

Revista Brasileira de Cartografia (2012) N^o 64/4: 451-463
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

REGISTRO AUTOMÁTICO DE IMAGENS SAR INTERFEROMÉTRICAS

Automatic Registration of SAR Interferometric Images

**Roberto Neves Salles¹; José Claudio Mura²
& Leila Maria Garcia Fonseca²**

¹Instituto de Estudos Avançados - IEAv

Divisão de Geointeligência - EGI

Trevo Cel. Av. José Alberto Albano do Amarante, 1 - 12228-001 - São José dos Campos - SP, Brasil
salles@ieav.cta.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Divisão de Processamento de Imagens

Av. dos Astronautas, 1758 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
mura@dpi.inpe.br, leila@dpi.inpe.br

Recebido em 25 de Agosto, 2011/ Aceito em 27 de Outubro, 2011

Received on August 25, 2011/ Accepted on October 27, 2011

RESUMO

O presente artigo 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 deslocamentos 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 foi avaliada através da análise da imagem de coerência e pelo método dos resíduos aplicados na fase interferométrica gerada a partir das imagens corregistradas. Os algoritmos foram implementados em IDL/ENVI e testados em um par de imagens do SIR-C e um par do ALOS/PALSAR.

Palavras chaves: Interferometria, registro, filtro espectral, correlação.

ABSTRACT

This paper presents an automatic registration method for interferometric SAR images. First the SAR images, in complex format, are coarsely registered using correlation techniques. This results in range and azimuth shifts on a pixel scale, that are applied to the second image, with no need for interpolation. Optionally 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 on 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 to the coregistered pair, to enhance interferometric coherence between them. The final registration quality can be measured by analyzing the coherence image and/or by residues method applied to the interferometric phase. The algorithms were implemented in IDL/ENVI and tested on SIR-C and ALOS/PALSAR data.

Keywords: Interferometry, registration, spectral filtering, correlation.

1. INTRODUÇÃO

A interferometria é uma técnica comprovada e estabelecida de obtenção de informações através da diferença de fase de duas imagens de 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 (SAR interferométrico) para estimativa de deformação e subsidência (FERRETTI et al., 2000; MORA et al., 2003; WU et al., 2008), bem como para mapeamento de alterações na superfície causadas por terremotos, deslocamento de geleiras, deslizamentos de encostas ou atividade vulcânica (WANG et al., 2001).

Os radares, ao contrário de sensores ópticos, operam na faixa de microondas 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 e Hartl, 1998).

Este trabalho visa apresentar uma metodologia de registro automático de imagens *single-look* SAR interferométricas utilizando técnicas de correlação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conceito da interferometria de radar para mapeamento topográfico foi apresentado pela primeira vez por Graham (1974). Na época de sua demonstração, as informações capturadas pelo radar e a respectiva diferença de fase entre elas eram gravadas em filme fotográfico. Hoje as informações são gravadas digitalmente e, através de processamentos adicionais, grandes avanços foram alcançados na interferometria. A geração de um interferograma depende da correta aquisição dos

dados e tem como etapa imprescindível o registro entre as imagens SAR no formato complexo.

2.1 Aquisição 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 gravada. O sinal gerado a partir do restroespalhamento é dependente da geometria da região imageada, além de fatores que controlam a constante dielétrica do alvo. 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, gerando o que se chama de imagem em “*slant range*” ou coordenadas do radar. Quando o imageamento ocorre em terreno acidentado, dois ou mais pontos que possuam exatamente o mesmo alcance são representados (i.e. suas respostas somadas) na mesma coordenada de radar, perdendo-se a informação de altitude. A Figura 1 ilustra uma plataforma de radar com duas antenas, separadas por uma distância chamada de linha-base. Dois pontos A e B equidistantes da

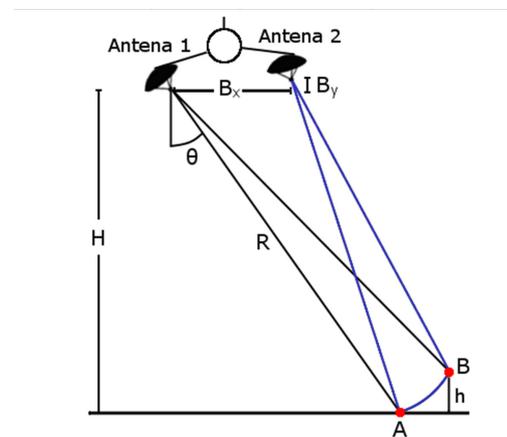


Fig. 1 - InSAR instalado numa aeronave. Fonte: Adaptado de Li e Goldstein (1990).

Antena 1 possuem distâncias diferentes até a Antena 2. Este é o conceito fundamental do 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 e GOLDSTEIN, 1990).

