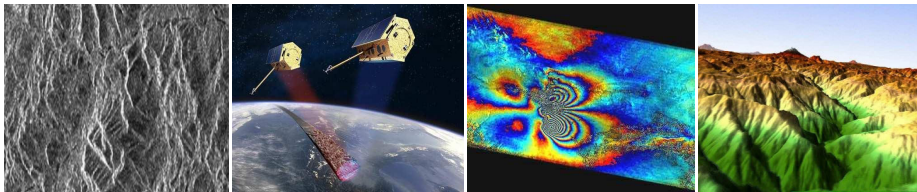


técnicas de interferometria radar

Mini curso
UNESP (Presidente Prudente, SP)
25 Julho 2012

Laurent Polidori
CNAM / ESGT (Le Mans, França)

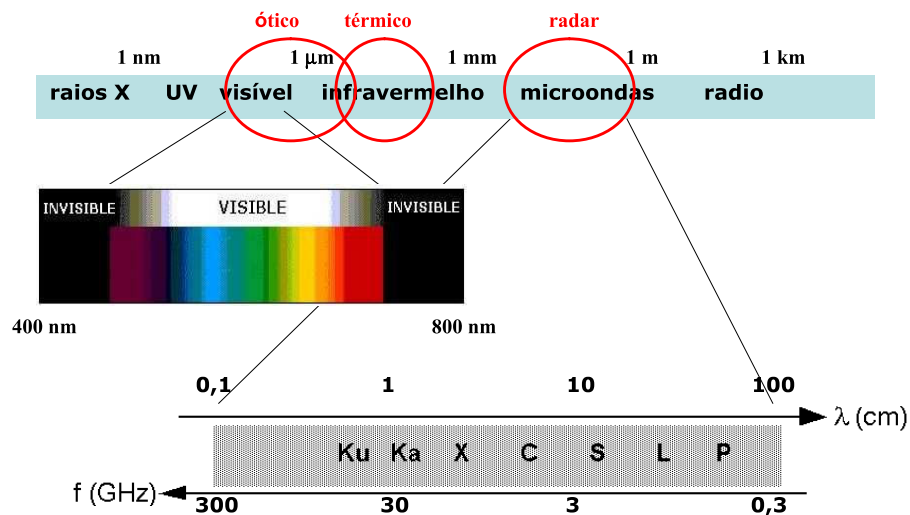


técnicas de interferometria radar

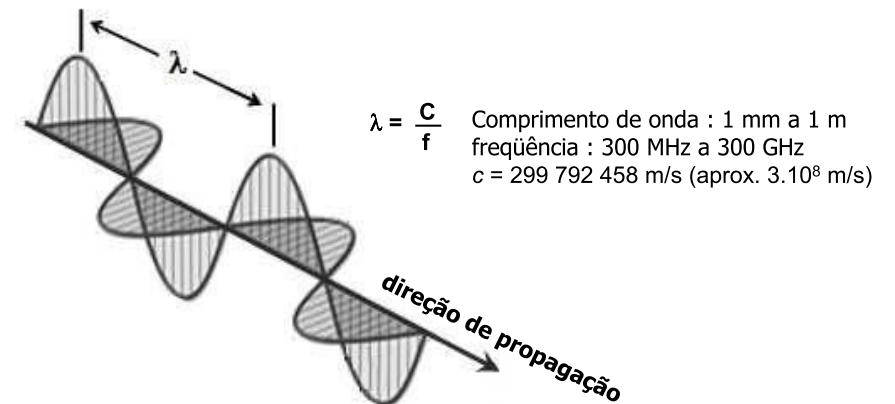
1. Funcionamento do sensor SAR e características das imagens
2. Conteúdo dos dados e balanço energético
3. Princípios geométricos da interferometria radar
4. Processamento interferométrico das imagens
5. Fontes de erro e interpretação física
6. Aplicação ao levantamento do relevo terrestre
7. Aplicação ao monitoramento das deformações geofísicas
8. Comparação com outras técnicas

Conclusão

As micro-ondas (ou « hiperfrequências »)



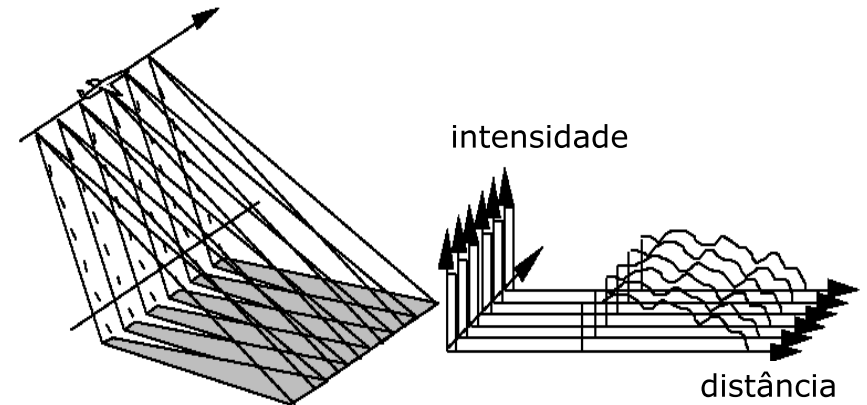
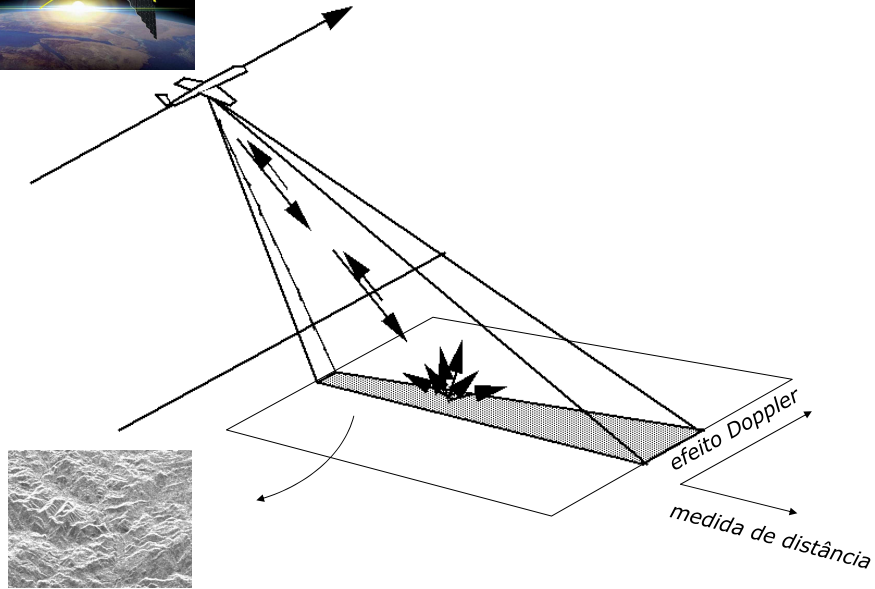
As micro-ondas (ou « hiperfrequências »)



