

Fundamentos do processamento interferométrico de dados de radar de abertura sintética

Leticia Nalin Alves¹

Maurício Galo²

Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo²

Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP

¹ Mestranda do PPGCC – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

² Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305, Jd. das Rosas, CEP 19060-900

leticianalin@yahoo.com.br, {galo, mlourdes}@fct.unesp.br

Abstract - The aim of this paper is to present a review covering the basic principles of Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) technique in the production of Digital Surface Models (DSM). By using the synthetic aperture radar imagery it is possible to generate digital surface models and produce deformation maps based on the interferometric technique. The estimation of the topography surface, done by this technique is based on heights computation through phase difference between correspondent pixels in two interferometric SAR images. Thus, the development of this paper consists of one review of the literature related to this subject, where basic interferometric equations are developed and the steps of InSAR technique are shown, besides presenting a solution based on the functional relationships between the values of phase difference (observations) and the values of height of the surface (parameters). The DSM product is important in different applications areas, as: Cartography, Remote Sensing, Photogrammetry, Geodesy, and other areas of the Geosciences.

Palavras-chave: synthetic aperture radar interferometry, digital surface model, interferometria por radar de abertura sintética, modelo digital de superfície.

1 - Introdução

A interferometria por radar de abertura sintética (InSAR) é uma síntese da técnica SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e da técnica de interferometria. Segundo Henderson et al. (1998), essa técnica é uma alternativa às técnicas convencionais fotogramétricas para geração de mapas topográficos com alta resolução, tendo como vantagem o fato de utilizar dados obtidos por radar de abertura sintética, que possuem a capacidade de operação durante dia e noite, e também sobre qualquer condição climática. O radar é um sensor ativo que emite pulsos na região das microondas do espectro eletromagnético, essa faixa por sua vez é subdividida em bandas segundo o comprimento de onda, onde os comprimentos de onda mais longos possuem maior capacidade de penetração na vegetação do que os comprimentos de onda mais curtos.

A técnica InSAR é utilizada para medir a superfície topográfica e suas mudanças no tempo. Por explorar a fase do sinal coerente, a interferometria permite explorar os aspectos quantitativos e, portanto, ligado à geometria do relevo, além da usual abordagem interpretativa, com aplicação em diversas áreas, como: Cartografia, Geodésia e Sensoriamento Remoto (ROSEN et. al , 2000). Em Geodésia a técnica de interferometria é aplicada nos posicionamentos por GNSS (*Global Navigation Satellite System*), e também é utilizada pela tecnologia VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), que por sua vez é usada para determinar a escala do sistema ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*).

Essa técnica é baseada na análise de fase dos sinais de radar recebidos por duas antenas SAR localizadas em posições diferentes no espaço, ou por uma mesma antena em época e posição diferentes. A partir desses sinais podem ser geradas imagens de amplitude e fase, armazenadas como imagens complexas. Essas imagens formarão o par interferométrico, e utilizando a técnica InSAR pode-se gerar uma nova imagem, cuja fase de cada pixel (fase interferométrica) é formada pela diferença de fase entre os pixels correspondentes nas duas imagens originais.

A partir do conhecimento da geometria de aquisição das imagens e da utilização da técnica InSAR é possível converter a diferença de fase obtida em altitude. A informação de altitude associada às medidas feitas diretamente na imagem para cada ponto, nas direções de alcance e azimute, permite a reconstrução tridimensional do terreno. Dessa forma, um Modelo Digital de Superfície (MDS) pode ser gerado através da interferometria por radar de abertura sintética.

De maneira geral, a interferometria por radar de abertura sintética é classificada em 2 tipos (LILLESAND et al., 2004):

- ✓ Interferometria com repetição de passagem: utiliza sistemas SAR com apenas uma antena e adquire imagens com uma defasagem temporal. Tem sido utilizada em diversos trabalhos que utilizam dados de sistemas SAR orbitais. Como exemplos desses trabalhos pode-se citar: o trabalho desenvolvido por Nievinski e Souza (2005) e Rebelo (2007), dentre outros.
- ✓ Interferometria de passagem única: utiliza sistemas SAR com duas antenas receptoras. Assim, o par interferométrico é obtido ao mesmo tempo. O trabalho mais divulgado desenvolvido utilizando esse tipo de interferometria SAR foi à missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) ocorrida em 2000 que obteve dados de elevação em uma escala quase global e gerou o mais completo banco de dados topográfico de alta resolução da Terra.

