



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/09.14.13.48-NTC

**DETERMINAÇÃO DO *OFFSET* DE FASE EM  
IMAGENS INTERFEROMÉTRICAS USANDO LINHAS  
BASE NÃO COLINEARES**

Leonardo Sant'Anna Bins

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3CKQSU2>>

INPE  
São José dos Campos  
2012

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

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

**Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/09.14.13.48-NTC

**DETERMINAÇÃO DO *OFFSET* DE FASE EM  
IMAGENS INTERFEROMÉTRICAS USANDO LINHAS  
BASE NÃO COLINEARES**

Leonardo Sant'Anna Bins

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3CKQSU2>>

INPE  
São José dos Campos  
2012



## **RESUMO**

Este relatório visa apresentar uma nova técnica em interferometria por radar para determinação do “offset” em imagens de interferométricas de abertura sintética usadas na geração do modelo digital de elevação (MDE). Esta técnica utiliza otimização não linear para a determinação do “offset” de fase através da minimização da diferença das elevações de duas ou mais imagens interferométricas obtidas com linhas base não colineares. O método proposto dispensa o uso de refletores de canto. Resultados obtidos com radar aerotransportado ORBISAR-1 são apresentados e validados através de refletores de canto instalados nas áreas de estudo.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 MÉTODO PROPOSTO .....	4
3 RESULTADOS .....	7
4 CONCLUSÃO .....	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	11

## 1 INTRODUÇÃO

A interferometria por radar de abertura sintética (InSAR) consiste na aquisição de duas imagens complexas da mesma cena com pelo menos uma diferença nos parâmetros de aquisição (trajetória, tempo de aquisição e/ou comprimento de onda). No trabalho, a da trajetória é o parâmetro que distingue as duas aquisições. As aquisições podem ser realizadas através de duas passagens sobre o terreno ou uma passagem única usando-se duas antenas ou mais antenas. O objetivo da interferometria InSAR é a reconstrução da topografia do terreno imageado a partir da diferença de fase interferométrica entre as duas antenas. A Figura 1.1 apresenta um esquema para uma geometria de aquisição em visada lateral para duas antenas.

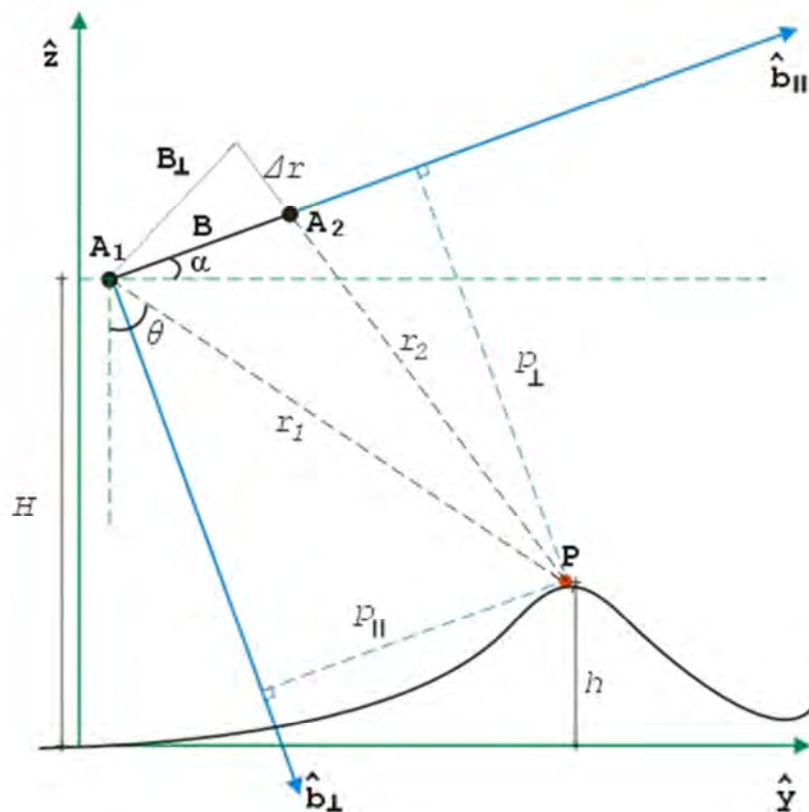


Figura 1.1 – Geometria de aquisição em visada lateral para duas antenas.

