. ISBN 013108989-7.

LYONS, R.G. **How to interpolate in the time-domain by zero-padding in the frequency domain**. Disponível em: <http://www.dspguru.com/dsp/howtos/how-to-interpolate-in-time-domain-by-zero-padding-in-frequency-domain>. Acesso em: 01 ago. 2010.

MADSEN, S. N.; ZEBKER, H. A.; MARTIN, J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.31, n.1, p.246-256, 1993.

MORA, O.; MALLORQUI, J. J.; BROQUETAS, A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.10, p.2243-2253, 2003.

OPPENHEIM, A. V. The Importance of Phase in Signals. **Proceedings of the IEEE**, v.69, n.5, p.529-541, 1981.

PAYNE, T. Coherent Synthetic Aperture Radar (SAR) pair formation. **Proceedings of the International Radar Conference**, p.109-114, 2003.

REDDY, B. S.; CHATTERJI, B. N. An FFT-based technique for translation and rotation, and scale-invariant image registration. **IEEE Transactions on Image Processing**, v.5, n.8, p.1266-1271, 1996.

REIGBER, A. Range dependent spectral filtering to minimize the decorrelation in airborne sar interferometry. **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v.3, p.1721-1723, 1999.

RICHARDS, M.A. A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, v.22, n.9, p.5-29, 2007.

ROSEN, P. A.; HENSLEY, S.; JOUGHIN, I. R.; LI, F. K.; MADSEN, S. N.; RODRÍGUEZ, E.; GOLDSTEIN, R. M. Synthetic Aperture Radar Interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v.88, n.3, p.333-382, 2000.

SCHWABISCH, M.; GEUDTNER, D. Improvement of Phase and Coherence Map Quality Using Azimuth Prefiltering: Examples from ERS-1 and X-SAR. **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v.1, p.205-207, 1995.

SILVA, D. L. A. **Geração e avaliação de produtos interferométricos dos dados ALOS/PALSAR FDB e PLR para fins de classificação da cobertura da terra na região Amazônia**. 2009. 159 p. (INPE-16237-TDI/1553). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/06.01.20.48>>. Acesso em: 12 ago. 2011.

TAO, W.; HONG, Z.; CHAO, W. Spectral filtering for radar interferometry: position analysis of filtering. **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v.4, p.2629-2631, 2004.

TOUZI, R.; LOPES, A.; BRUNIQUEL, J.; VACHON, P.W. Coherence estimation for SAR imagery **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.37, n.1, p.135-149, 1999.

TZIMIROPOULOS, G.; ARGYRIOU, V.; ZAFEIRIOU, S.; STATHAKI, T. Robust FFT-based scale-invariant image registration with image gradients. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v.32, n.10, p.1899-1906, 2010.

WANG, C.; LIU, Z.; ZHANG, H.; SHAN, X. The coseismic displacement field of the Zhangbei-Shangyi earthquake mapped by differential radar interferometry. **Chinese Science Bulletin**, v.46, n.6, p.514-517, 2001.

WU, T.; WANG, C.; ZHANG, H.; TANG, Y. X.; TIAN, L. Deformation retrieval in large areas based on multibaseline DInSAR algorithm: a case study in Cangzhou, northern China. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.12, p.3633-3655, 2008.

XIE, H.; HICKS, N.; KELLER, G. R.; HUANG, H.; KREINOVICH, V. An IDL/ENVI implementation of the FFT-based algorithm for automatic image registration. **Computers & Geosciences**, v.29, p.1045-1055, 2003.

ZALOTI JUNIOR, O. D. **Avaliação do modelo digital do terreno extraído de dados SAR interferométricos na Banda X do SAR R-99B**. 2007. 145 p. (INPE-15312-TDI/1357). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.26.19.58>>. Acesso em: 04 jun. 2010.

ZEBKER, H. A.; VILLASENOR, J. Decorrelation in interferometric radar echoes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.30, n.5, p.950-959, 1992.

GLOSSÁRIO

Aliasing - Efeito que torna diferentes sinais indistinguíveis quando amostrados.

Chirp - Sinal cuja frequência aumenta ou diminui num intervalo de tempo.

Desdobramento de fase - Processo de retirada da ambiguidade do módulo 2π da fase.

Frequência Doppler central - Deslocamento da frequência Doppler gerada pela variação de ângulo de *yaw* do sensor.