2 - Equacionamento interferométrico básico

Para obter a informação de altitude, através da interferometria por radar de abertura sintética, é necessário o conhecimento da geometria de aquisição das imagens SAR. A Figura 1 mostra a configuração geométrica básica para a técnica InSAR. Nesta figura S_1 e S_2 são respectivamente, antena 1 e antena 2 quando utilizada a técnica InSAR de passagem única, ou na técnica InSAR com repetição de passagem onde, S_1 e S_2 representam a mesma antena que coleta as imagens com defasagem temporal, α é o ângulo de inclinação entre S_1 e S_2 (em relação ao horizonte de S_1), B é a linha de base, H é a altura do sensor S_1 , θ é o ângulo de incidência da antena S_1 em relação a um ponto sobre a superfície terrestre e θ^0 é o ângulo de incidência da antena S_1 em relação a superfície de referência.

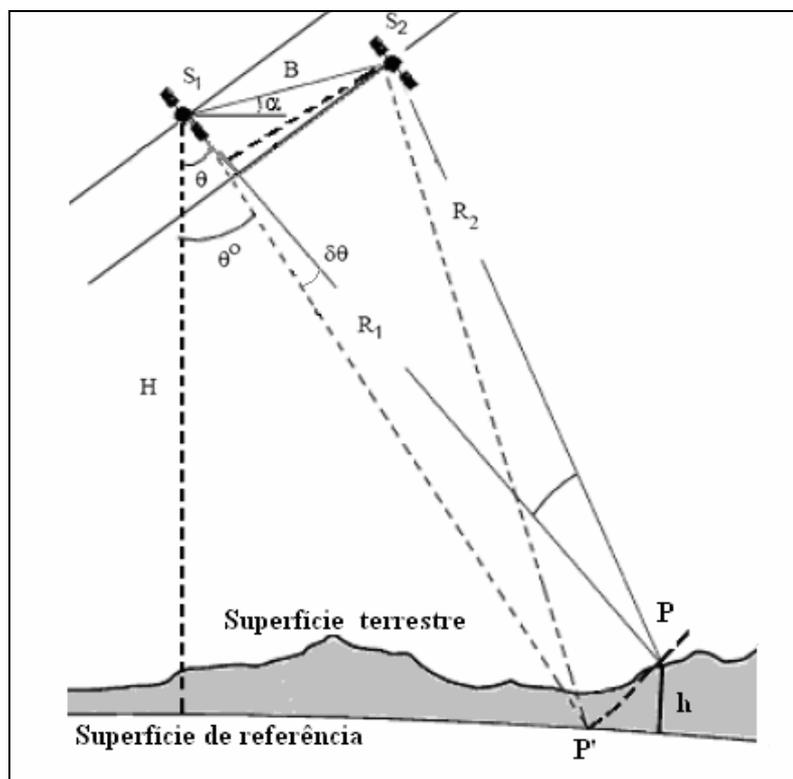


Figura 1 – Geometria do processo interferométrico.
Fonte: Rebelo (2007).

As imagens SAR apresentam valores complexos que podem ser decompostos em componentes de fase (Φ) e amplitude (ρ), de acordo com as Equações 1 e 2, que mostram os valores complexos referentes ao sensor 1 e 2, y_1 e y_2 , respectivamente.