Observando a Figura 1, é possível relacionar a diferença de fase com a diferença das distâncias. Tomando λ como o comprimento de onda e 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:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1)$$

Conhecendo-se o ângulo de visada θ pode-se reescrever a Equação 1 com as componentes da linha-base B_x e B_y . Pode-se também formular a altura h do relevo com base na altitude H do sensor e a distância R :

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

$$h = H - R(\cos \theta) \quad (3)$$

As incertezas de cada parâmetro R , B_x , B_y , H e $\Delta\Phi$ contribuem para a incerteza da altitude h . O tamanho da linha-base também define a precisão do cálculo da altura h : uma linha base curta causa imprecisão, enquanto uma linha-base extensa causa perda da coerência, até atingir a chamada linha-base crítica, a partir da qual não é possível a formação de interferogramas.

Erros na fase interferométrica são gerados por quatro contribuições principais: relação sinal-ruído, número de *looks*, decorrelação por causa da linha-base e pixels registrados incorretamente (LI e GOLDSTEIN, 1990). Para a obtenção de padrões de interferência, também conhecidos como franjas, as imagens precisam estar corregradas com precisão subpixel (LIN et al., 1992).

O par de imagens pode ser adquirido com uma única antena através de duas passagens, ou então pela operação conjunta de duas antenas em plataformas distintas, esta última denominada operação em tandem (KRIEGER, 2007). As

Equações 1 e 2 correspondem à aquisição de uma passagem da Figura 1. No caso de duas passagens as Equações 1 e 2 são multiplicadas por um fator de 2, pois cada antena transmite e recebe seu próprio pulso.

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*). Desta forma, dado um ponto (x,y) da imagem M , as coordenadas (x,y) representarão a mesma localização geográfica em S .

Segundo Fonseca e Manjunath (1996), o registro de duas imagens é dividido em quatro etapas: a) *identificação de feições*; b) *casamento de feições*; c) *transformações espaciais*; e d) *interpolação*.

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 comuns. 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.

A interferometria realiza o registro em duas etapas: uma global e outra local (XIE, 2003). A etapa global utiliza como feição os pares de imagens completos, buscando um casamento grosseiro inicial. A etapa local utiliza janelas às quais são associados pontos de controle (CPs). Para cada janela ocorre o cálculo de deslocamentos subpixel, para um ajuste mais fino.

São características dos pares interferométricos SLC (*Single-Look Complex*) o ruído *speckle*. Além disso, técnicas de registro subpixel que buscam feições como bordas ou linhas falham em regiões mais homogêneas como montanhas (BENTOUTOU et al., 2005). Esta razão, aliada à geometria controlada de aquisição (i.e. poucas distorções), torna preferível a utilização de técnicas baseadas em área como a correlação para o registro de pares interferométricos.

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. Tzimiropoulos et al. (2010) fez uma revisão de todas estas técnicas.

A Correlação Cruzada C de dois sinais f_1 e f_2 iguais, exceto por um deslocamento (x_0, y_0) , pode ser definida através do teorema da convolução da transformada de Fourier encontrando o máximo de:

$$C(x, y) = \text{DFT}^{-1} \left(F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta) \right) \quad (4)$$

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.

Já a Correlação de Fase PC foi apresentada por Kuglin e Hines (1975) e pode ser definida como encontrar o máximo de

$$PC(x, y) = \text{DFT}^{-1} \left(\frac{F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)}{|F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)|} \right) \quad (5)$$

Argyriou e Vlachos (2003) definem a Correlação de Gradiente GC através dos gradientes horizontais e verticais calculados usando diferenciação central:

$$g_i^h(x, y) = f_i(x + 1, y) - f_i(x - 1, y) \quad (6)$$

$$g_i^v(x, y) = f_i(x, y + 1) - f_i(x, y - 1) \quad (7)$$

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

$$g_i(x, y) = g_i^h(x, y) + jg_i^v(x, y) \quad (8)$$

que contém as informações de magnitude e fase para cada pixel. Com os novos sinais g_1 e g_2 ,

calcula-se a correlação cruzada entre eles, conforme a Equação (4):

$$GC(x, y) = \text{DFT}^{-1} \left(G_1(\xi, \eta) G_2^*(\xi, \eta) \right) \quad (9)$$

2.4 Registro Grosseiro

O Registro Grosseiro equivale à etapa global de registro e utiliza a magnitude das duas imagens complexas do par interferométrico como sinais de entrada para um dos métodos de correlação. O Registro Grosseiro fornece apenas correção sistemática quanto à translação e possui resolução espacial na escala de pixel. Ao final são obtidos os deslocamentos não fracionários necessários para ajustar o par de imagens. A Figura 2 ilustra o procedimento utilizando a Correlação de Fase.