As relações envolvendo as variáveis apresentadas na Figura 1.1 estão explicitas nas equações abaixo e supõem a frente de onda plana:

$$\phi_{abs} = \frac{2\pi k \Delta r}{\lambda} \quad (1.1)$$

$$\phi = \phi_{abs} \bmod 2\pi \quad (1.2)$$

$$\Delta r = r_1 - r_2 \quad (1.3)$$

$$h = H - r_1 \cos(\theta) \quad (1.4)$$

$$B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha) \quad (1.5)$$

$$p_{\perp}^2 = r_1^2 - p_{\parallel}^2 \quad (1.6)$$

$$p_{\perp}^2 = r_2^2 - (p_{\parallel} - B)^2 \quad (1.7)$$

$$p_{\parallel}^2 = \frac{r_1^2 - r_2^2 + B^2}{2B} \quad (1.8)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}_1 + p_{\parallel} \hat{\mathbf{b}}_{\parallel} + p_{\perp} \hat{\mathbf{b}}_{\perp} \quad (1.9)$$

A linha base,  $\mathbf{B}$ , é o vetor diferença entre as trajetórias das duas antenas,  $\mathbf{A}_1$  (mestre) e  $\mathbf{A}_2$  (escrava). As distancias das antenas  $\mathbf{A}_1$  e  $\mathbf{A}_2$  até o alvo  $\mathbf{P}$  são dadas por  $r_1$  e  $r_2$ , respectivamente.  $\theta$  é o angulo de elevação em relação à antena mestre e  $\alpha$  é a inclinação da linha base  $\mathbf{B}$ .  $H$  é a altura de voo da antena



mestre e  $h$  a elevação do alvo  $\mathbf{P}$ . As posições de  $\mathbf{A}_1$ ,  $\mathbf{A}_2$  e  $\mathbf{P}$  são dadas em coordenadas WGS84. Os sinais recebidos pelas antenas  $\mathbf{A}_1$  e  $\mathbf{A}_2$  possuem uma diferença de fase, conhecida como fase interferométrica absoluta,  $\phi_{abs}$ , dada pela equação para geocodificação inversa (Equação 1.1) onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da portadora. O parâmetro  $k$  na equação 1.1 pode assumir valor 1 ou 2, dependendo se o dado foi adquirido em passagem única ou múltiplas passagens, respectivamente. A diferença entre as distancias das antenas ao alvo  $\mathbf{P}$  é dada por  $\Delta r$  (Equação 1.3). A Equação 1.9 expressa a geocodificação direta.

Devido à natureza cíclica da fase, a imagem interferométrica contém apenas o módulo  $2\pi$  da fase interferométrica absoluta,  $\phi_{abs}$ . Este módulo  $2\pi$  da fase é simplesmente chamado de fase interferométrica,  $\phi$ . Para que a fase interferométrica possa ser usada para geração do MDE, a fase interferométrica absoluta deve ser recuperada através de algoritmos de desdobramento de fase (WU,1999; EINEDER,2005).

É comum as imagens interferométricas apresentarem um “offset” de fase. Este “offset” de fase ocorre devido aos seguintes fatores:

- Incerteza na medida do tempo de atraso do retorno do sinal provocada por desvio na frequência de relógio do radar;
- O processo de desdobramento de fase pode acarretar um “offset” de fase, dependendo do algoritmo utilizado.

Estes “offsets” de fase acarretam um erro planimétrico e altimétrico na geração do MDE e, portanto precisam ser estimados. Normalmente o “offset” de fase é estimado usando pontos de controle. Através das coordenadas obtidas por GPS do ponto de controle pode-se determinar a coordenadas de alcance (direção de visada) e de azimute (direção do deslocamento) na imagem interferométrica bem como a fase interferométrica teórica. O “offset” é então a

diferença entre a fase interferométrica teórica calculada e a fase contida na imagem interferométrica na coordenadas de alcance e de azimute.

Recentemente, métodos automáticos para determinação do offset de fase tem sido propostos, baseados em trajetórias de pontos no espaço de fase (MURA et al., 2012), estimação algébrica (GATTI et al, 2011), diversidade espectral (SCHEIBER; FISCHER, 2004) e campos markovianos (FERRAIOLI et al, 2008). O presente trabalho propõe um novo algoritmo baseado na otimização não linear para determinação dos “offsets” de fase. O método visa minimizar a distorção entre duas imagens interferométricas obtidas com diferentes geometrias de aquisição causadas pelo offset de fase. Os resultados foram obtidos usando-se dados da banda X do radar aerotransportado ORBISAR-1. Refletores de canto (RC) foram usados para validar os resultados.