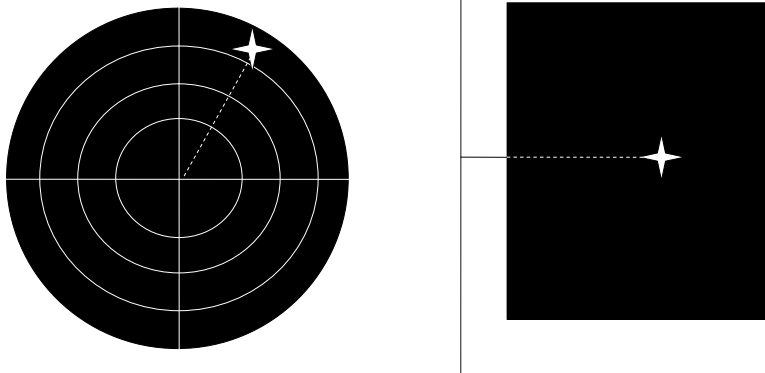
Em meio material de índice de refração n , $\lambda = \frac{c}{n f}$ (atraso atmosférico)



Radar de visão lateral (SLAR = side looking airborne radar)



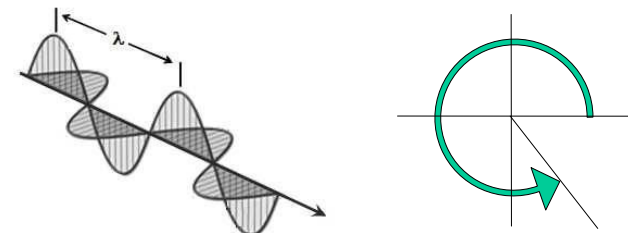
Analogia com o PPI (radar com tela circular)

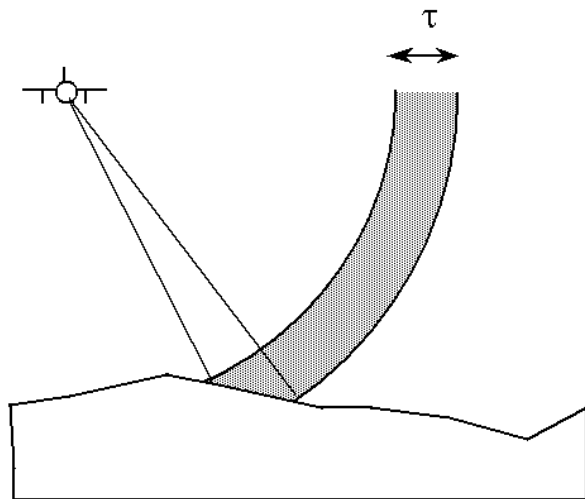


Range : distância medida a partir da **propagação da onda**
Azimuth : instante de recepção deduzido do **movimento da antena**

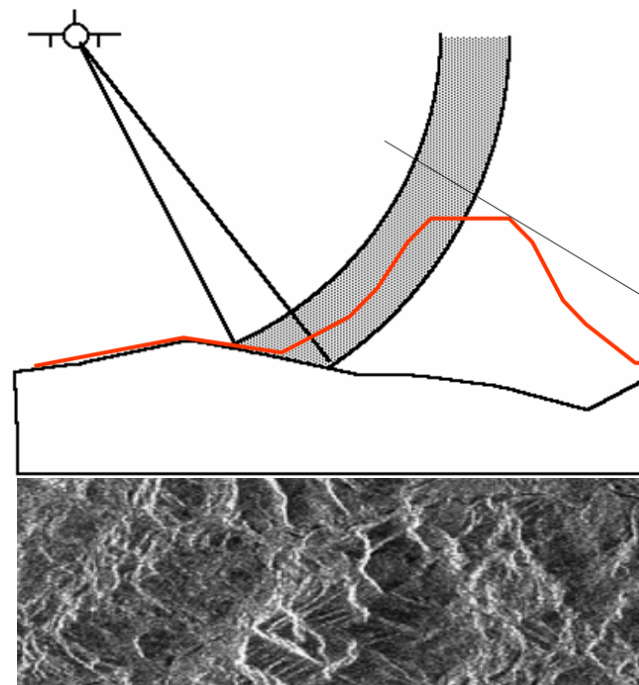
Cada pixel de imagem de radar contem 3 informações

- 1. Geometria** (posição na imagem)
Localização em distância (« range ») : tempo de propagação
Localização em azimuth : posição da plataforma
- 2. Radiometria** (coeficiente de retro-espalhamento)
- 3. Fase**
Un sensor radar pode medir a fase do sinal ($0 - 2\pi$)



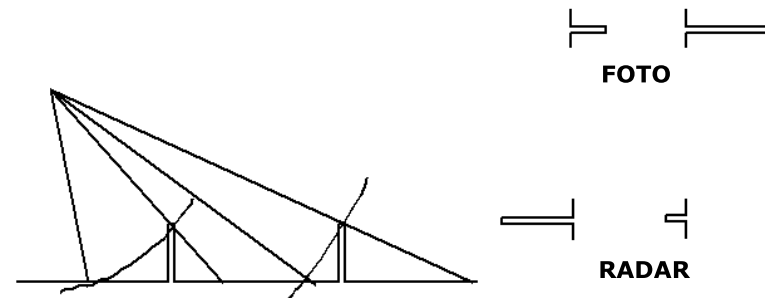


Medida da distância : a aquisição deve ser lateral

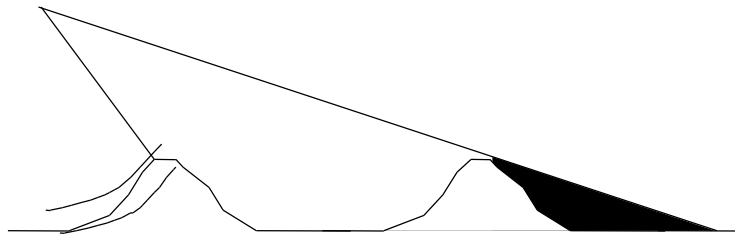


Efeito do ângulo de incidência

Comparação com a fotografia



Efeito do ângulo de incidência



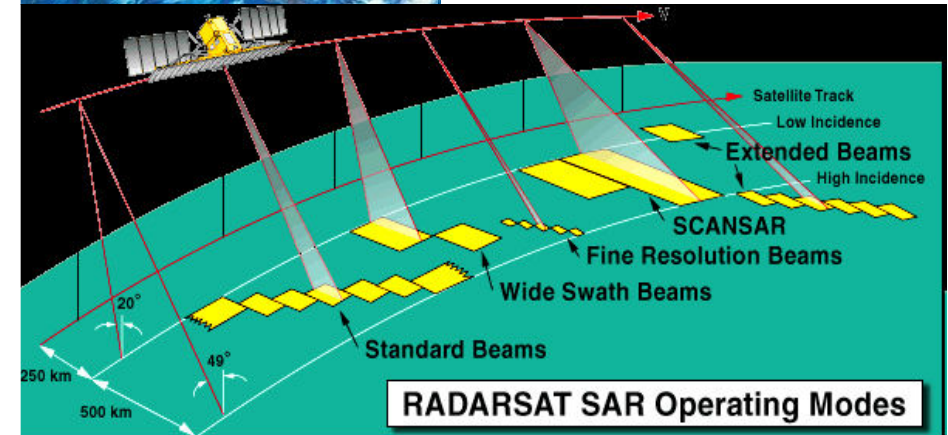
fortes distorções geométricas
forte retro-espalhamento

poucas distorções geométricas
pouco retro-espalhamento
sombras



Radarsat (desde 1994)