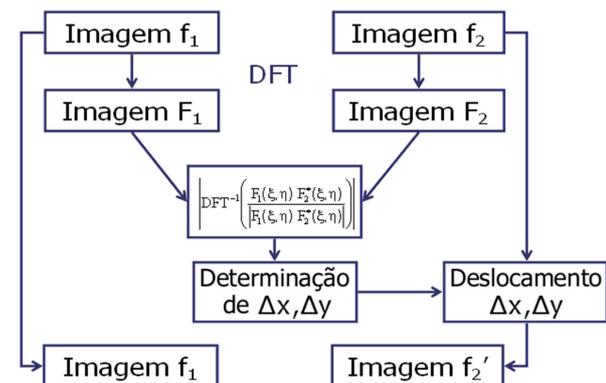


Fig. 2 - Fluxograma do Registro Grosseiro utilizando a Correlação de Fase.

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 possa 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 :

$$x' = x + \Delta x \quad (10)$$

$$y' = y + \Delta y \quad (11)$$

Como mostram as Equações 10 e 11, 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 Fino

O Registro Fino equivale à etapa local de registro e tem como objetivo obter o registro em escala de 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, porém o faz em uma grade de pequenas janelas distribuídas regularmente no par de imagens já registrado grosseiramente.

Para atingir a resolução da ordem de subpixel, cada par de pequenas janelas é expandido por interpolação por um fator K, permitindo com isso atingir resolução 1/K pixel. Os deslocamentos calculados na grade de janelas ficam associados a Pontos de Controle (CPs) definidos como a posição central do par de janelas. A partir dos deslocamentos, calculam-se os polinômios de deformação nos sentidos de alcance e azimuth, que são utilizados na reamostragem da segunda imagem. A Figura 3 ilustra o algoritmo de forma esquemática enquanto as subseções seguintes detalham seu funcionamento.

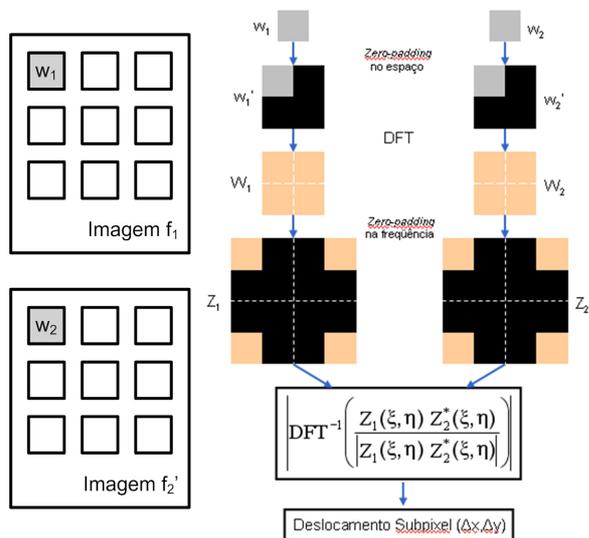


Fig. 3 - Registro Fino aplicado às imagens f_1 e f_2' utilizando Correlação de Fase.

Os parâmetros necessários para o Registro Fino são: 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, onde para valor igual a 10 detectaria 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.

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 e respeitando uma grade de pontos igualmente espaçada e de tamanho definido pelo número de janelas no eixo x e no eixo y. A Figura 3 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. 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 CP da janela.

No caso de imagens interferométricas, as dimensões relativamente pequenas das janelas, combinadas com a presença de ruído *speckle* típico de imagens SAR e com o efeito da convolução circular, afetam a busca de um ajuste da ordem de subpixel, podendo causar incorreções no processo de casamento. Para amenizar estes efeitos aplica-se o preenchimento com zeros (*zero-padding*) no domínio do espaço. Este passo é ilustrado na Figura 3 como a transição de w_1 e w_2 para w_1' e w_2' , onde a região escura representa os zeros inseridos. Isso duplica o tamanho das janelas, porém evita a convolução circular do conteúdo original. 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.

2.5.3 Técnica de zero-padding no domínio da frequência

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 frequência mais alta positiva do espectro. Isto é feito para que se mantenha a simetria espectral. Ao se tomar a DFT¹ desta nova seqüência o resultado é uma seqüência interpolada no domínio do espaço. Este é o interpolador de domínio do espaço utilizando DFT¹ e *zero-padding* no domínio

da frequência que, segundo Lyons (2010), equivale a realizar uma interpolação do tipo *sinc*.

A Figura 3 ilustra este procedimento ao gerar Z_1 e Z_2 a partir de W_1 e W_2 . O fator de expansão 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 . 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, conforme a Figura 3. Ao final da correlação, os deslocamentos expandidos obtidos são divididos pelo fator de expansão empregado para calcular 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 CP tomado como o ponto central das janelas w_1 e w_2 e o respectivo deslocamento subpixel, que melhor registra ambas as janelas w_1 e w_2 . Estes CPs 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 a interpolação. Uma nova imagem f_2'' é gerada com base em f_2' utilizando a seguinte transformação

$$f_2''(x, y) = f_2'(x', y') \quad (12)$$

onde

$$x' = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N P_{i,j} x^j y^i \quad (13)$$

$$y' = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N Q_{i,j} x^j y^i \quad (14)$$

e $P_{i,j}$ e $Q_{i,j}$ são coeficientes obtidos através do método dos mínimos quadrados utilizando como entrada as observações dos CPs e seus respectivos deslocamentos. N representa o grau do polinômio, em geral assumindo valores 1 ou 2. Como os pixels a serem buscados em f_2' serão indexados com

números fracionários, necessita-se interpolar os dados para um melhor registro com a imagem de referência, sendo a interpolação bilinear recomendável para preservar a fase.

