

# Otimização da coerência de imagens SAR interferométricas e polarimétricas na banda P em áreas de floresta.

José Claudio Mura

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
mura@dpi.inpe.br

Abstract. The interferometric phase quality can be improved by using of the coherency optimization technique. In this work two techniques are used to improve the coherence and phase quality. The results, using polarimetric and interferometric P band data of the Tapajos National Forest, are shown.

**Palavras-chave:** interferometria, otimização, coerência, polinsar, processamento de imagens de radar.

## 1 – Introdução.

Interferometria de imagens SAR é baseada na combinação de duas imagens, no formato complexo, adquiridas a partir de dois ângulos de aquisição ligeiramente diferentes, para gerar um interferograma. O interferograma representa a fase interferométrica e através desta é possível gerar o modelo de elevação do terreno. A polarimetria de imagens SAR trata com a natureza vetorial das ondas eletromagnéticas para deduzir as propriedades eletromagnéticas dos alvos imageados. Combinando interferometria e polarimetria é possível maximizar a coerência interferométrica, que dá o grau de correlação complexa entre as duas imagens, e por consequência a melhoria da fase interferométrica, visando a geração de modelos de elevação mais precisos. Neste trabalho, utilizou-se dois métodos de otimização da coerência, o primeiro, descrito por Cloude e Papathanassiou (1998), utiliza dois vetores de projeção para representar o retroespalhamento do sinal dos alvos, o segundo, proposto por Colin at all (2003), utiliza apenas um vetor de projeção. Estes métodos foram implementados e testados utilizando-se dados polarimétricos e interferométricos da banda P, adquiridos na Floresta Nacional de Tapajós em 2000. Devido à capacidade de penetração do sinal de microondas através da vegetação, a banda P possibilita não somente a aquisição da fase interferométrica praticamente ao nível do solo, mas também parâmetros que descrevem a estrutura da floresta, Brandfass at all (2001). No item 2 são apresentadas as bases da interferometria polarimétrica, no item 3 são apresentados os dois métodos utilizados, no item 4 os resultados obtidos e no item 5 os comentários e conclusões.

## 2- Interferometria polarimétrica.

Nas imagens de radar de sistemas que operam nas quatro polarizações, cada célula de resolução pode ser representada por uma matriz 2x2 de dados complexos, chamada de matriz de retroespalhamento, representada por:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Para generalizar a expressão para fase e coerência interferométrica e polarimétrica, utiliza-se o traço da matriz resultante entre o produto da matriz de retroespalhamento  $[S]$  pela

matriz de Pauli  $\Psi_p$ , Cloude e Pottier(1998). Pela restrição imposta pelo teorema da reciprocidade, a matriz de retroespalhamento deve ser simétrica, ou seja,  $S_{HV} = S_{VH}$ , assim o vetor de retroespalhamento resultante é dado pela seguinte equação:

$$k = \frac{1}{2} \text{Trace}([S]\Psi_p) = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}] \quad (2.2)$$

A vantagem de se utilizar a matriz de Pauli deve-se ao fato de que os elementos resultantes do vetor de retroespalhamento, estão proximamente relacionados com a física das ondas eletromagnéticas sobre os alvos, permitindo uma melhor interpretação dos mecanismos do retroespalhamento, segundo Cloude e Pottier(1995).

Dado que a interferometria trabalha com um par de imagens, as propriedades polarimétrica dos vetores de retroespalhamento das duas imagens podem ser representadas na forma de matrizes de coerência Hermitianas,  $[T_{11}]$  e  $[T_{22}]$ , enquanto que a informação polarimétrica e interferométrica podem ser descritas como uma matriz de coerência não Hermitiana,  $[\Omega_{12}]$ , dadas por:

$$[T_{11}] = \langle k_1 k_1^{*T} \rangle, \quad [T_{22}] = \langle k_2 k_2^{*T} \rangle, \quad [\Omega_{12}] = \langle k_1 k_2^{*T} \rangle \quad (2.3)$$

onde  $^{*T}$  indica o complexo conjugado e a operação de transposição. O operador  $\langle \rangle$  indica a média espacial dos pixels.