- multi-incidência
- multi-resolução
- capacidade de iluminação esquerda / direita



RADARSAT SAR Operating Modes

Um sensor « todo tempo »

1. Sensor ativo :

Pode funcionar dia e noite (i.e. órbita ascendente ou descendente)

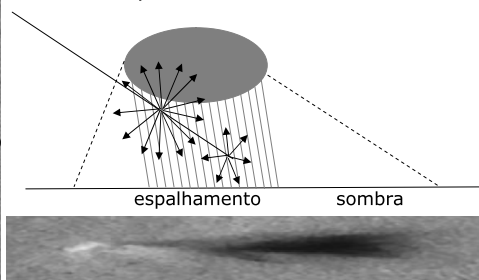
2. Sensor de micro-ondas :

A propagação das ondas (quase) não sofre interação pela atmosfera



Exceção :

- comprimentos de onda muito curtos (1-2 cm)
- chuvas tropicais



balanço de energia : a equação radar

$$P_r = \frac{P_e G^2 \eta \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma$$

P_r : potência recebida
 P_e : potência emitida
 G : ganância da antena
 λ : comprimento de onda
 η : eficácia da antena
 R : distância
 σ : superfície equivalente

$$\sigma = S \cdot \sigma^0$$

σ^0 = coeficiente de retro-espalhamento

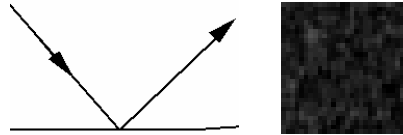
Caso do radar de abertura sintética (SAR):

P_r proporcional a $1 / R^3$

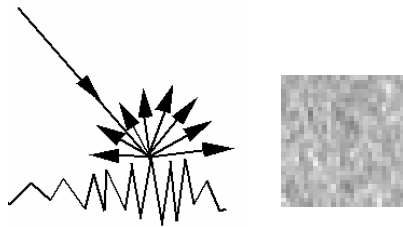
Radiometria das imagens de radar

Efeito da rugosidade da superfície

superfície lisa
reflexão especular
imagem escura

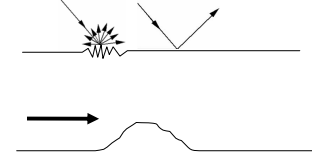


superfície rugosa
reflexão difusa
imagem clara



Propagação das ondas de radar sob a superfície

1. Água : reflexão total
Detecção indireta da morfologia do fundo



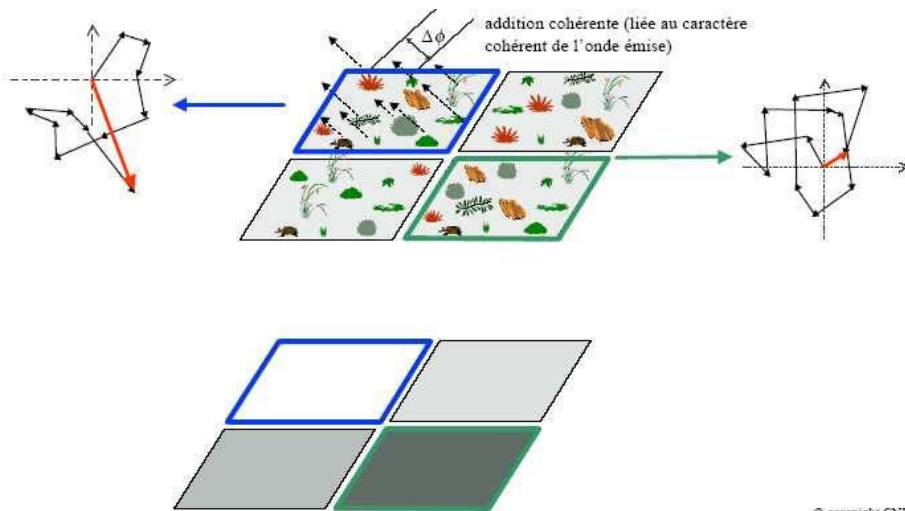
➡ **Batimetria em águas pouco profundas**



2. Gelo e areia :
Propagação da onda em meio homogêneo e seco

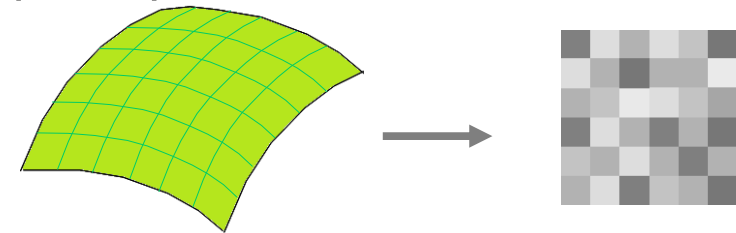
➡ **Topografia em região desértica**

Fenômeno de speckle

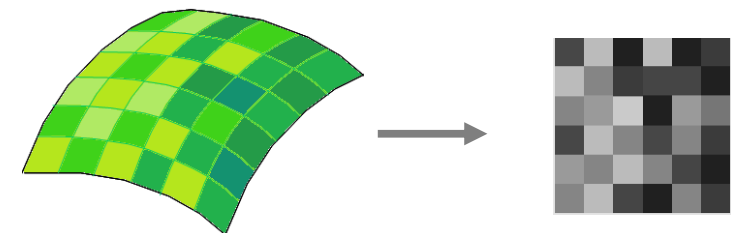


© copyright CNE

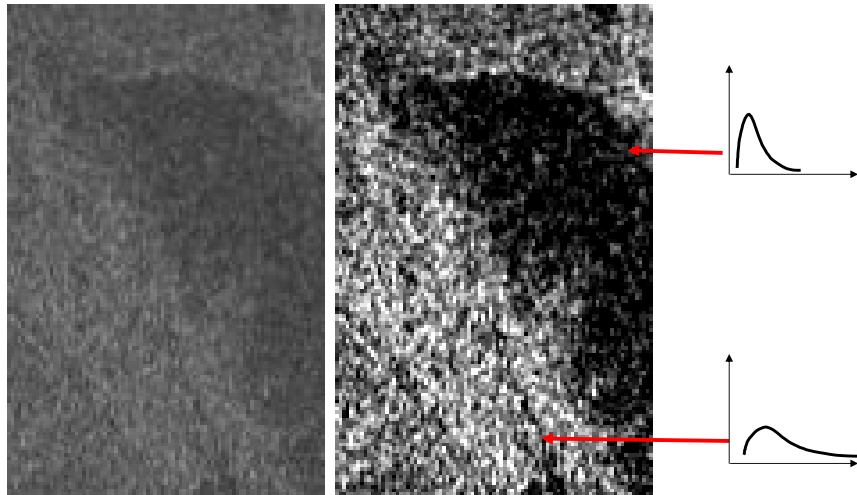
speckle « puro »