## 2 MÉTODO PROPOSTO

O método proposto ajusta os “offsets” de fase das duas imagens interferométricas até que a distorção geométrica entre ambas atinja o mínimo possível. É necessário apenas que as linhas base das imagens interferométricas sejam não colineares. A distorção geométrica resulta da diferença entre os MDEs gerados de ambas as imagens interferométricas, através da geocodificação direta. A ideia subjacente do método é de que para todo “offset” de fase de uma imagem interferométrica de referencia (IIR), existe um “offset” de fase na segunda imagem interferométrica, dependente (IID), que minimiza a distorção entre os MDEs gerados por ambas. Ou seja, o offset de IID é único para cada valor de offset de IIR e dado por,

$$\phi_{dep}^o = Off(\phi_{ref}^o) = \frac{1}{N} \sum_i^n GI_{dep} \left( GD_{ref}(\phi_{ref}^i, \phi_{ref}^o) \right) - \phi_{dep}^i \quad (2.1)$$

onde:

- $\phi_{dep}^o$  e  $\phi_{ref}^o$  são os “offsets” de fase de IID e IIR respectivamente.
- $\phi_{ref}^i$  é a fase absoluta do i-ésimo ponto de IIR.
- $\phi_{dep}^i$  é a fase absoluta em IID correspondente ao i-ésimo ponto de IIR. Uma vez que  $\phi_{ref}^i$  tenha sido geocodificado diretamente, obtendo o alvo  $\mathbf{P}$ , as coordenadas em IID para  $\phi_{dep}^i$  ficam automaticamente estabelecidas.
- $GD_{ref}()$  é a função de geocodificação direta para os pontos de IIR. Ela utiliza os parâmetros de voo (posição das antenas, comprimento de onda e a distancia  $r_1$  associada à coordenada alcance do i-ésimo ponto) mais os argumentos  $\phi_{ref}^i$  e  $\phi_{ref}^o$  para o calculo da posição do alvo  $\mathbf{P}$  (Equação 1.8). A função de geocodificação para IID,  $GD_{dep}()$ , é definida de forma análoga.
- $GI_{dep}()$  é a função de geocodificação inversa que, dadas as coordenadas de um alvo  $\mathbf{P}$ , resulta na fase absoluta teórica para  $\mathbf{P}$  em IID (equação 1.1). A função de geocodificação inversa para  $GI_{ref}()$  é definida de forma análoga.

O processo de minimização ocorre em três etapas:

- 1) Determinação do “offset” de fase inicial de IIR para o processo de otimização. Nesta etapa os dados de MDE disponibilizados pela missão SRTM (FARR, 2007) previamente coregistrados com IIR são usados para o calculo do “offset” de fase inicial de IIR através da geocodificação inversa. A precisão dos dados do SRTM nesta etapa não é importante. Com a informação das coordenadas WGS84 do i-ésimo ponto obtido dos dados SRTM podemos estimar o “offset” inicial através de:

$$\phi_{ref}^o = \frac{1}{N} \sum_i^n GI_{ref}(SRTM(i)) - \phi_{ref}^i \quad (2.2)$$

2) Minimização unidimensional da distorção geométrica. Esta etapa visa achar o “offset” de fase de IIR que minimiza a distorção geométrica entre IIR e IDD. O “offset” de fase de IID,  $\phi_{dep}^o$ , é obtido através da Equação 2.1. A função que mede a o erro (ou distorção) entre as geocodificações diretas de IIR e IID induzida por  $\phi_{ref}^o$  para o i-ésimo ponto é dada por:

$$e^i(\phi_{ref}^o) = \left\| GD_{ref}(\phi_{ref}^i, \phi_{ref}^o) - GD_{dep}(\phi_{dep}^i, Off(\phi_{ref}^o)) \right\|^2 \quad (2.3)$$

$$d(\phi_{ref}^o) = \sum_i^n e^i(\phi_{ref}^o) \quad (2.4)$$

$$\phi_{ref}^{o*} = \underset{\phi_{ref}^o}{\operatorname{argmin}} d(\phi_{ref}^o) \quad (2.5)$$