Para estender a formulação escalar de interferometria de imagens simples, para uma formulação para imagens polarimétrica, ou seja, uma formulação vetorial, introduziu-se dois vetores complexos normalizados,  $\omega_1$  e  $\omega_2$ , que podem ser interpretados como mecanismos de retroespalhamento. Definiram-se dois coeficientes de retroespalhamento  $\mu_1$  e  $\mu_2$  como a projeção dos vetores de retroespalhamento  $k_1$  e  $k_2$ , das duas imagens polarimétrica e interferométricas, sobre os vetores  $\omega_1$  e  $\omega_2$ , representados por:

$$\mu_1 = \omega_1^{*T} k_1 \quad \text{e} \quad \mu_2 = \omega_2^{*T} k_2 \quad (2.4)$$

As funções escalares  $\mu_1$  e  $\mu_2$  são combinações lineares dos elementos das matrizes de retroespalhamento  $[S_1]$  e  $[S_2]$ , e elas formam a base para a geração vetorial dos interferogramas. Combinando as equações 2.3 e 2.4, chega-se na formulação vetorial generalizada da interferometria polarimetria SAR:

$$\mu_1 \mu_2^* = (\omega_1^{*T} k_1) (\omega_2^{*T} k_2)^{*T} = \omega_1^{*T} [\Omega_{12}] \omega_2 \quad (2.5)$$

A fase e a coerência interferométrica são dadas respectivamente por:

$$\Phi = \arg(\omega_1^{*T} [\Omega_{12}] \omega_2) \quad (2.6)$$

$$\gamma = \frac{\left| \langle \omega_1^{*T} [\Omega_{12}] \omega_2 \rangle \right|}{\sqrt{\langle \omega_1^{*T} [T_{11}] \omega_1 \rangle \langle \omega_2^{*T} [T_{22}] \omega_2 \rangle}} \quad (2.7)$$

### 3- Otimização da coerência

#### 3.1 – Otimização com dois vetores de projeção

A otimização da coerência implica na seleção dos mecanismos de retroespalhamento,  $\omega_1$  e  $\omega_2$ , que maximiza a coerência interferométrica definida na equação 2.7. Para se obter a coerência otimizada a partir da equação 2.7, o primeiro método utilizado, Cloude e Papathanassiou (1998), maximiza a função de Lagrange L, Bedford et al (1998), definida por:

$$L = \omega_1^{*T} [\Omega_{12}] \omega_2 + \lambda_1 (\omega_1^{*T} [T_{11}] \omega_1 - C_1) + \lambda_2 (\omega_2^{*T} [T_{22}] \omega_2 - C_2) \quad (3.1)$$

onde  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os multiplicadores de Lagrange e  $C_1$  e  $C_2$  são constantes arbitrárias.

Este problema é equivalente a encontrar os autovalores da matriz de dados complexos, para os vetores  $\omega_1$  e  $\omega_2$ , das seguintes equações, Papathanassiou (1999):

$$[T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} \omega_1 = \lambda \omega_1 \quad (3.2)$$

$$[T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] \omega_2 = \lambda \omega_2 \quad (3.3)$$

Estas duas equações trabalham com matrizes 3x3 de dados complexos e possuem autovalores comuns. Os autovalores máximos encontrados estão relacionados com a coerência máxima, dada por:

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\lambda_{\max}} \quad (3.4)$$

Os autovetores correspondentes aos autovalores máximos encontrados, correspondem aos mecanismos de retroespalhamento ótimos, denotados por  $\omega_{1opt}$  e  $\omega_{2opt}$ . A coerência obtida através destes mecanismos é chamada de primeira coerência otimizada, os outros dois autovalores fornecem a coerência otimizada de segunda e terceira ordem.