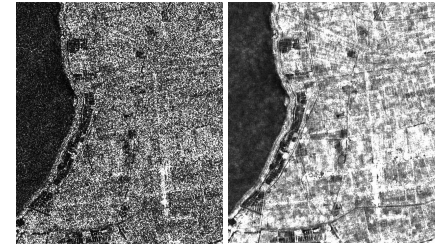
speckle + heterogeneidade natural



o speckle é um ruído multiplicativo
a média é proporcional ao desvio padrão



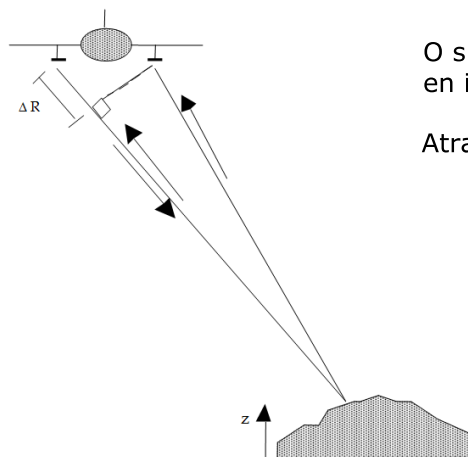
Filtragem do *speckle*



Níveis de processamento das imagens radar

distância oblíqua → distância horizontal
geometria do radar → projeção cartográfica

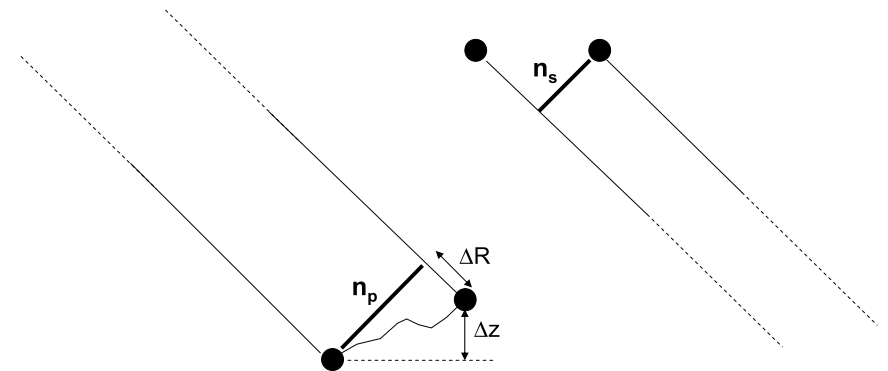
Geometria de aquisição de um radar interferométrico



O sinal chega às 2 antenas em instantes diferentes.

Atraso entre as 2 antenas :

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R$$



O atraso $\Delta\Phi$ tem uma variação espacial lenta

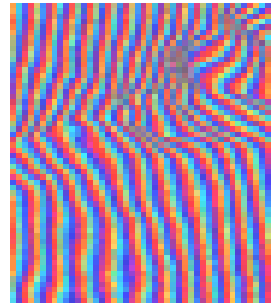
$$\Delta^2\Phi = \frac{4\pi}{\lambda R} n_s n_p$$

$$n_p \sin\theta = \Delta R \cdot \cos\theta + \Delta z$$

$$\Delta^2\Phi = \left(\frac{4\pi n_s}{\lambda R \tan\theta}\right) \Delta R + \left(\frac{4\pi n_s}{\lambda R \sin\theta}\right) \Delta z$$

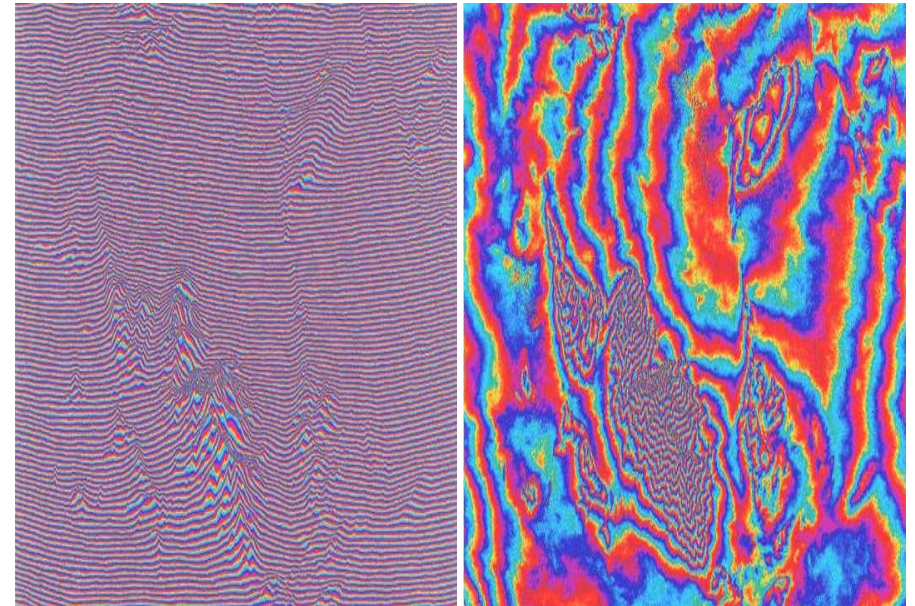
fase orbital

fase topográfica

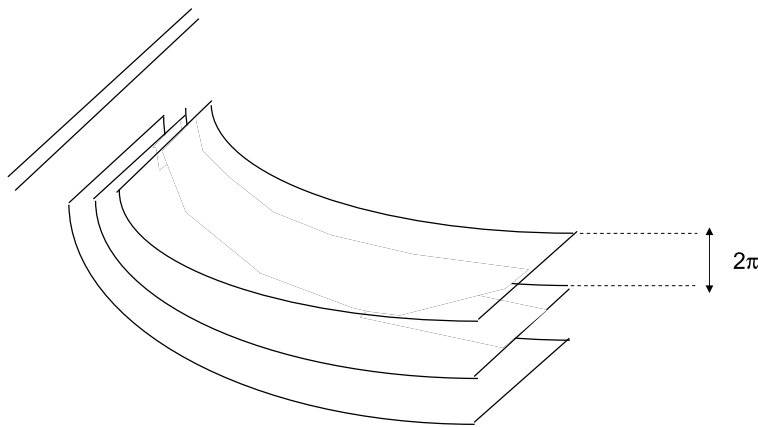


fase orbital + fase topográfica

fase topográfica



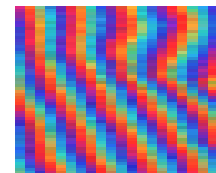
Altura de ambigüidade



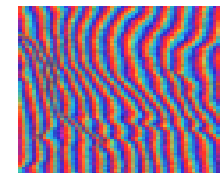
$$\Delta^2\Phi = \left(\frac{4\pi n_s}{\lambda R \sin\theta}\right) \Delta z \longrightarrow \Delta z_{\text{amb}} = \frac{\lambda R \sin\theta}{2n_s}$$