Resíduos - Pontos de inconsistência da fase interferométrica.

Squint - Ângulo entre o plano da antena e o observador no solo.

Yaw - Ângulo de deriva entre a proa da aeronave e a direção de vôo.

APÊNDICE A - DETECÇÃO DE ROTAÇÃO E ESCALA

Apesar dos pares de imagens interferométricas apresentarem uma geometria de aquisição bastante controlada, pode haver uma pequena rotação e escala entre elas principalmente nos casos de duas passagens. Como experimento, foi avaliada a expansão do método de correlação de fase por Reddy e Chatterji (1996), que permite detectar rotação e escala, além da translação. Xie et al. (2003) apresentam uma implementação desta teoria.

A.1 Imagens com Translação e Rotação

Tomando $f_2(x,y)$ como uma réplica transladada e rotacionada de $f_1(x,y)$, com translação (x_0,y_0) , e rotação θ_0 , então

$$f_2(x,y) = f_1(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0 - x_0, -x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0 - y_0) . \quad (\text{A.1})$$

De acordo com a propriedade de translação e rotação da transformada de Fourier, ao se tomar as transformadas de f_1 e f_2 a relação passa a ser a seguinte:

$$F_2(\xi, \eta) = e^{-j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} \times F_1(\xi \cos \theta_0 + \eta \sin \theta_0, -\xi \sin \theta_0 + \eta \cos \theta_0) . \quad (\text{A.2})$$

Sendo M_1 e M_2 as amplitudes de F_1 e F_2 , a partir de A.2 temos que

$$M_2(\xi, \eta) = M_1(\xi \cos \theta_0 + \eta \sin \theta_0, -\xi \sin \theta_0 + \eta \cos \theta_0) . \quad (\text{A.3})$$

Avaliando as amplitudes de F_1 e F_2 , descritas em A.3, observa-se que a amplitude de ambos os espectros são iguais, exceto pelo fato de um espectro ser uma réplica rotacionada do outro espectro. A rotação sem translação pode ser deduzida através de técnicas de correlação, desde que a rotação seja

representada através por um deslocamento. Isso é possível reescrevendo a Equação A.3 em coordenadas polares da seguinte forma

$$M_1(\rho, \theta) = M_2(\rho, \theta - \theta_0) . \quad (\text{A.4})$$

Utilizando a técnica de correlação de fase nas amplitudes da equação A.4, o ângulo θ_0 pode ser encontrado.

A.2 Imagens com Translação, Rotação e Escala

Seja f_1 uma réplica escalonada de f_2 com fatores de escala (a,b) para as direções horizontal e vertical. De acordo com a propriedade de escala da transformada de Fourier, as transformadas de Fourier de f_1 e f_2 ficam relacionadas da seguinte maneira:

$$F_2(\xi, \eta) = \frac{1}{|ab|} F_1(\xi/a, \eta/b) . \quad (\text{A.5})$$

Convertendo os eixos para escala logarítmica, o problema da escala pode ser reduzido a um problema de movimento de translação (ignorando o fator multiplicativo $1/(ab)$):

$$F_2(\log \xi, \log \eta) = F_1(\log \xi - \log a, \log \eta - \log b) . \quad (\text{A.6})$$

Isto é,

$$F_2(x, y) = F_1(x - c, y - d) \quad (\text{A.7})$$

onde $x = \log(\xi)$, $y = \log(\eta)$, $c = \log(a)$ e $d = \log(b)$.

A translação (c,d) da equação A.7 pode ser calculada pela técnica de correlação de fase e os fatores de escala (a,b) podem ser calculados a partir de (c,d) por:

$$a = e^c \quad b = e^d \quad (\text{A.8})$$

onde e é a base do logaritmo natural. Se (x,y) for escalonado para (x/a,y/a) então sua representação polar será:

$$\rho_1 = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (\text{A.9})$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}(y/x) \quad (\text{A.10})$$

$$\rho_2 = ((x/a)^2 + (y/a)^2)^{1/2} = (1/a)(x^2 + y^2) = \rho_1 / a \quad (\text{A.11})$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}((y/a)/(x/a)) = \tan^{-1}(y/x) = \theta_1 \quad (\text{A.12})$$