O interferograma de mais alta coerência é obtido pela projeção dos vetores de retroespalhamento sobre os vetores otimizados:

$$\mu_{1opt} \mu_{2opt}^* = (\omega_{1opt}^{*T} k_1) (\omega_{2opt}^{*T} k_2)^{*T} = \omega_{1opt}^{*T} [\Omega_{12}] \omega_{2opt} \quad (3.5)$$

A fase interferométrica otimizada é representada por:

$$\Phi_{opt} = \arg(\omega_{1opt}^{*T} [\Omega_{12}] \omega_{2opt}) \quad (3.6)$$

Como os as fases absolutas dos autovetores não são únicas, mas admite uma fase arbitrária, deve-se adicionar uma condição para que a diferença de fase entre os autovetores  $\omega_{1opt}$  e  $\omega_{2opt}$ , correspondente ao mesmo mecanismo de retroespalhamento, seja única. Esta condição é satisfeita quando a diferença de fase entre os autovetores é nula, ou seja,

$$\arg\{\omega_1^{*T} \omega_2\} = 0. \quad (3.7)$$

### 3.2 – Otimização com um vetor de projeção

Um dos pontos negativos quando se utiliza dois vetores de projeção, é que a fase interferométrica otimizada não é contínua de um pixel para outro pixel adjacente. O principal problema é que a diferença de fase entre as projeções vetoriais não é fixada pelo algoritmo, e esta diferença é primordial para a estimativa da elevação do terreno.

Baseado na suposição de que as imagens interferométricas foram adquiridas com uma diferença de ângulo de incidência muito pequenas, Colin et al( 2003) propuseram um novo método utilizando apenas um vetor de projeção, baseado na suposição de que fisicamente os pixels de mesma posição, nas imagens interferométricas e polarimétrica, podem ser caracterizados pelo mesmo mecanismo de retroespalhamento.

Desta maneira o interferograma gerado quando se utiliza somente um vetor de projeção é dado por,

$$\mu_1 \mu_2^* = \left( \omega^{*T} k_1 \right) \left( \omega^{*T} k_2 \right)^{*T} = \omega^{*T} [\Omega_{12}] \omega \quad (3.8)$$

e a fase e a coerência interferométrica respectivamente por:

$$\Phi = \arg(\omega^{*T} [\Omega_{12}] \omega) \quad (3.9)$$

$$\gamma = \frac{\left| \left\langle \omega^{*T} [\Omega_{12}] \omega \right\rangle \right|}{\sqrt{\left\langle \omega^{*T} [T_{11}] \omega \right\rangle \left\langle \omega^{*T} [T_{22}] \omega \right\rangle}} \quad (3.10)$$

Para se obter a coerência máxima a partir da equação 3.10, Colin et al( 2003) propuseram achar o extremo da função 3.10, que é o método mais geral de otimização, ao invés de utilizar o método de Lagrange, que maximiza o numerador fixando o denominador. Este problema é equivalente a encontrar os autovalores da matriz de dados complexos, para o vetor  $\omega$ , da seguinte equação:

$$\left( [T_{11}] + [T_{22}] \right)^{-1} \left( [\Omega_{12}] + [\Omega_{12}^{*T}] \right) \omega = |\gamma| \omega \quad (3.11)$$

Os autovalores obtidos da equação 3.11 são reais, uma vez que a matriz  $\left( [T_{11}] + [T_{22}] \right)^{-1} \left( [\Omega_{12}] + [\Omega_{12}^{*T}] \right)$  é Hermitiana e os autovetores ortogonais. Assim é possível fazer a mesma interpretação física para a projeção de vetores como proposto por Cloude e Papathanassiou (1998). Neste caso, o interferograma de mais alta coerência é obtido pela projeção dos vetores de retroespalhamento sobre o vetor otimizado, dado por,

$$\mu_{1opt} \mu_{2opt}^* = \left( \omega_{opt}^{*T} k_1 \right) \left( \omega_{opt}^{*T} k_2 \right)^{*T} = \omega_{opt}^{*T} [\Omega_{12}] \omega_{opt} \quad (3.12)$$

e a fase interferométrica otimizada por,

$$\Phi_{opt} = \arg(\omega_{opt}^{*T} [\Omega_{12}] \omega_{opt}) \quad (3.13)$$

#### 4 – Resultados

Nos experimentos realizados para a avaliação dos métodos de otimização da coerência, foram utilizadas imagens obtidas com sensor AeS1, na banda P, sobre a Floresta Nacional de Tapajós. A Figura 4.1 ilustra a imagem utilizada nos testes, bem como as coerências dos canais polarimétricos.



