

## Registro automático de imagens SAR interferométricas

Roberto Neves Salles<sup>1,2</sup>  
José Claudio Mura<sup>2</sup>  
Leila Maria Garcia Fonseca<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA  
Rod. dos Tamoios, km 5,5 - 12228-001 - São José dos Campos - SP, Brasil  
salles@ieav.cta.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{mura, leila}@dpi.inpe.br

**Abstract.** This paper explores an automatic registration procedure for use on single-look complex InSAR image pairs. The procedure is divided on two distinct parts. First a coarse registration is done using the phase correlation technique. The coarse registration is a global registration method that calculates the vertical and horizontal shifts on a pixel scale. The calculated translation is applied on the second image without need of interpolation. The new pair is then processed with the fine registration. At this point a grid of small window pairs is equally distributed through the images. Each pair is zero-padded to avoid circular convolution issues and is transformed using Fourier transform. Subpixel resolution is achieved zero-padding the frequency by a given factor before applying the same phase correlation technique, now as a local registration method. Control points are defined as the center of each pair of windows processed and are saved on a list with calculated subpixel shifts. At the end a polynomial transformation is calculated based on least squares using the list of control points and subpixel shifts. Finally the second image is interpolated. This procedure was implemented on IDL/ENVI and tested on two data sets, X-Band R99 and L-Band SIR-C. Results show that it is possible to automatically produce better interferograms as the number of residues is reduced.

**Palavras-chave:** remote sensing, interferometry, sensoriamento remoto, interferometria, registro subpixel, FFT.

### 1. Introdução

A interferometria de radar para mapeamento topográfico foi pela primeira vez apresentada por Graham (1974). A técnica consiste em utilizar duas antenas de radar, separadas por uma distância, chamada *baseline*, para medir a fase de um alvo em solo. Quando as duas antenas estão instaladas na mesma plataforma, caracteriza-se um Radar de Abertura Sintética Interferométrico (InSAR) de uma passagem. Uma plataforma com uma única antena também pode ser utilizada para a interferometria. Neste caso caracteriza-se o InSAR de duas passagens onde a *baseline* é simulada através de rotas idealmente paralelas. Por fim existe a operação chamada *Tandem*, onde as antenas estão instaladas em plataformas distintas, porém se comportam como um InSAR de uma passagem. A diferença de fase medida entre as aquisições da primeira antena e da segunda antena variam de acordo com a altura do alvo iluminado. Li e Goldstein (1990) mostram que a fase é uma medida proporcional ao comprimento de onda, tornando as medições do InSAR muito precisas e sensíveis à topografia. Atualmente, além do mapeamento topográfico, a interferometria é aplicada em análises multitemporais de deformações e subsidência do solo, este último caso explorado com precisão de centímetros por Wu et al. (2008).

Segundo Lin et al. (1992), para se conseguir um padrão de interferência ou interferograma é necessário o registro com precisão subpixel. A diferença de fase possui a informação de elevação, porém apenas em módulo  $2\pi$ . Para a obtenção de modelos digitais de elevação a diferença de fase precisa ser desdobrada e este processo afeta de maneira crítica a qualidade final do produto. Um registro com precisão subpixel reduz a quantidade de resíduos do interferograma, facilitando o desdobramento e, conseqüentemente, melhorando a qualidade do modelo digital de elevação final.

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 computadores de alto custo e desempenho insuficiente por uma de baixo custo interligada em rede. Apesar de concluído com sucesso, o sistema não contempla a geração de modelo digital de elevação utilizando um par de imagens complexas do InSAR. O sistema de processamento interferométrico atualmente disponível para o radar da aeronave R-99 também tem uma arquitetura de alto custo e baixo desempenho. O sistema foi avaliado por Zaloti (2008) e os resultados mostraram que ele requer muita intervenção de operadores os resultados são limitados.

Para a solução tanto do problema da automação quanto da qualidade dos interferogramas produzidos, este trabalho propõe um método automático de registro de pares de imagens complexas interferométricas baseado em área. O sucesso deste trabalho permitirá, futuramente, a produção de modelos digitais de elevação com dados capturados pela aeronave R-99. Estes poderão ser utilizados, dentre outras aplicações, para o preenchimento do vazio cartográfico amazônico que está sendo conduzido pela Casa Civil da Presidência da República.