$$y_1 = \rho_1 \cdot e^{i\phi} \quad (1)$$

$$y_2 = \rho_2 \cdot e^{i\phi} \quad (2)$$

Segundo Hanssen (2001), a imagem interferométrica (interferograma) é então gerada pela multiplicação de pixels homólogos das imagens SAR, de acordo com a Equação 3:

$$I = y_1 y_2^* = \rho_1 \rho_2 \cdot e^{i(\Delta\phi)} \quad (3)$$

onde, $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ e corresponde à diferença de fase. Os valores de fase observados, ϕ_1 e ϕ_2 , nas duas imagens e para um dado pixel são dados pelas Equações 4 e 5:

$$\phi_1 = \frac{4\pi R_1}{\lambda} + \psi_1 \quad (4)$$

$$\phi_2 = \frac{4\pi R_2}{\lambda} + \psi_2 \quad (5)$$

onde, R_1 e R_2 são as distâncias entre sensor e alvo, e ψ_1 e ψ_2 são as resultantes da interação das microondas com os alvos. Mantendo as mesmas características nas aquisições das imagens consegue-se uma elevada coerência, o que produz praticamente o mesmo retro-espalhamento para os dois sinais observados. Segundo Rebelo (2007), a coerência permite medir a correlação existente entre pixels homólogos das duas imagens SAR, sendo o valor da coerência no intervalo 0 a 1. Os valores próximos a zero indicam baixa coerência e valores próximos de 1 indicam alta coerência entre as imagens. Dessa forma, existindo alta coerência entre as imagens, pode-se considerar que ψ_1 e ψ_2 sejam iguais e a diferença de fase, segundo Mikhail et al. (2001), pode ser escrita pela diferença das Equações 4 e 5 resultando:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi(R_1 - R_2)}{\lambda} = -\frac{4\pi\Delta R}{\lambda}, \quad (6)$$

sendo, a sua derivada dada pela Equação 7:

$$\delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \delta\Delta R. \quad (7)$$

Através da geometria apresentada na Figura 1, ΔR pode ser definido como mostra a Equação 8:

$$\Delta R = B \sin(\theta^0 - \alpha). \quad (8)$$

Entretanto, segundo Hanssen (2001) as informações sobre as órbitas da plataforma não são acuradas e, além disso, existem ambigüidades na fase, o que faz com que os valores de diferença de fase estejam no intervalo de 0 a 2π , e então, não seja possível derivar ΔR diretamente em função da geometria. Porém, a relação entre mudanças de ΔR e ângulo de visada θ podem ser encontradas através da Equação 9:

$$\delta\Delta R = B \cos(\theta^0 - \alpha) \delta\theta. \quad (9)$$

A partir da combinação das Equações 7 e 9 é possível obter a relação entre a mudança de fase ($\delta\phi$) e a mudança no ângulo de visada ($\delta\theta$), ou seja:

$$\delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta^0 - \alpha) \delta\theta. \quad (10)$$

Tomando como base a geometria da interferometria por radar de abertura sintética, apresentada na Figura 1, a altitude H do satélite em relação à superfície de referencia é expressa pela Equação 11:

$$H = R_1 \cos \theta^0 \quad (11)$$

A derivada da Equação 11 em relação a θ^0 fornece a taxa de variação da altitude do satélite, ou seja, a altura (h) de um pixel específico na imagem interferométrica (Equação 12).

$$\delta H = h = -R_1 \sin \theta^0 \delta \theta \quad (12)$$

Utilizando as Equações 10 e 12 obtêm-se a relação entre altura de um ponto sobre a superfície de referencia e a diferença de fase (Equação 13):

$$\delta \theta = -\frac{\delta \phi \cdot \lambda}{4\pi B \cos(\theta^0 - \alpha)} \quad (13)$$

Substituindo $\delta \theta$ na Equação 12 obtêm-se a Equação 14, que fornece a relação entre a altitude de um ponto sobre a superfície terrestre e a diferença de fase absoluta obtida a partir de um par de imagens SAR:

$$h = -\frac{\lambda R_1 \sin \theta^0}{4\pi B \cos(\theta^0 - \alpha)} \delta \phi. \quad (14)$$

3 - Solução da InSAR pelo método das equações de observação

As equações mostradas na seção anterior mostram como é possível relacionar a altitude de um ponto sobre a superfície terrestre e a diferença de fase absoluta obtida a partir da técnica InSAR. Assim, tem-se um vetor de observações, composto pelas fases interferométricas absolutas φ e um vetor de parâmetros, composto das altitudes dos pontos sobre a superfície. A estimativa dos parâmetros incógnitos pode ser feita baseada no Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). O ajustamento de observações nesse caso é feito utilizando o método das equações de observação.