2.6 Geração do interferograma

O interferograma é gerado pela multiplicação ponto a ponto da primeira imagem com o complexo conjugado da segunda imagem registrada. 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 o *aliasing* na multiplicação complexa. Como o equivalente da multiplicação no domínio do espaço é a convolução no domínio da frequência, o tamanho do espectro será dobrado após a multiplicação complexa do par de imagens (KETELAAR, 2009). A expansão do azimute acaba muitas vezes sendo desconsiderada, pois os efeitos das franjas em azimute são muito mais limitados (FERRETTI et al., 2007).

2.7 Descorrelação entre as imagens SAR interferométricas

Alterações no padrão de espalhamento geram mudanças na amplitude e fase do sinal de retorno. Um meio de verificar a ocorrência de mudanças é através da utilização do módulo do coeficiente de correlação complexo também conhecido como coerência interferométrica, definido por (TOUZI et al., 1999):

$$\gamma = \frac{E[u_1 u_2^*]}{\sqrt{E[|u_1|^2]} \sqrt{E[|u_2|^2]}} \quad |\gamma| \leq 1 \quad (15)$$

onde u_1 e u_2 formam o par registrado de imagens complexas, o asterisco é o complexo conjugado e $E[]$ é o valor esperado.

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

$$\gamma = \gamma_{\text{SNR}} \gamma_g \gamma_t \quad (16)$$

A descorrelação causada pela relação sinal ruído não pode ser tratada. A descorrelação temporal pode ser evitada utilizando um InSAR de uma passagem. A descorrelação geométrica é

causada pela mudança na geometria de aquisição, porém seus efeitos podem ser minimizados através de filtros espectrais.

2.8 Filtros espectrais

A diferença de ângulos de visada e de yaw entre as antenas gera um descasamento espectral, contribuindo para o descorrelacionamento do par interferométrico. Esta descorrelação geométrica, segundo Schwabisch e Geudtner (1995), é dada por:

$$|\gamma_g| = \left(1 - \frac{|\Delta f_r|}{W_R}\right) \left(1 - \frac{|\Delta f_D|}{W_A}\right) \quad (17)$$

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.

2.8.1 Filtragem espectral em alcance

A descorrelação geométrica em alcance é causada pelo deslocamento espectral das imagens. A Figura 4 apresenta uma interpretação geométrica deste efeito. Cada componente de frequência no solo é mapeada em uma frequência do sinal SAR de acordo com o seno do ângulo de incidência local, ou seja, o mesmo alvo no solo sofre uma variação de frequência Δf no espectro de frequência das imagens.

O Filtro Espectral em Alcance consiste em remover a parte do espectro não comum de ambas

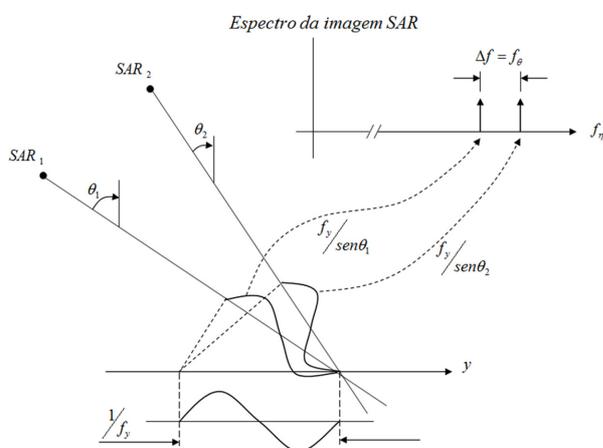


Fig. 4 - Interpretação geométrica do deslocamento espectral. Fonte: Adaptado de Bamler e Hartl (1998).

imagens, como ilustrado na Figura 5, reduzindo com isso a descorrelação geométrica.

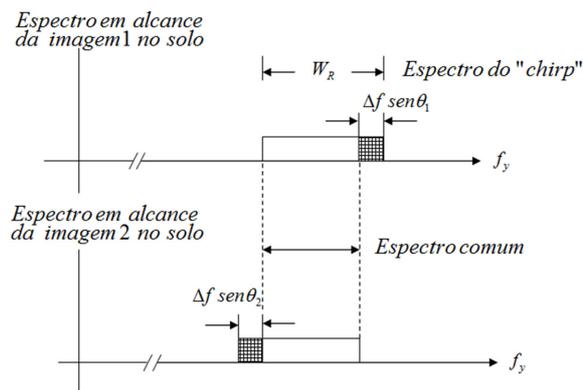


Fig. 5 - Espectro no solo do sinal SAR em alcance. Fonte: Adaptado de Bamler e Hartl (1998).