Sensibilidade da fase à elevação : $\frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{4\pi n_s}{\lambda R \sin\theta}$

Quando a *baseline* aumenta, a sensibilidade da fase aumenta :

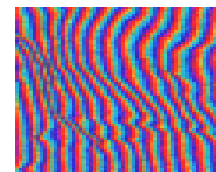


$n_s = 100 \text{ m}$

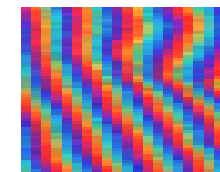


$n_s = 400 \text{ m}$

Quando o comprimento de onda aumenta, a sensibilidade da fase diminui :



$\lambda = 6 \text{ cm}$ (faixa C)



$\lambda = 25 \text{ cm}$ (faixa L)

sobreposição espacial das imagens

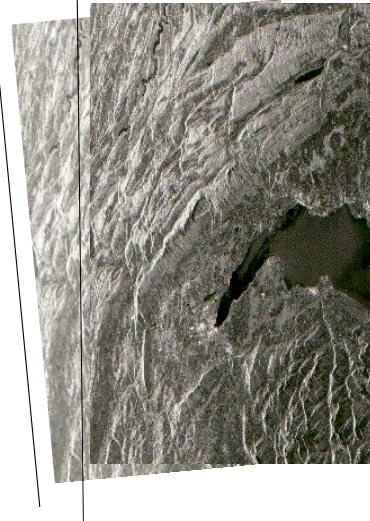
Uso da **radiometria** :
sobreposição na escala do pixel

Uso da **fase** :
sobreposição otimizada

erro de sobreposição

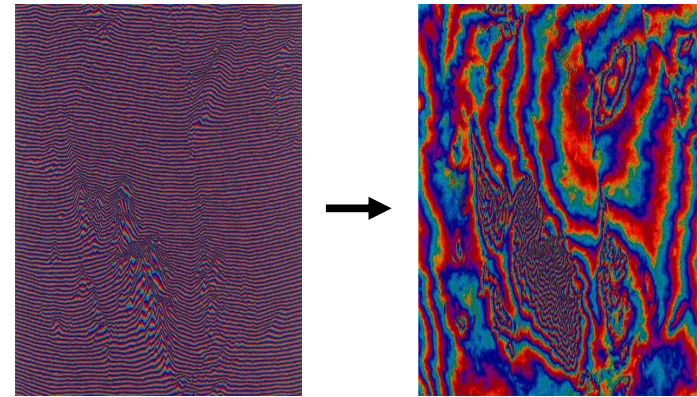


ruído da fase



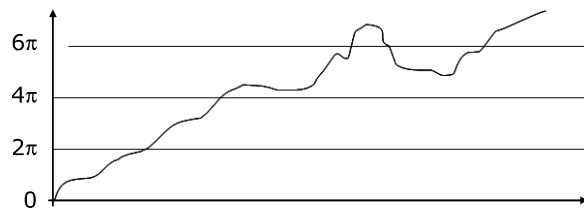
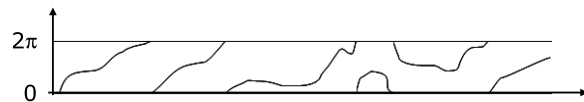
Remoção da fase orbital

Cálculo da fase orbital a partir dos dados instrumentais e orbitais

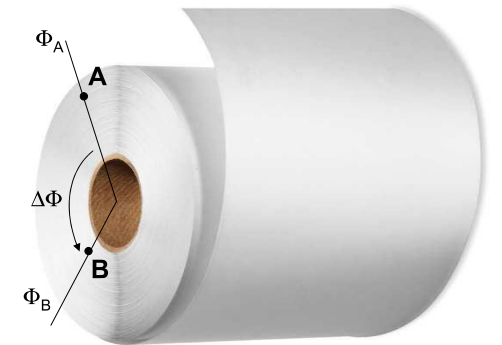


Desdobramento das franjas

Objetivo : converter fase (0 - 2π) para fase absoluta



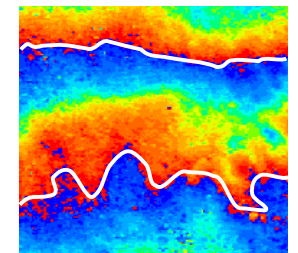
$$\Delta\Phi = \Phi_B - \Phi_A + k \cdot 2\pi$$



k = número (desconhecido) de ciclos inteiros

Determinar k = contar as franjas

 processamento digital de imagens



Processamento geométrico

Conversão de fase para elevação

→ O resultado está na geometria inicial da imagem

Georreferenciamento

✓ Modelagem geométrica
(para conversão da geometria da imagem para geometria cartográfica)

✓ Reamostragem

→ O resultado está em geometria cartográfica

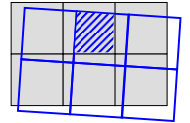
Maiores fontes de erro

1. erros dos parâmetros geométricos (principalmente a *baseline*)

$$\Delta^2 \Phi = \left(\frac{4 \pi n_s}{\lambda R \sin \theta} \right) \Delta z$$

2. fenômenos que produzem ruído na fase

- o erro residual da sobreposição das 2 imagens (uma sobreposição perfeita anula o efeito do *speckle*)
- ruído do sensor
- o fato das 2 observações não serem simultâneas



3. Contribuição à fase de fenômenos não topográficos

- instabilidade do relógio de bordo
- refração atmosférica
- deformação coerente da superfície terrestre

→ O erro da *baseline* age 2 vezes :

- na relação entre $\Delta^2 \Phi$ et Δz
- produzindo ruído na fase

2 antenas → 1 data de aquisição

1 antena → 2 datas de aquisição

Conseqüências das 2 observações não serem simultâneas :

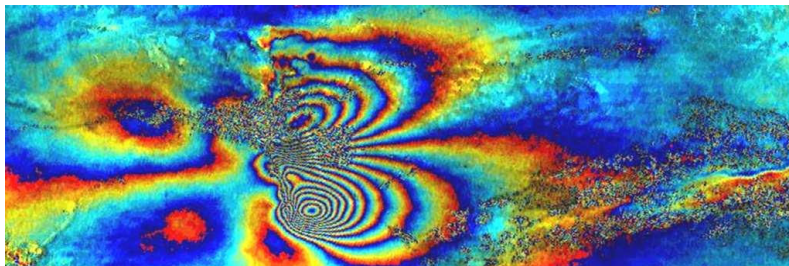
✓ **Mudanças incoerentes da superfície** (água, folhagens...)