Segundo Hanssen (2001), a relação entre as observações e os parâmetros desconhecidos, após a linearização, pode ser escrita conforme a Equação 15:

$$\varphi = Ax + \varepsilon, \quad (15)$$

onde φ são as observações, A é matriz de coeficientes, x é o vetor dos parâmetros e ε os erros referentes as observações.

O vetor de observações será composto pelas fases interferométricas absolutas φ obtidas após o processamento de *phase unwrapping* e da extração da fase de referência. Para a estimação da topografia, o parâmetro principal é altura topográfica. Dessa forma, o modelo funcional pode ser escrito da forma como mostra a Equação 16:

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & & & \\ & A_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & A_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_m \end{bmatrix}, \quad (16)$$

onde, A_k é a parte da matriz de coeficientes correspondente a observação k , definida pela Equação 17:

$$A_k = \left[-\frac{4\pi B_{\perp,k}}{\lambda R_k \sin \theta_k} \right] \quad (17)$$

e, x_k é o vetor dos parâmetros correspondentes a observação k , dado pela Equação 18:

$$x_k = [h_k] \quad (18)$$

4 - Descrição dos processamentos InSAR para geração de mapas de elevação

Segundo Mura (2001), o primeiro passo no processo é o co-registro das imagens para que seja possível a realização do processamento interferométrico de imagens SAR. Após o registro das imagens é calculado o interferograma. O interferograma formado, como dito anteriormente, apresenta padrões do tipo franjas, devido ao caráter cíclico da fase, módulo de 2π . A Figura 2 mostra o exemplo de um interferograma, onde se pode verificar o padrão do tipo franjas.

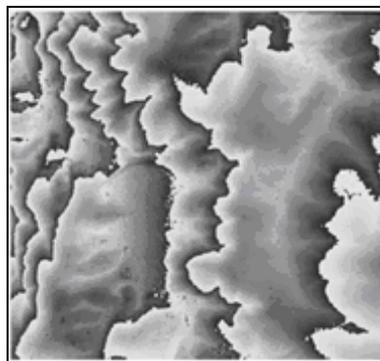


Figura 2 – Interferograma.
Fonte: Mura (2001).

O próximo passo é o cálculo da coerência complexa entre as imagens SAR, que segundo Rebelo (2007) pode ser usada para medir a correlação existente entre as duas imagens SAR e para avaliar a qualidade do interferograma gerado.

Depois de obtida a fase interferométrica, é necessário empregar um procedimento para remover a componente da diferença de fase devido ao modelo elipsoidal da Terra. Isso é feito subtraindo dos valores de fase interferométrica absoluta os valores de fase de referência \mathcal{G} , dada pela Equação 19 (Hanssen, 2001):

$$\mathcal{G} = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta^0 - \alpha). \quad (19)$$

A fase interferométrica gerada através do cálculo do interferograma é ambígua. Dessa forma, segundo Namikawa et al. (2003), deve-se fazer a transformação da fase relativa, representada no interferograma, para a fase absoluta, para que possa ser feita a geração do MDS. A transformação de fase interferométrica relativa, módulo de 2π , para fase interferométrica absoluta é feita através do processamento conhecido como desdobramento da fase (*phase unwrapping*). A Figura 3 ilustra essa etapa do processamento interferométrico onde é feito o desdobramento da fase.