## 2. Metodologia de Trabalho

O método proposto divide o problema de registro automático de imagens interferométricas em duas etapas denominadas Registro Grosseiro e Registro Fino. Cabe ao Registro Grosseiro registrar o par de imagens interferométricas com precisão de um pixel. O Registro Fino é um refinamento aplicado após o Registro Grosseiro buscando precisão subpixel. Deve-se ter em mente 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. Por este motivo decidiu-se por adotar neste trabalho um método baseado em área denominado correlação de fase para ambas as etapas.

### 2.1 Correlação de Fase

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

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) . \quad (1)$$

Ao aplicar a transformada de Fourier em ambos os lados da Equação 1, suas correspondentes transformadas de Fourier  $F_1$  e  $F_2$  estarão relacionadas da seguinte maneira:

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

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

$$\frac{F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)}{|F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)|} = e^{j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} . \quad (3)$$

O teorema do deslocamento da transformada de Fourier (*Fourier shift theorem*) 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 acima, 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 que é necessário para registrar as imagens em relação à translação.

Ou seja, enquanto a correlação cruzada pode ser definida para encontrar o valor máximo da sequência

$$\text{DFT}^{-1}(F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)) , \quad (4)$$

a correlação de fase consiste em encontrar o máximo de

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

onde  $\text{DFT}^{-1}$  representa a transformada discreta inversa de Fourier.

## 2.2 Registro Grosseiro

O Registro Grosseiro é a primeira etapa do método proposto. Trata-se de um procedimento global, isto é, utiliza a magnitude das duas imagens complexas do par interferométrico como sinais de entrada para o método de correlação de fase. Ao final são obtidos os deslocamentos não fracionários necessários para ajustar o par de imagens. A Figura 1 ilustra o procedimento.

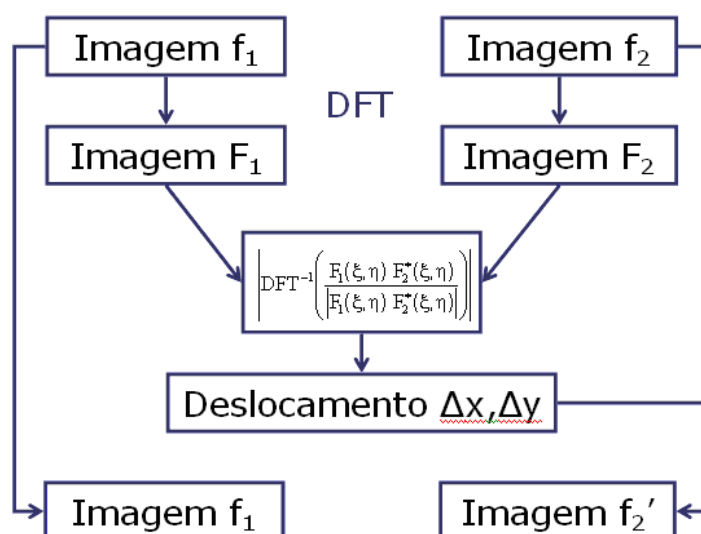


Figura 1. Algoritmo de Registro Grosseiro sendo aplicado em duas imagens  $f_1$  e  $f_2$ .

Como pode ser observado na Figura 1, após a aplicação da correlação de fase, a imagem  $f_2$  é corrigida com os deslocamentos não fracionários obtidos,  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , 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  $f_2$ :

$$\begin{aligned} x' &= x + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \end{aligned} \quad (6)$$

Como pode ser observado na Equação 6, nenhuma interpolação ocorre. As coordenadas  $x$  e  $y$  de um pixel na imagem  $f_2$  são acrescidos dos valores de translação inteiros  $\Delta x$  e  $\Delta y$  e as coordenadas resultantes  $x'$  e  $y'$  de  $f_2'$  coincidem com a grade de pontos da imagem  $f_2$ .

## 2.3 Registro Fino

O Registro Fino é a segunda etapa do método proposto. Embora seja um método de registro baseado em área, diferentemente do Registro Grosseiro, ele não é global. O Registro Fino também utiliza a correlação de fase para cálculo de deslocamentos, porém o faz em pequenas janelas distribuídas ao longo do par de imagens já registrado grosseiramente. Cada par de pequenas janelas é expandido por um fator  $N$ , permitindo atingir resolução  $1/N$  pixel, ou seja, calcula diversos deslocamentos locais com resolução subpixel. Estes deslocamentos são associados aos Pontos de Controle (PC) definidos como a posição central do par de janelas. Por fim, uma transformação polinomial é aplicada e os coeficientes são obtidos usando os PC e seus respectivos deslocamentos subpixel. A Figura 2 ilustra o algoritmo de forma esquemática enquanto as subseções seguintes detalham seu funcionamento.