Ou seja, supondo que f_1 seja uma cópia transladada, rotacionada e escalonada de f_2 , as amplitudes de suas transformadas de Fourier em representação polar são dadas por:

$$M_1(\rho, \theta) = M_2(\rho/a, \theta - \theta_0) \quad (\text{A.13})$$

$$M_1(\log \rho, \theta) = M_2(\log \rho - \log a, \theta - \theta_0) \quad (\text{A.14})$$

ou seja,

$$M_1(\xi, \theta) = M_2(\xi - d, \theta - \theta_0) \quad (\text{A.15})$$

onde

$$\xi = \log \rho \quad e \quad d = \log a \quad (\text{A.16})$$

Usando as expressões A.15 e A.16 em conjunto com a técnica de correlação de fase, a escala a e ângulo θ_0 podem ser encontrados. Uma vez que a escala e o ângulo forem encontrados, a imagem de maior resolução é escalonada e rotacionada por a e θ_0 respectivamente. Finalmente, o fator de translação é então obtido usando a técnica de correlação de fase nas imagens resultantes deste processo.

Na discussão acima, a transformação em coordenadas log-polar é aplicada à amplitude da transformada de Fourier de uma imagem. A Figura A.1 ilustra, para melhor visualização e entendimento, o efeito que a mudança de coordenadas causa numa imagem comum.

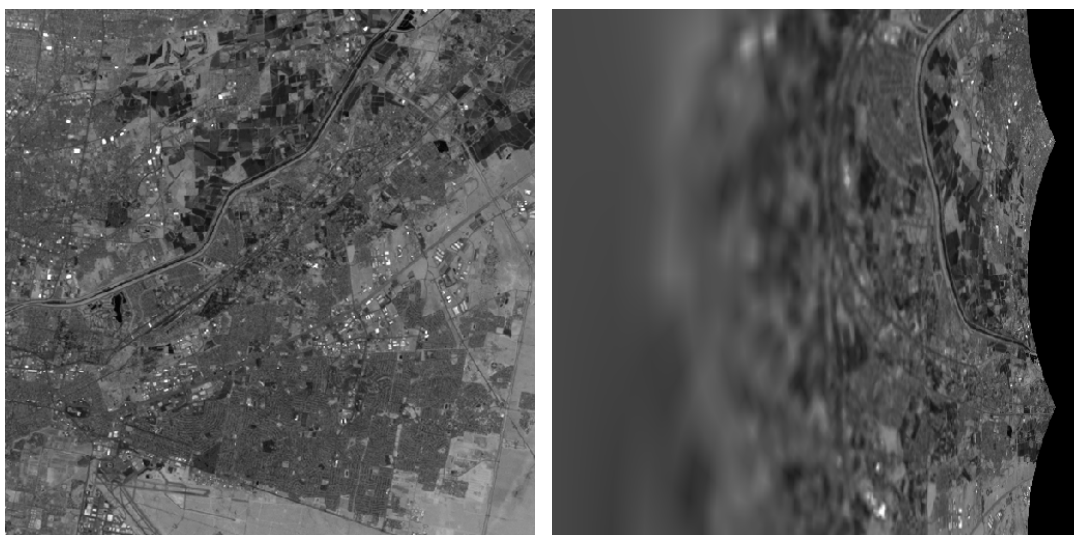


Figura A.1 - Imagem original ao lado da mesma imagem em coordenadas log-polar.

Em termos práticos o algoritmo de Xie et al. (2003) aplica esta mudança de coordenadas utilizando um semi-círculo nos quadrantes superiores das amplitudes dos espectros.

Na Figura A.1, o efeito de uma translação circular na imagem da direita no eixo vertical é o mesmo efeito que uma rotação na imagem da esquerda. Já um fator multiplicativo aplicado à imagem da esquerda é representado como uma translação de fator logarítmico na imagem da direita. No entanto, ao aplicar este conceito à amplitude da transformada de Fourier de uma imagem, pode-se

obter a informação de rotação e escala de maneira independente da translação, utilizando uma das técnicas de correlação.

Em vários testes realizados com as imagens SLC, a rotação ou escala não foram detectados, ou seja, a rotação detectada era 0 e a escala 1. Em alguns poucos casos, quando o algoritmo detectou ângulo e escala, a imagem reamostrada não manteve a diferença de fase, de forma que esta opção de Registro Grosseiro foi eliminada do algoritmo final.