$\phi_{dep}^{o*}$  é finalmente obtido pela Equação 2.1

3) Minimização bidimensional no espaço de fase. Nesta etapa a dependência de  $\phi_{dep}^o$  com  $\phi_{ref}^o$  é relaxada, de forma que as Equações 2.3 e 2.4 mudam para:

$$e^i(\phi_{ref}^o, \phi_{dep}^o) = \left\| GD_{ref}(\phi_{ref}^i, \phi_{ref}^o) - GD_{dep}(\phi_{dep}^i, \phi_{ref}^o) \right\|^2 \quad (2.6)$$

$$d(\phi_{ref}^o, \phi_{dep}^o) = \sum_i^n e^i(\phi_{ref}^o, \phi_{dep}^o) \quad (2.8)$$

Considerando que o segundo passo posiciona a busca nas vizinhanças do mínimo global (se houver) então as direções conjugadas para a busca bidimensional podem ser obtidas através das equações:

$$\gamma_1 = \text{atan} \left( \frac{B_1 \int_{\theta_{near}}^{\theta_{far}} \frac{\cos(\theta - \alpha_1)}{\cos(\theta - \alpha_2)} d\theta}{B_2 (\theta_{far} - \theta_{near})} \right) \quad (2.9)$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 + \frac{\pi}{2} \quad (2.10)$$

Onde o argumento de atan() reflete a inclinação média de  $\frac{d\phi_{ref}/d\theta}{d\phi_{dep}/d\theta}$  ao longo da abertura vertical da antena,  $(\theta_{far} - \theta_{near})$ .

### 3 RESULTADOS

A validação do algoritmo foi efetuada usando-se dados da banda X de 3 áreas teste usando os parâmetros de voo mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de voo do Sistema OrbiSAR-1 para as áreas de teste.

Parâmetro	Area 1	Área 2	Área 3
Localização	Pará-Brasil	Amazonas-Brasil	Verbania-Itália
Comprimento de Onda (banda X)	0.031392 m	0.031228 m	0.031066 m
Largura do lóbulo principal em azimute	7.5°	7.5°	7.5°
Largura do lóbulo principal em elevação	34°	25°	34°
Ângulo de depressão	45°	45°	45°
Largura de banda do chirp	400 MHz	100 MHz	400 MHz
Altura de voo	3.3 km	7.6 km	7.3 km
Largura de faixa imageada	2.3 km	15 km	4 km
Resolução do MDE	0.5 m	3.75 m	1.0 m
Comprimento da linha de base maior	2.4310 m	2.7654 m	2.3333 m
Inclinação da linha de base maior	6.37°	7.35°	7.00°
Comprimento da linha de base menor	0.6559 m	0.6976 m	0.4280 m
Inclinação da linha de base menor	24.96°	30.95°	40.69°

Refletores de canto, similares ao da Figura 3.1, foram instalados nas áreas teste e suas coordenadas WGS84, foram obtidas com o uso de aparelhos de GPS diferencial, permitindo grande precisão nas medidas.

Os pontos foram selecionados de forma aleatória, porém preservando a distribuição homogênea na imagem de referencia. Adicionalmente, os pontos

foram selecionados conforme o critério de qualidade baseado na imagem de coerência obtida durante o cálculo da fase interferométrica (BAMLER, 1998). Os pontos foram selecionados com valores de coerência superior a 0,7.



Figura 3.1 – Refletor de canto.

A validação foi realizada calculando a inclinação do MDE através da regressão linear das diferenças entre as elevações dos RCs medidas em campo e as calculadas pela geocodificação direta ao longo da largura de faixa.

Tabela 3.2 – Determinação dos “offsets de fase” usando RCs.

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
Tipo de terreno	Plano	Floresta	Montanhoso
# RCs instalados	5	8	8
“Offsets” de fase linha base menor	3,336 rad	3,499 rad	5,837 rad
“Offsets” de fase linha base maior	5,528 rad	1,371 rad	2,092 rad
Coefficiente angular da regressão linear	$-4,97 \cdot 10^{-7}$	$-2,47 \cdot 10^{-7}$	$6,45 \cdot 10^{-7}$
Coefficiente linear da regressão linear	$9,52 \cdot 10^{-4}$ m	$7,20 \cdot 10^{-5}$ m	$-1,03 \cdot 10^{-3}$ m
Desnível total na largura de faixa	-0,002m	-0,001 m	0,003 m
Desvio padrão do erro de elevação,	0,062 m	0,391 m	0,321 m
Banda de incerteza no erro de elevação com 95% no nível confiança	$\pm 0,210$ m	$\pm 1,352$ m	$\pm 0,742$ m