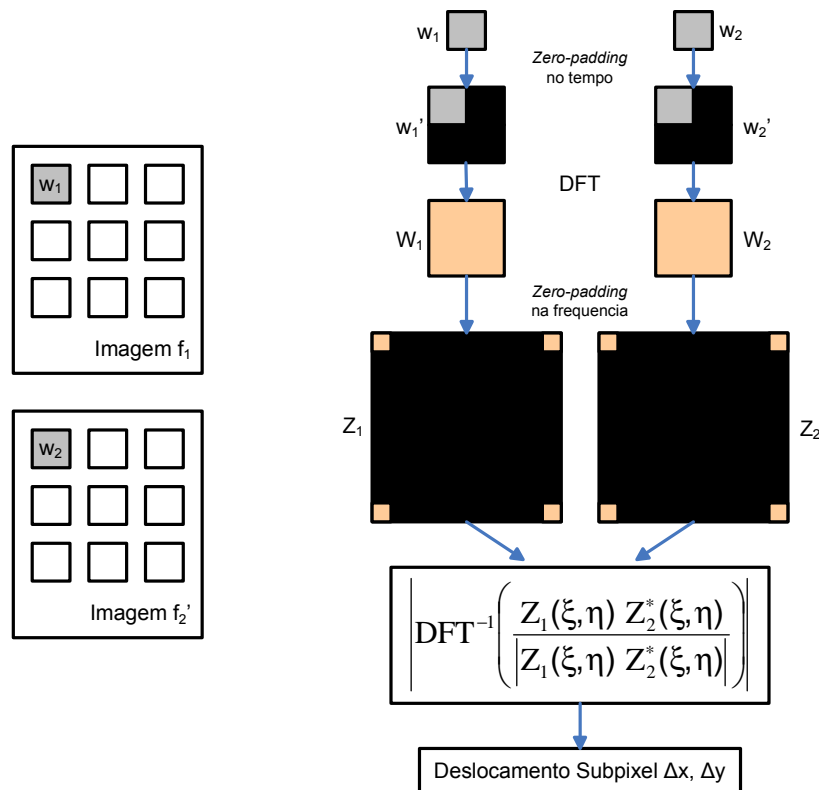


Figura 2. Algoritmo de Registro Fino sendo aplicado em duas imagens  $f_1$  e  $f_2'$ .

Alguns parâmetros são necessários para o Registro Fino. 1) tamanho da janela,  $w_1$  e  $w_2$ , 2) distância da borda, 3) número de janelas no eixo x e no eixo y, que pode variar, 4) fator de expansão, cujo valor igual a 10 detecta até 0.1 pixel de deslocamento, e 5) grau do polinômio utilizado na transformação, sendo recomendado primeiro ou segundo grau.

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

### 2.3.1 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, que também é parâmetro da operação. A Figura 2 ilustra este primeiro passo com a disposição de 9 janelas, 3x3, no par de imagens.

### 2.3.2 Zero-padding no tempo e aplicação da DFT

Como as janelas tendem a ser pequenas, em torno de 32x32 pixels, o efeito da convolução circular afeta a busca de um ajuste subpixel causando casamentos incorretos. Para tanto, aplica-se o preenchimento com zeros (*zero-padding*) para contornar os problemas mencionados anteriormente. Este passo é ilustrado na Figura 2 como a transição de  $w_1$  e  $w_2$  para  $w_1'$  e  $w_2'$ . Isso dobra o tamanho das janelas, porém tende a evitar 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.

### 2.3.3 Zero-padding na frequência e aplicação da correlação de fase

O próximo passo é o *zero-padding* no domínio da frequência. Esta operação equivale a fazer uma interpolação *sinc* no domínio do tempo, como demonstrado em Lyons (2010). Depois disso, aplica-se o fator de expansão, que é parâmetro predefinido, na forma de zeros no domínio da frequência. A Figura 2 ilustra o procedimento ao gerar  $Z_1$  e  $Z_2$ . 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 a correlação de fase utilizando seus respectivos dados. Isso também está ilustrado na Figura 2. Ao final são obtidos deslocamentos não fracionários  $\Delta x$  e  $\Delta y$  de maneira idêntica ao Registro Grosseiro. Basta dividir estes deslocamentos obtidos pelo fator de expansão empregado anteriormente para obter os deslocamentos subpixel na escala original.