Combinação em cores das polarizações HH, VV e HV



Imagem de coerência da polarização HH



Imagem de coerência da polarização VV



Imagem de coerência da polarização HV

Fig. 4.1 – Imagem polarimétrica e as imagens de coerências entre as várias polarizações

A Figura 4.2 ilustra os histogramas das imagens de coerência sem otimização e após a otimização utilizando os métodos descritos nos itens 3.1 e 3.2.

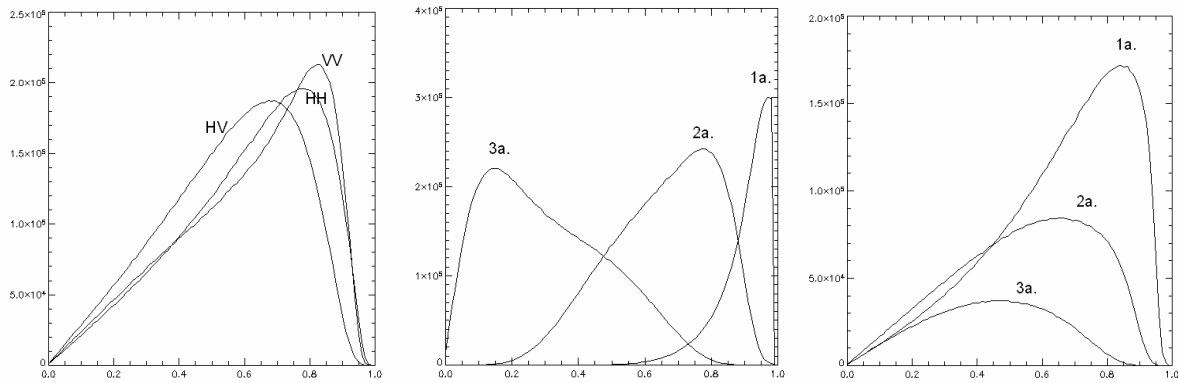


Figura 4.2 – Histograma das imagens de coerência, não otimizadas, esquerda, otimizada com dois vetores de projeção, centro, e otimizada com um vetor de projeção, direita.

A qualidade da fase interferométrica foi analisada utilizando-se o método dos resíduos, Goldstein et al (1988), que identifica e localiza as regiões onde existe inconsistência na fase interferométrica, provocada por ruído térmico, decorrelação volumétrica e temporal entre as duas imagens utilizadas na geração do interferograma.

A Figura 4.3 ilustra as imagens de fase e de resíduo correspondente. No lado esquerdo da Figura 4.3 tem-se a fase interferométrica obtida com a polarização HH e os resíduos correspondentes, do lado direito tem-se a fase obtida através do método de projeção de um vetor, descrito no item 3.2. Nota-se certa melhoria na fase otimizada, ou seja, com menos pontos de inconsistência de fase.