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

$$\Delta f_r = -\frac{f_0 B_n}{R \tan(\theta - \alpha)} \quad (18)$$

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.

O deslocamento de frequência Δf_r pode ser estimado através da frequência dominante das franjas do interferograma (GATELLI et al., 1994). Os filtros espectrais W_{f1} e W_{f2} podem ser então criados:

$$W_{f1} = W_{f2} = W_R - \Delta f_r \quad (19)$$

$$f_1 = \frac{\Delta f_r}{2} \quad (20)$$

$$f_2 = -\frac{\Delta f_r}{2} \quad (21)$$

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.

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 6, causando diferentes deslocamentos de frequência no espectro de potência do sinal na direção de azimute de cada imagem. Na Figura 6, $Rm_{1,2}$ são alcances médios, $\theta_{1,2}$ 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:

$$f_{DC} = \frac{2V_{st}}{\lambda} \text{sen}\theta_{sq} \quad (22)$$

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

$$\theta_{sq} = \arctg\left\{ \text{tg}(\psi) \frac{\sqrt{Rm^2 - H^2}}{Rm} \right\} \quad (23)$$

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

$$\Delta f_D = f_{DC1} - f_{DC2} \quad (24)$$

O Filtro Espectral em Azimute consiste em remover as partes não comuns do espectro de potência das duas imagens, de forma similar ao Filtro Espectral em Alcance. Segundo Tao et al. (2004), esta filtragem deve ser realizada após o registro grosseiro das imagens.

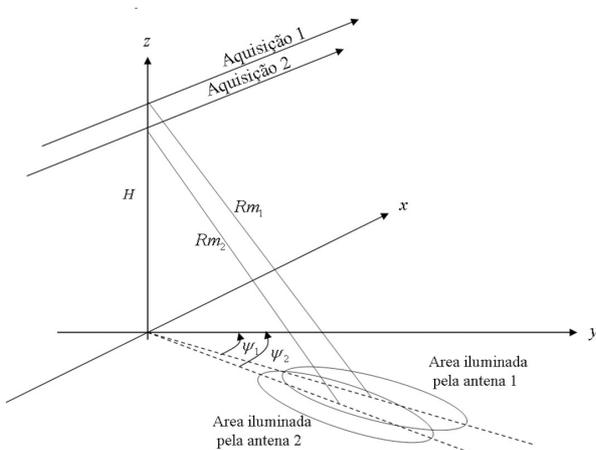


Fig. 6 - Geometria de aquisição com diferentes ângulos de “yaw”.

2.9 Resíduos

Goldstein et al. (1988) denominaram de resíduos os locais onde há descontinuidade da diferença de fase. A contagem destes resíduos pode ser utilizada como medida da qualidade do interferograma.

Considerando a fase interferométrica como sendo uma grade de pontos, define-se um operador $W\{ \}$, que coloca seu argumento na faixa de $-\delta$ a δ pela adição ou subtração de um número inteiro de 2δ . O método pressupõe que a diferença de fase entre pontos adjacentes de um interferograma deve ser menor ou igual a δ (critério de Nyquist). Pode-se então definir o gradiente de fase entre amostras como:

$$\Delta_{i,j}^x = W\{\phi_{(i+1,j)} - \phi_{(i,j)}\} \quad (25)$$

$$\Delta_{i,j}^y = W\{\phi_{(i,j+1)} - \phi_{(i,j)}\} \quad (26)$$

onde Δ_{ij}^x é o gradiente no sentido linha, Δ_{ij}^y é o gradiente no sentido coluna e i,j representam a posição na grade de pontos. O método dos resíduos baseia-se na localização de pontos de inconsistência de fase através da integração ao redor de um caminho fechado, em 4 pixels vizinhos, computando os gradientes de fase no sentido horário, conforme Figura 7.

Pode-se então definir τ como o resultado da integração dos gradientes no caminho fechado:

$$\tau = (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i,j+1}^x) + (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i+1,j}^y) \quad (27)$$

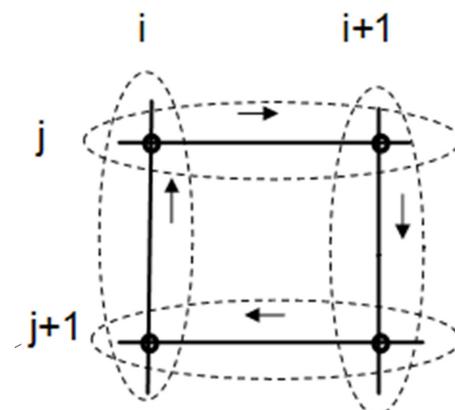


Fig. 7 - Caminho fechado do cálculo de resíduos.