Os micro-refletores têm atrasos diferentes / aleatórios
Efeito = ruído da fase

✓ **Mudanças coerentes da superfície**

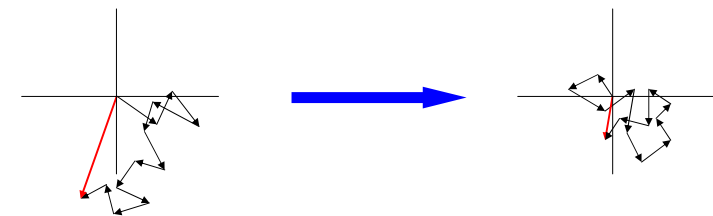
Todos os micro-refletores têm o mesmo atraso

Efeito = interpretação errada da fase (fenômenos não topográficos)



Mudanças incoerentes da superfície (água, folhagens...)

Os micro-refletores têm atrasos diferentes / aleatórios
Efeito = ruído da fase



Coerência do interferograma

γ = coeficiente de correlação entre os 2 sinais complexos

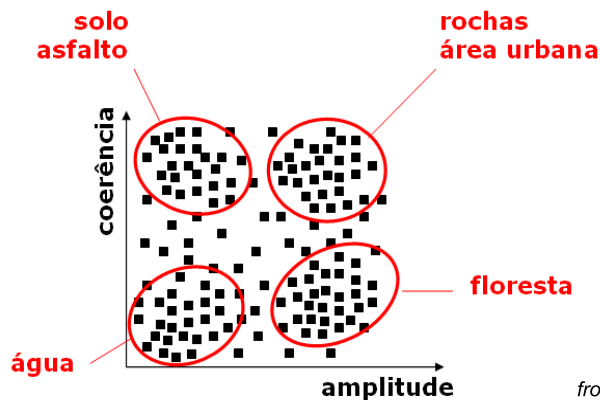
$\gamma = 1$ quando a fase é sem ruído

A coerência traz duas informações :

- ✓ sobre a aptidão do interferograma para uma aplicação topográfica
- ✓ sobre a estabilidade interna da superfície

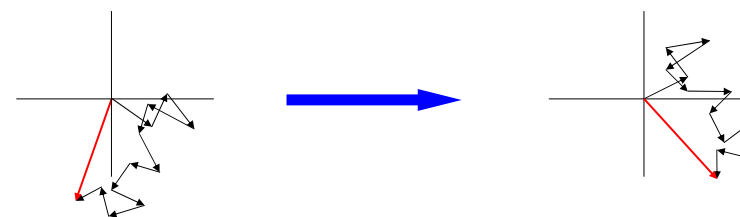
A coerência interferométrica é uma informação ambiental

amplitude : rugosidade / umidade
coerência : estabilidade



Mudanças coerentes da superfície

Todos os micro-refletores têm o mesmo atraso
 Efeito = interpretação errada da fase (fenômenos não topográficos)



Fenômenos não topográficos

- ✓ instabilidade do relógio de bordo
- ✓ refração atmosférica
- ✓ deformação coerente da superfície terrestre (informação geofísica)

Interferometria para aplicação topográfica

Idealmente : observações simultâneas (sistema com duas antenas)

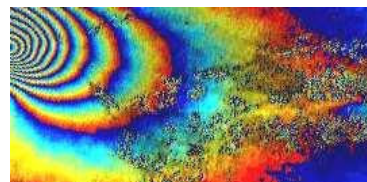
Condições / dificuldades :

- ✓ otimização do valor da *baseline*
- ✓ minimização do intervalo de tempo (caso 1 antena)
- ✓ desdobramento das franjas

Interferometria diferencial

Cálculo e interpretação da fase
 —————> mudanças coerentes

Cálculo e interpretação da coerência
 —————> mudanças incoerentes



Condições / dificuldades : remoção da fase topográfica

- ✓ o relevo é considerado desprezível
- ✓ a fase topográfica é calculada a partir de um MDE

Interferometria **aérea** : 1ª publicação nos **anos 1970**

Interferometria por **satélite** : 1ª publicação nos **anos 1985**

Experimentação nos anos 1992-2002

com satélites não especificamente desenhados para interferometria

faixa C : ERS-1, ERS-2, RADARSAT, ENVISAT

faixa L : JERS-1

Precisão absoluta : 2 a 20 m

Influência do sistema :

- valor da *baseline*
- precisão no valor da *baseline*
- comprimento de onda

Influência do meio ambiente :

- relevo (distorções geométricas)
- atmosfera (atraso)
- vegetação (perda de coerência)

$$\sigma_z = \frac{\lambda R \tan \theta}{4 \pi n_s} \sigma_\phi$$

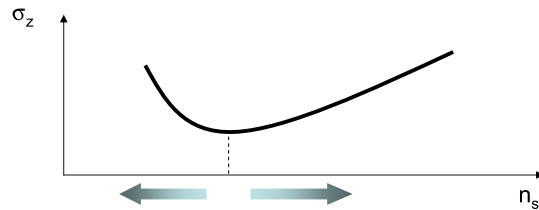
a precisão não é previsível

Interferometria para aplicação topográfica

Idealmente : observações simultâneas (sistema com duas antenas)

Condições / dificuldades :

- ✓ minimização do intervalo de tempo (caso 1 antena)
- ✓ desdobramento das franjas
- ✓ otimização do valor da *baseline*



baseline pequena demais :
efeito estereoscópico reduzido
pouca precisão no cálculo da elevação

baseline grande demais :
importante ruído da fase
erros no desdobramento das franjas