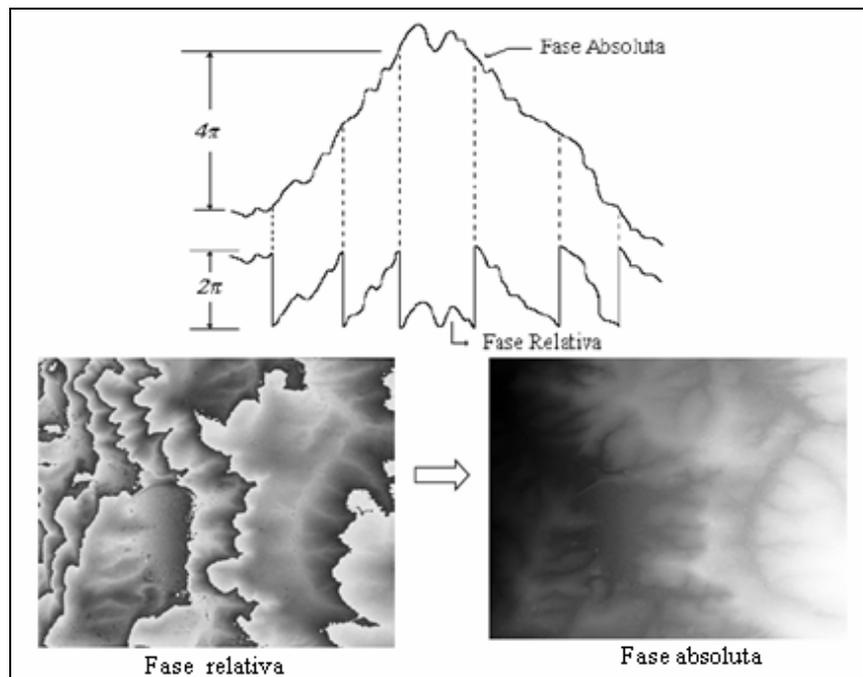


Figura 3 – Processamento *phase unwrapping*.

Fonte: Mura (2001).

A partir do conhecimento dos vetores estado dos satélites e da fase interferométrica absoluta, é possível geocodificar os pixels dessa imagem, no qual são determinadas as coordenadas geodésicas dos pixels. Posteriormente, é possível gerar um MDS aplicando uma projeção cartográfica a todos os pontos determinados e interpolando o valor de elevação para uma grade regular. Um MDS é ilustrado na Figura 4.

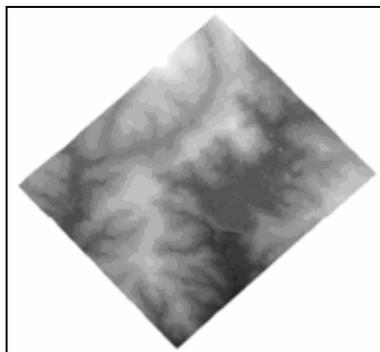


Figura 4 – Modelo Digital de Superfície gerado pela técnica InSAR.

Fonte: Mura (2001).

5 - Conclusão

Diante da revisão apresentada neste trabalho pode ser observado que utilizando produtos SAR, mais especificamente um par de imagens, juntamente com a técnica de interferometria é possível extrair informação tridimensional sobre o terreno imageado, gerando um MDS. Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo apresentar os conceitos fundamentais da técnica de interferometria por radar de abertura sintética, explorando principalmente o equacionamento interferométrico básico, para que se possa ter uma idéia geral da técnica e melhor analisar os resultados a serem obtidos em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos para apoiar a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

Hanssen F. R.. **Radar Interferometry**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p.

Henderson, F. M.; Lewis, J.; Ryerson, R. A.; (Ed.). **Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of imaging Radar**, vol. 2, 03 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998.

Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W.; Chipman, J. W.. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 2004. 763 p.

Mikhail, J. S. B., McGlone, J.C, Bethel, J. S. **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York: John Wiley & Sons, 2001. 479 p.

Mura, J. C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: Sistema Geo-InSAR**. 2000. 159 p. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos., 2001.

Namikawa, L. M.; Felgueiras, C. A.; Mura, J. C.; Rosim, S.; Lopes, E. S. S. **Modelagem Numérica de Terreno e Aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003. 158 p.

Nievinski, F. G.; Souza, S. F. Demonstração de processamento interferométrico de imagens de Radar de abertura sintética, utilizando programas e dados disponíveis gratuitamente. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 4429 - 4436.

Rebelo, C. R.. **Aplicação do InSAR na geração de modelos digitais do terreno**. 2007. 213 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geográfica e Geoinformática, Departamento de Matemática, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2007.

Rosen, P. A.; Hensley, S.; Joughin, I. R.; Li, F. K.; Madsen, S. N.; Rodriguez, E.; Goldstein, R. M. Synthetic aperture Radar interferometry. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, n. 3, p. 333-382, 2000.