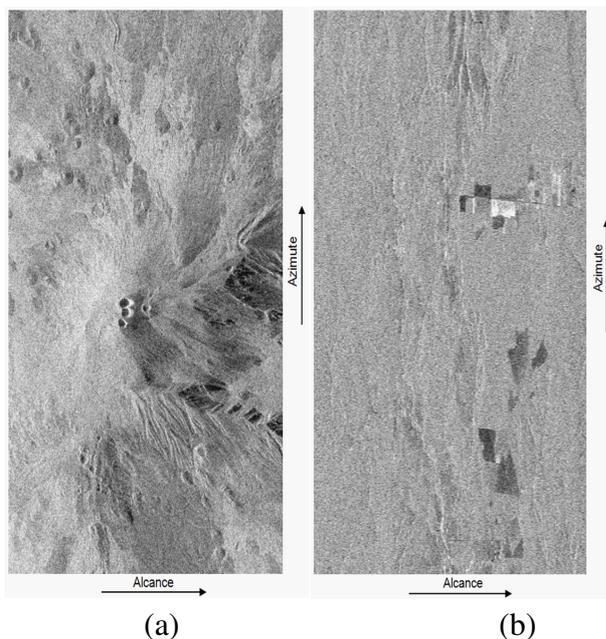


Fig. 8 - (a) Monte Etna, SIR-C, banda L e (b) Região do Tapajós, ALOS/PALSAR, banda L (HH).

Caso $\hat{\sigma} > \hat{\delta}$ há um resíduo positivo. Caso $\hat{\sigma} < \hat{\delta}$ o resíduo é negativo. Finalmente se $\hat{\sigma} = \hat{\delta}$ a fase é consistente. O número de resíduos é um indicador de qualidade da fase interferométrica, pois quanto maior este número mais ruidosa é a fase.

3. DESCRIÇÃO DO MATERIAL

Todos os dados de imagens utilizados estão no formato *Single Look Complex* (SLC) e foram obtidos com sensores orbitais. A Figura 8 exibe uma visualização da magnitude do conteúdo dos dados.

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 14,76m em alcance e 3,9m em azimute.

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

4. METODOLOGIA

A metodologia consistiu na 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

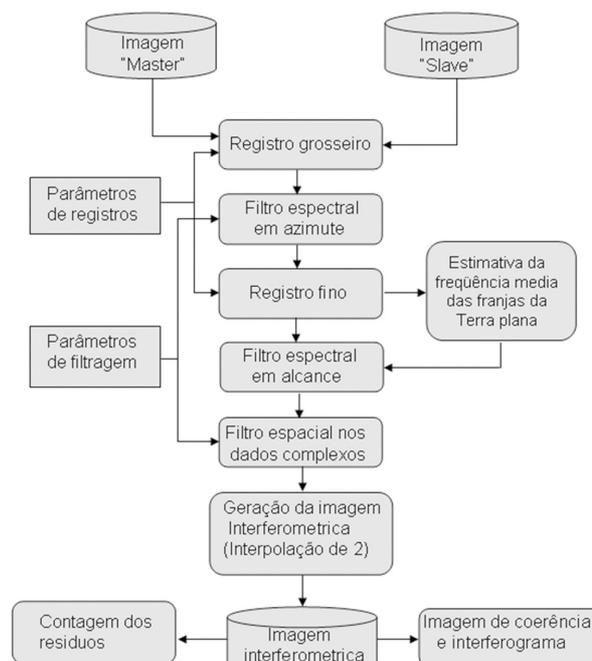


Fig. 9 - Fluxograma de processamento para registro automático de imagens interferométricas SAR.

fase interferométrica desdobrada. Os módulos implementados limitam-se à primeira etapa. A Figura 9 ilustra a seqüência dos módulos de processamento implementados e testados neste trabalho. Os algoritmos foram implementados em linguagem IDL, versão 6.3, no ambiente IDL/ENVI, versão 4.3, e Windows XP 32 bits.

Para a estimativa da imagem de coerência foi utilizada uma janela de 7x7 pixels e para a contagem de resíduos foram considerados apenas os resíduos positivos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os pares foram processados utilizando nove configurações distintas. Para a apresentação dos resultados nas tabelas foi utilizada a seguinte notação: $\langle \text{registro} \rangle \langle \text{grau} \rangle \langle \text{correlação} \rangle$.

O código $\langle \text{registro} \rangle$ refere-se ao tipo de registro, podendo ser Grosseiro ou Fino. Já o código $\langle \text{grau} \rangle$ refere-se ao grau do polinômio, sendo utilizado apenas quando o $\langle \text{registro} \rangle$ for Fino, podendo assumir o valor 1 ou 2. Por fim $\langle \text{correlação} \rangle$ 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, o código “Fino 2 GC” significa que foi utilizado o Registro Fino com polinômios de 2º grau e correlação de gradiente.