Sistemas espaciais para interferometria radar

- ✓ **Duas antenas no mesmo satélite**

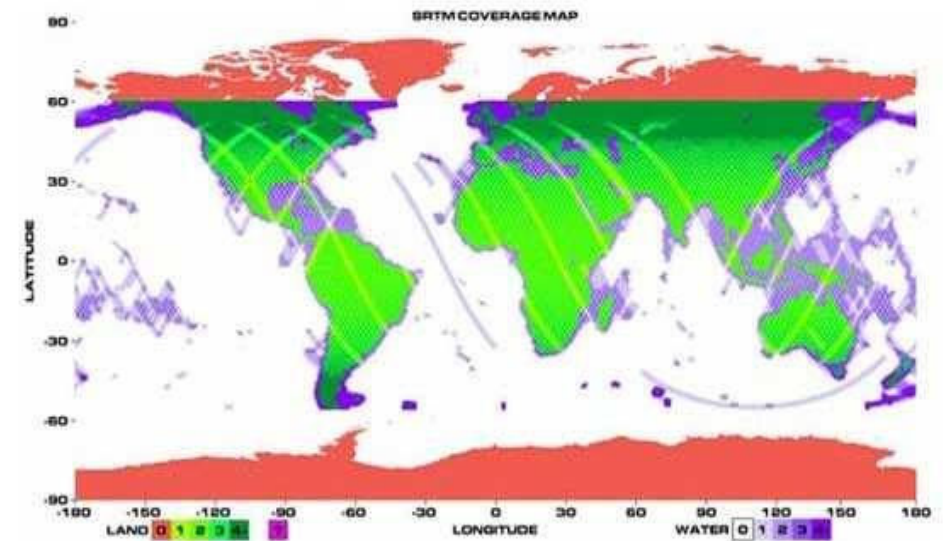
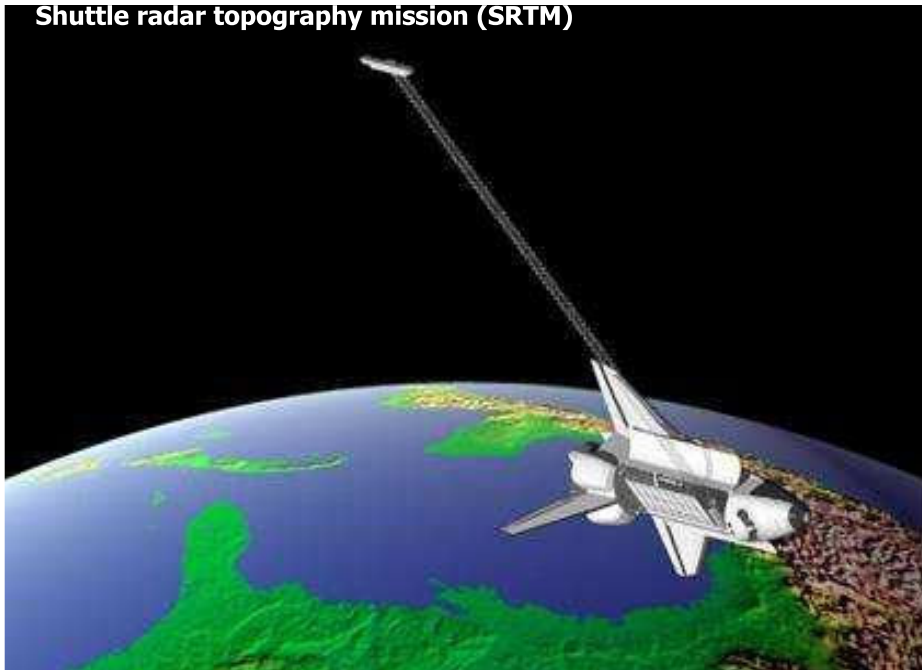
SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

- ✓ **Satélites em formação**

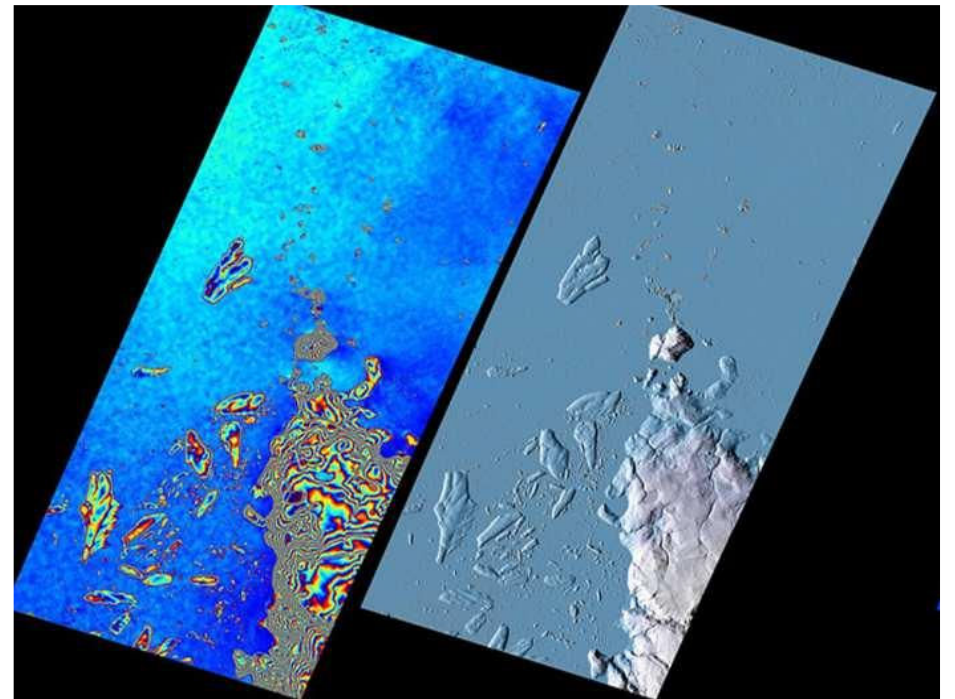
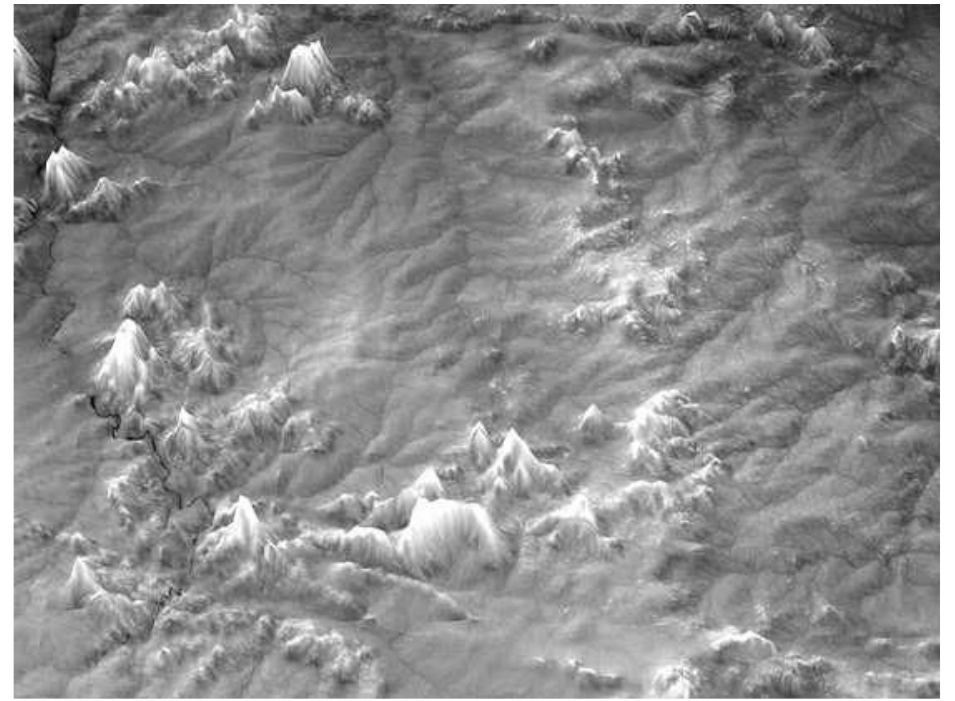
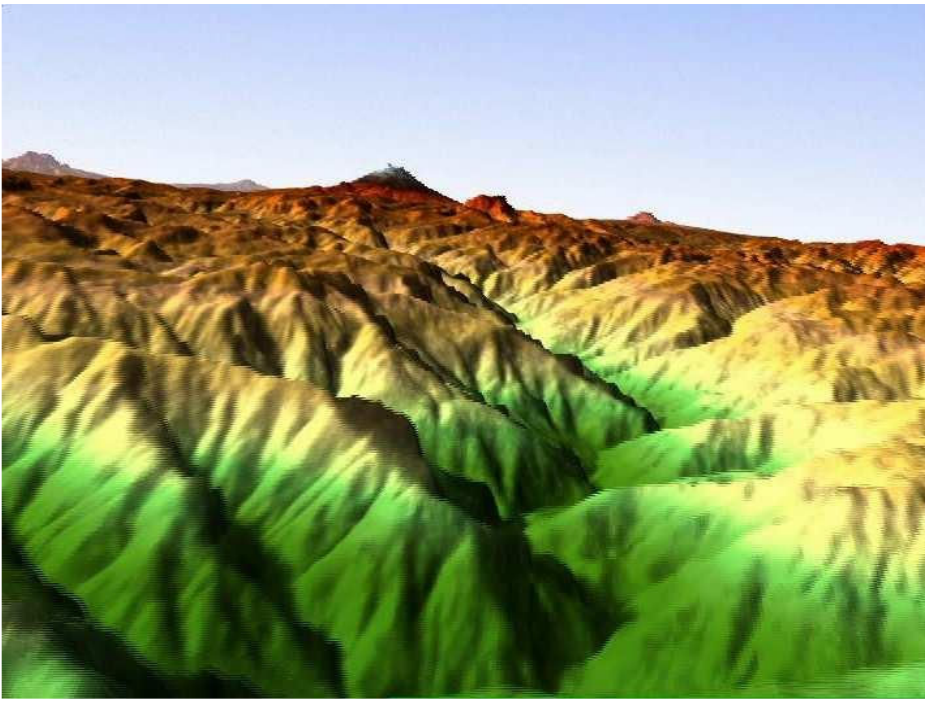
TanDEM-X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement*)