A reta de regressão modela o desnível do terreno ao longo da direção de visada (ao longo da largura de faixa). A Tabela 3.2 mostra que os “offsets” de fase obtidos através dos refletores de canto resultaram em valores dos coeficientes angular e linear da reta de regressão próximos de zero, situação ideal. O desvio padrão do erro de elevação nos fornece uma medida do espalhamento das diferenças de elevação entre os valores previsto e medido para o conjunto de RCs. Este desvio padrão,  $\sigma_h$ , está relacionado com o desvio padrão da fase,  $\sigma_\phi$ , pela equação:

$$\sigma_h = \frac{\lambda r_1 \sin\theta}{2\pi B_\perp} \sigma_\phi \quad (3.1)$$

A Tabela 3.3 mostra que os “offsets” de fase obtidos pelo o método proposto estão muito próximos aos obtidos pelo método utilizando RCs. Os desníveis totais na largura de faixa de todas as áreas teste ficaram confinados dentro das bandas de incerteza do erro de elevação com 95% no nível de confiança correspondentes, apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.3 – Determinação dos “offsets de fase” usando o método proposto.

Parâmetro	Área 1	Área 2	Área 3
Tipo de terreno	Plano	Floresta	Montanha
# pontos usados no algoritmo	31543	20764	32238
“Offsets” de fase linha base menor	3,338 rad	3,496 rad	5,832 rad
“Offsets” de fase linha base maior	5,535 rad	1,361 rad	2,070 rad
Coefficiente angular da regressão linear	$-1,80 \cdot 10^{-5}$	$4,37 \cdot 10^{-5}$	$9,04 \cdot 10^{-5}$
Coefficiente linear da regressão linear	0,123 m	-0,109 m	-0,007 m
Desnível total na largura de faixa	-0,073 m	0,179 m	0,370 m
Desvio padrão do erro de elevação, $\sigma_h$	0,095 m	0,734 m	0,824 m

#### **4 CONCLUSÃO**

Os resultados obtidos com as três áreas teste indicam que o método proposto tem um bom potencial para uso operacional sem a necessidade de instalação de RCs em campo, o que torna o método bastante atrativo devido à redução de custos causados pela instalação bem como pela conveniência de eliminar as dificuldades em áreas de difícil acesso como, por exemplo, a floresta amazônica. A robustez do método fica evidenciada pela observação de que os desníveis totais na largura de faixa em todas as áreas teste ficaram confinados dentro das bandas de incerteza do erro de elevação com 95% de confiança.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAMLER, R.; HARTL, P. Synthetic aperture radar interferometry. **Inverse Problems**, v. 14, 1998.
- EINER, M. A maximum-likelihood estimator to simultaneously unwrap, geocode, and fuse sar interferograms from different viewing geometries into one digital elevation model. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 1, Jan. 2005.
- FARR, T. G.; et al. The Shuttle Radar Topography Mission. **Rev. Geophys.**, v. 45, RG2004, p.33, 2007. doi:10.1029/2005RG000183.
- FERRAIOLI, G.; FERRAIUOLO, G.; PASCAZIO, V. Phase-offset estimation in multichannel SAR interferometry. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 3, July 2008.
- GATTI, G.; et al. ALGAE: a fast algebraic estimation of interferogram phase offsets in space-varying geometries. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 6, p 2343-2353, 2011. doi: 10.1109/TGRS.2010.2091278.
- MURA, J. C.; PINHEIRO, M.; ROSA, R.; MOREIRA, J. R. A phase-offset estimation method for insar dem generation based on phase-offset functions. **Remote Sensing**, v. 4, p. 745-761, 2012. doi:10.3390/rs4030745.
- SCHEIBER, R.; FISCHER, J. Absolute phase offset in SAR interferometry: estimation by spectral diversity and integration into processing. In: EUROPEAN SYNTHETIC APERTURE RADAR (EUSAR), 2004, Ulm, Germany. **Proceedings...** Ulm, Germany, 25–27 May, 2004.
- WU, W.; CUMMING, I. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 1, Jan.1999.