TABELA 1 - PARÂMETROS DO REGISTRO FINO

Parâmetros	SIR-C	ALOS
Fator de Ampliação	16	8
Número de janelas em X (alcance)	10	10
Número de janelas em Y (azimute)	10	6
Tamanho da janela (pixels) em X	32	64
Tamanho da janela (pixels) em Y	32	512
Distância da borda da imagem	32	32

TABELA 2 - AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DO ALGORITMO APLICADO AO PAR SIR-C

SIR-C	Sem filtros		Com filtros	
	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	0,6
Fino 2 PC	14858	0,41	13374	0,58
Fino 2 GC	12931	0,45	12562	0,61

TABELA 3 - AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DO ALGORITMO APLICADO AO PAR ALOS/PALSAR

PALSAR	filtros		filtros	
	Resíduos	Coerência	Resíduos	Coerência
Grossoiro C	46012	0,12	44305	0,13
Grossoiro PC	46012	0,12	44305	0,13
Grossoiro GC	46012	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

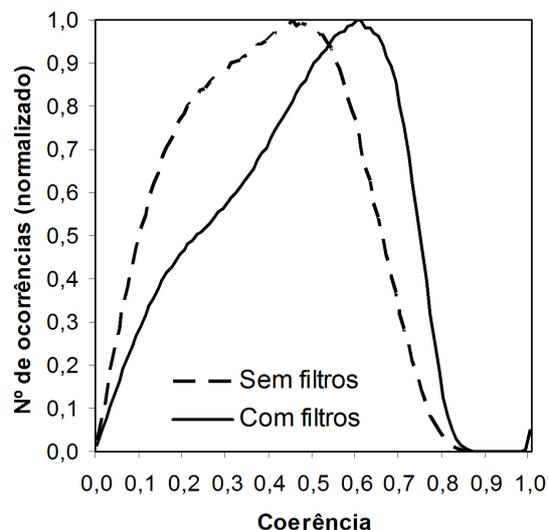


Fig. 10 - Histogramas com e sem filtros espectrais, SIR-C, execução Fino 1 GC.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados nas execuções envolvendo Registro Fino.

As Tabelas 2 e 3 apresentam, para cada execução de registro, a avaliação quantitativa através da contagem de resíduos positivos e do valor do

pico do histograma de coerência sem e com filtros espectrais.

A Tabela 2 contém os resultados do primeiro par referente às imagens SIR-C do Monte Etna. Como pode ser observado na tabela, o menor número de resíduos foi obtido com o Registro Fino de primeiro grau utilizando Correlação de Gradiente. A Figura 10 apresenta o histograma desta execução específica.

A Tabela 3 contém os resultados do segundo par, referente às imagens ALOS/PALSAR da região do Tapajós. Neste caso, o menor número de resíduos foi obtido com o Registro Fino de primeiro grau utilizando Correlação de Fase. A Figura 11 apresenta o histograma desta execução específica.

A Figura 12 apresenta as imagens do par SIRC (Fino 1 GC) de coerência sem (a) e com (b) filtros espectrais. Nota-se nas imagens de coerência a melhora significativa quando os filtros espectrais são utilizados. Apesar disso, esta melhora não ocorre na parte central à direita do pico da montanha,

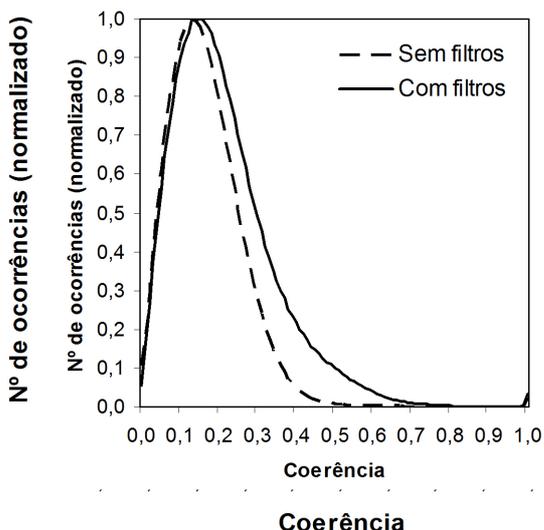


Fig. 11 - Histogramas com e sem filtros espectrais, ALOS/PALSAR, execução Fino 1 PC.

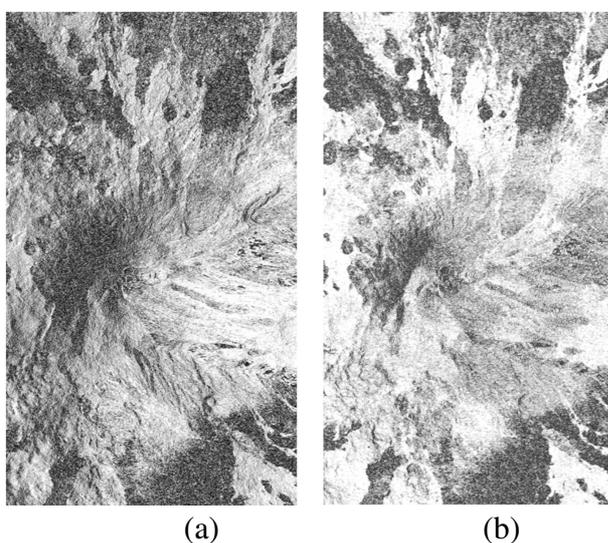


Fig. 12 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) filtros espectrais, SIR-C, Etna.