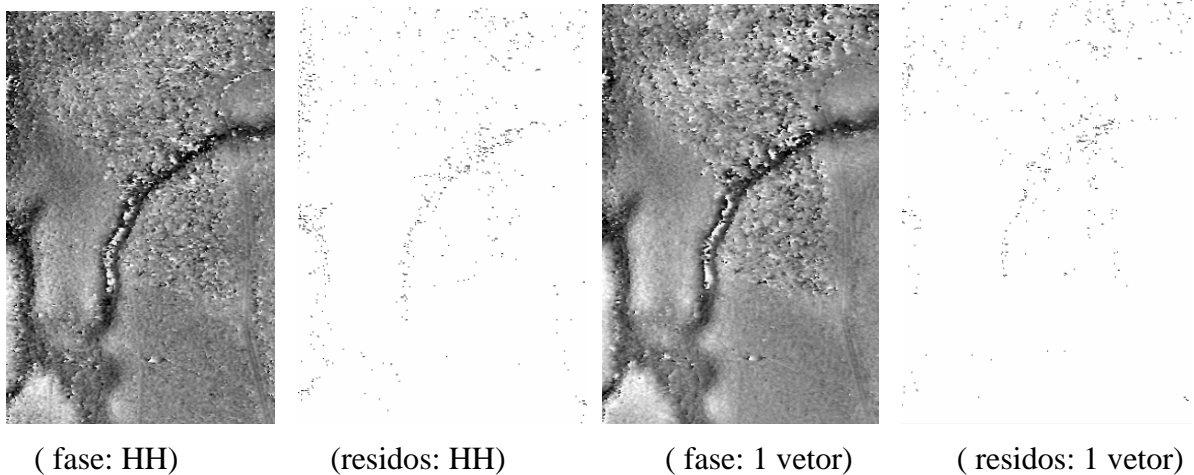


Figura 4.3 – Imagens de fase e de resíduos

A fase obtida utilizando-se o método dos dois vetores de projeção, descritas no item 3.1, ficou ruidosa devido à descontinuidade da fase de pixel para pixel, provocada pela variação da fase entre os dois vetores de projeção. Não foi realizada a avaliação no interferograma obtido através do método dos dois vetores de projeção, devido a má qualidade do interferograma.

## 5 – Conclusões

Os resultados obtidos através da otimização da coerência mostraram certa melhoria na qualidade da fase interferométrica, quando se utilizou o método descrito no item 3.2, ou seja, o de um vetor de projeção, como ilustrado na Figura 4.3. No caso do método que utiliza dois vetores de projeção, a fase não se mostrou adequada, mas a coerência interferométrica obtida por este método mostrou-se melhor, como pode ser visto na Figura 4.2. A coerência obtida através do método do item 3.1, pode ser utilizada como uma informação adicional para a extração de parâmetros que descrevem a estrutura de floresta, e também na classificação de imagens devido a separação entre as coerências de primeira, segunda e terceira ordem. Outros algoritmos que se mostrarem potencialmente importantes, como é o caso da decomposição de Camerom, Alberga et al(2004), serão implementados e testados utilizando-se dados na banda P em áreas de floresta, visando a melhoria da qualidade da fase interferométrica de também na extração de parâmetros de floresta.

## Referências

- Alberga Vito, Comparison of polarimetric methods in image classification and SAR interferometry applications, **Institut fur Hochfrequenztechnik und Radarsysteme - DLR** - Germany, phd thesis, 2004
- Bedford, F. W., Dwivedi, T. D., **Vector Calculus**, New York, MacGraw-Hill, p. 528, 1970.
- Brandfass, M; Hofmann, C.; Mura, J. C.; Moreira, J.; Papathanassiou, K. P., Parameter Estimation of Rain Forest Vegetation via Polarimetric Radar Interferometric Data, **8th. International Symposium on Remote Sensing, SPIE**, Toulouse, September 2001.
- Cloude, Robert S.; Pottier, E., Concept of polarization entropy in optical scattering. **Optical Eng.**, v. 34, n. 6, p. 1599-1610, Mar. 1995
- Cloude, Robert S.; Pottier, E., A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, p. 498-518, Mar. 1996.
- Cloude, Robert S.; Papathanassiou, Konstantinos P., Polarimetric SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1551-1565, Sept. 1998.
- Colin, Elise; Schnaider, Cécile T.; Tabbara, Walid, Investigation on different interferometric coherence optimization methods, **POLinSAR 03 Proceedings**, 2003.
- Goldstein, R. M.; Zebker, H.; Werner, C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. **Radio Science**, v. 23, n. 4, p. 713-720, Aug.. 1988.
- Papathanassiou, Konstantinos P., Polarimetric SAR Interferometry. **Institut fur Hochfrequenztechnik und Radarsysteme - DLR** - Germany, phd thesis, 1999