Este passo se repete para cada par de janelas do *grid* disposto nas imagens originalmente. Ao final de cada iteração obtém-se um Ponto de Controle (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 PC e seus respectivos deslocamentos são armazenados numa lista para a próxima etapa do algoritmo.

### 2.3.4 Transformação polinomial

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

$$f_2''(x, y) = f_2'(x', y') \quad (7)$$

onde

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

$$y' = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N Q_{i,j} x^i y^j \quad (8)$$

e  $P_{i,j}$  e  $Q_{i,j}$  são coeficientes obtidos através do método dos mínimos quadrados utilizando como entrada as observações dos PC e seus respectivos deslocamentos.  $N$  representa o grau desejado do polinômio. Como os pixels a serem buscados em  $f_2'$  provavelmente serão indexados com números fracionários, é necessário utilizar uma interpolação, como por exemplo, bilinear.

## 3. Resultados e Discussão

O algoritmo proposto foi implementado no ambiente de programação ENVI/IDL. Apenas imagens complexas de mesmo tamanho foram utilizadas.

Após o Registro Grosseiro, a translação de  $f_2$  faz com que pixels fiquem fora dos limites da imagem  $f_1$ . Neste caso, esses pixels são eliminados e, na região de dados não existentes, insere-se zeros. Essa solução permite continuar com duas imagens de mesmas dimensões após o Registro Grosseiro.

Para teste do algoritmo proposto utilizou-se um par SLC capturado pelo InSAR do R-99, banda X, na região de Campinas, de dimensões 5316x1000 pixels e outro par SLC do sensor SIR-C, banda L, na região do Monte Etna, de dimensões 1024x4096. Os parâmetros necessários selecionados para a execução do algoritmo foram: 1) janelas de 32x32 pixels; 2) 32 pixels de borda em toda a imagem; 3) um número de 20x20 janelas; 4) fator de expansão 10; 5) polinômio de grau 1 a 3.

A Tabela 1 exhibe a contagem de resíduos do interferograma após o Registro Grosseiro (apenas) e após o Registro Fino utilizando polinômios de grau 1 a 3. Goldstein et al. (1988)

denominaram de resíduos os locais onde há descontinuidade da diferença de fase, impedindo uma única solução de desdobramento, isto é, gerando ambiguidade. Resíduos são, portanto, utilizados como parâmetro da qualidade de um interferograma. A redução do número de resíduos no interferograma indica que o Registro Fino melhorou a qualidade do registro final.

Tabela 1. Resíduos após aplicação dos Registros Grosseiro e Fino.

R99	Resíduos				SIR-C	Resíduos			
	Positivos	Negativos				Positivos	Negativos		
<b>Grosseiro</b>	181573	181593	100%	100%	<b>Grosseiro</b>	423054	407000	100%	100%
<b>Fino 1</b>	145893	145206	80%	80%	<b>Fino 1</b>	390937	374357	92%	92%
<b>Fino 1*</b>	145893	145206	80%	80%	<b>Fino 1*</b>	398896	382344	94%	94%
<b>Fino 2</b>	148140	147460	82%	81%	<b>Fino 2</b>	390219	373813	92%	92%
<b>Fino 2*</b>	148140	147460	82%	81%	<b>Fino 2*</b>	670781	446909	159%	110%
<b>Fino 3</b>	145677	144993	80%	80%	<b>Fino 3</b>	390875	374620	92%	92%

O sinal de asterisco (\*) destaca que, na execução, foram utilizados apenas os coeficientes dos pares de janelas com coerência maior que 0,3. Pode-se observar que, no caso da imagem do sensor SIR-C, houve uma considerável piora na contagem de resíduos após a aplicação do Registro Fino de segundo grau utilizando-se apenas janelas de coerência 0,3 ou maior. Isso ocorreu porque os locais de maior coerência estavam concentrados numa mesma região. É possível notar que a coerência não pode ser o único critério para a seleção dos PC que serão utilizados na transformação polinomial. Mais ainda, que o aumento do grau do polinômio não implica melhora no registro final. Ao contrário, polinômios de primeiro grau podem ser suficientes para o registro fino de pares de imagens SLC interferométricas.