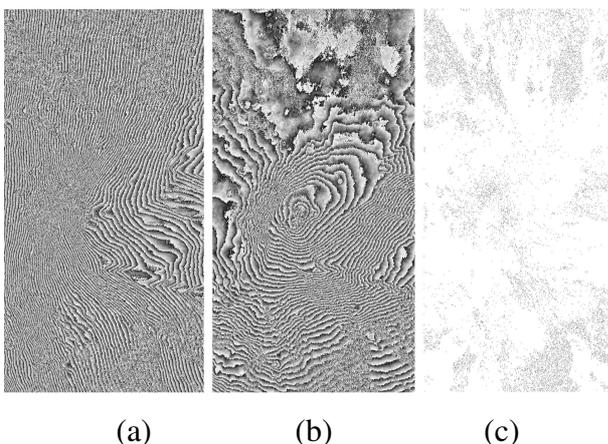


Fig. 13 - Fase interferométrica com (a) e sem a fase da Terra plana (b) e a imagem de resíduos (c).

como pode ser observado na região indicada com setas, que se tornou 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 13(a). O filtro espectral em alcance implementado detecta, no entanto, a frequência máxima das franjas devido à superfície da Terra plana. Isto equivale apenas a uma rampa constante (ângulo α , Equação 18). Para evitar este efeito, deve-se utilizar um filtro espectral adaptativo em alcance, não utilizado no escopo deste trabalho (GATELLI, 1994). A Figura 13 apresenta também a fase interferométrica sem Terra plana (b) e a imagem da contagem de resíduos (c).

O par ALOS/PALSAR, devido às suas características de baixa correlação (áreas de floresta), precisou ser registrado com janelas de maior tamanho, como pode ser observado na Tabela 1.

A Figura 14 apresenta um trecho da fase interferométrica gerada com a componente de fase da Terra plana. Nota-se que poucas regiões apresentam franjas, notavelmente as regiões desmatadas que possuem um grau de coerência interferométrica maior. Sendo a região em questão bastante plana, a densidade das franjas pode ser



Fig. 14 - Trecho da fase interferométrica com Terra plana ilustrando a grande densidade das franjas.

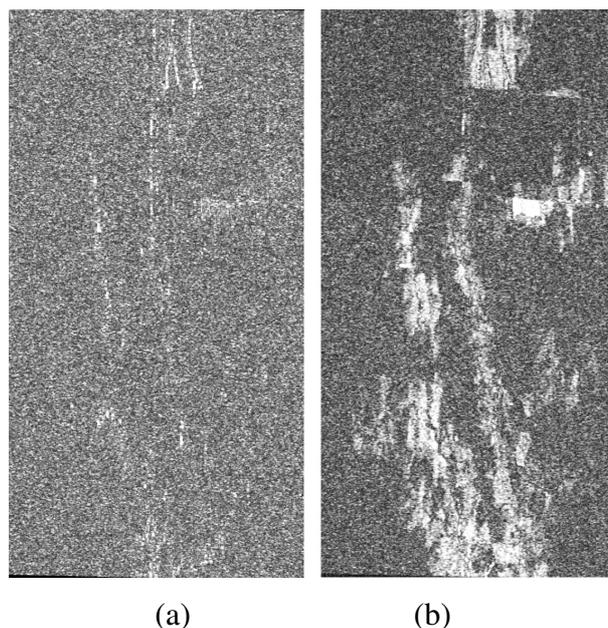


Fig. 15 - Imagem de coerência sem (a) e com (b) filtros espectrais, ALOS/PALSAR.

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, incidência essa além do normal da região para a época. Isso certamente alterou as propriedades dielétricas dos refletores acentuando a descorrelação temporal.

6. CONCLUSÕES

Através dos experimentos realizados pode-se concluir que o registro automático de imagens interferométricas SAR implementado neste trabalho mostrou-se robusto, conseguindo 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 à sua simplicidade, 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 15.

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 cara computacionalmente e uma boa candidata para paralelização de execução, pois cada janela pode ser processada de forma independente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F.; 2000. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2202-2212.

FERRETTI, A.; MONTI-GUARNIERI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. **InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation**. ESA Publications, 2007. 246 p.

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*. Springer Science, 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. **Proceedings of the IEEE 1975 Conf. Cybernetics and Society**, pp.163-165, 1975.
- 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. **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.
- 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.
- 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.
- 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.