A Figura 3 exibe o par de imagens do R-99 com os interferogramas após Registro Grosseiro e Registro Fino.

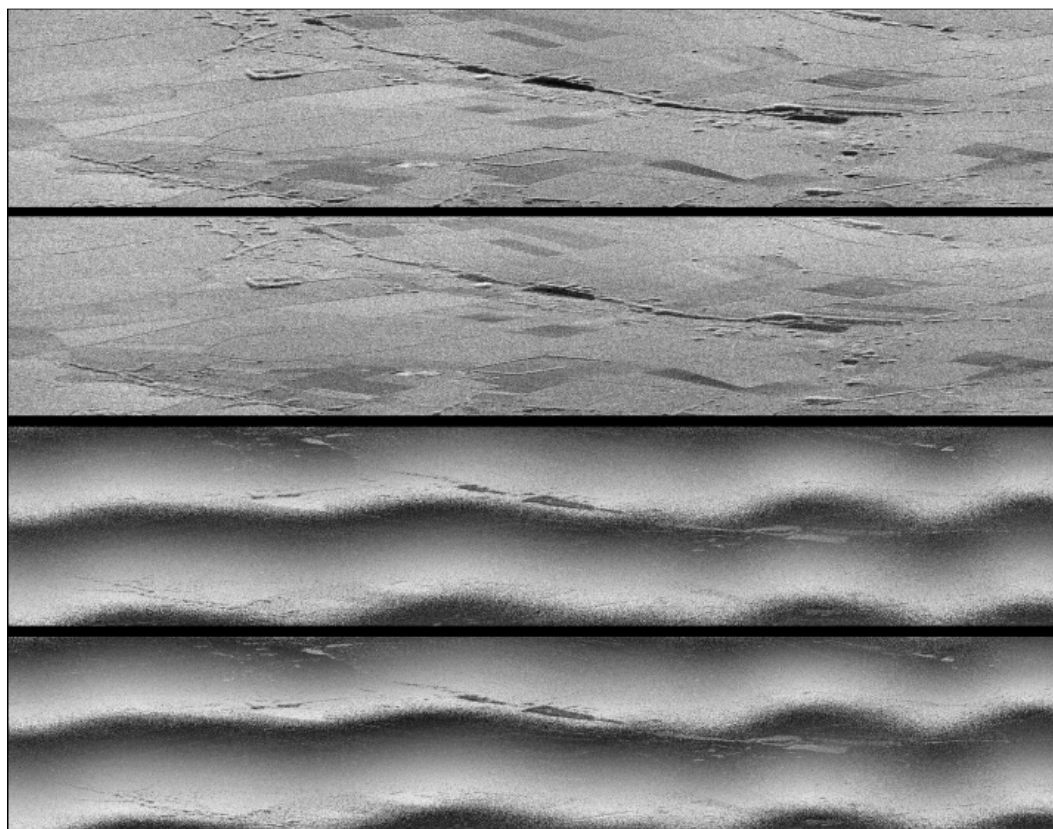


Figura 3. Par de imagens SLC do R-99 e o interferograma após registro grosseiro e fino.

#### 4. Conclusões

Este experimento demonstra que é possível melhorar a qualidade do registro de maneira automática. A abordagem de registro utilizando FFT também permite explorar, futuramente, soluções de execução paralela. O Registro Fino é o mais forte candidato pois os cálculos dos deslocamentos dos pequenos pares de janelas podem ter suas execuções paralelizadas utilizando processadores das placas gráficas para o cálculo da FFT.

Vale também ressaltar que tanto o procedimento de Registro Grosseiro como o de Registro Fino podem ser incrementados para detectar rotação e escala automaticamente conforme Reddy e Chatterji (1996) demonstram, utilizando o sistema de coordenadas log-polar e mais algumas operações com a transformada de Fourier.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem o Cap. Marcus Monteiro pelos esclarecimentos quanto à aeronave R99 e também pelas oportunas sugestões.

#### Referências Bibliográficas

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.

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.

Lyons, R.G. How to Interpolate in the Time-Domain by Zero-Padding in the Frequency Domain. Disponível em: <<http://www.dspguru.com/book/export/html/49>>. Acesso em 01.nov.2010.

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.

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.

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.