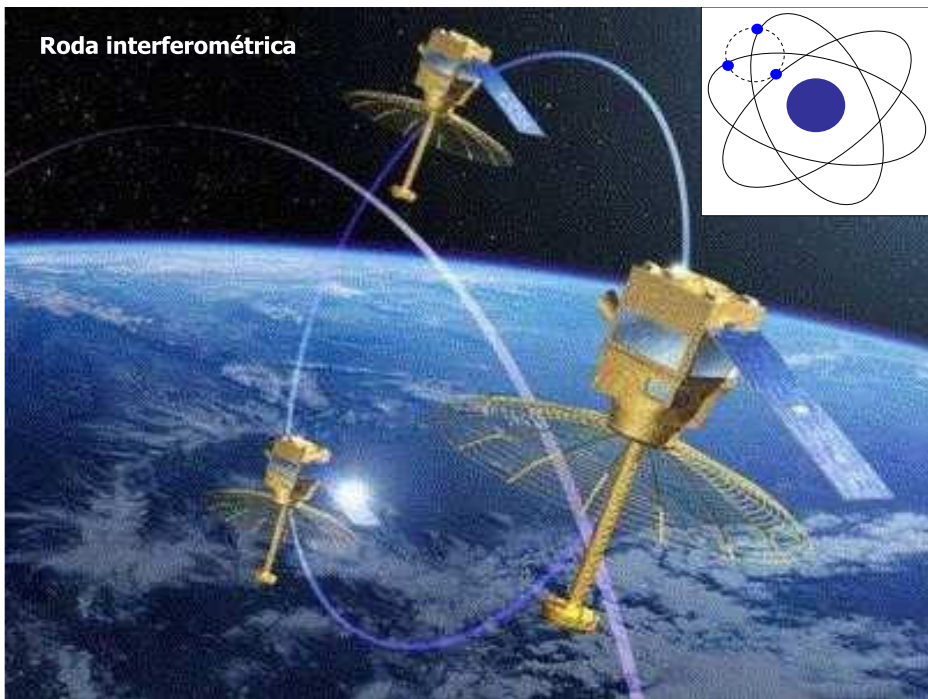
Roda interferométrica (projeto)

Shuttle radar topography mission (SRTM)



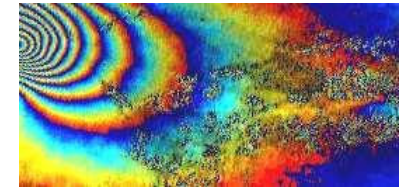
Produto livre : 3" (aprox. 90 m)
Produto restrito : 1" (aprox. 30 m)





Interferometria diferencial

Remoção da fase orbital
 Remoção da fase topográfica
 Cálculo e interpretação da fase
 → mudanças coerentes



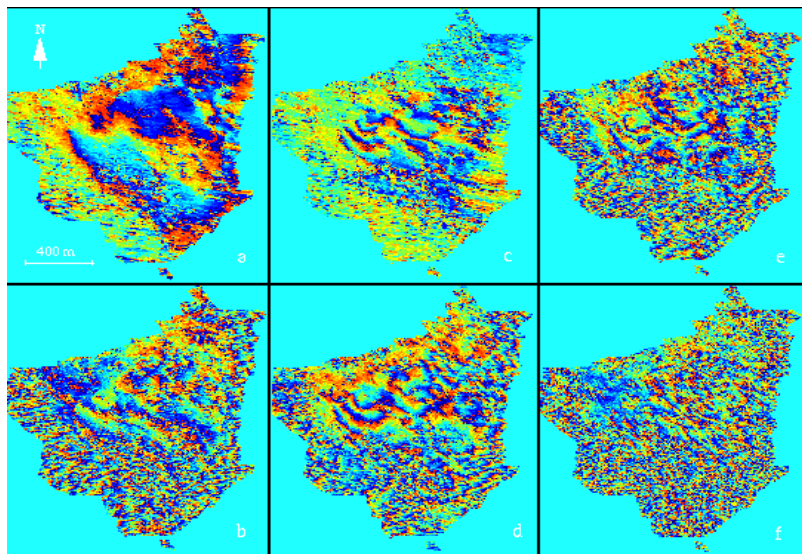
$$\Delta^2\Phi = \left(\frac{4\pi n_s}{\lambda R \tan\theta}\right)\Delta R + \left(\frac{4\pi n_s}{\lambda R \sin\theta}\right)\Delta z + \Delta^2\Phi_{\text{mov}} + \Delta^2\Phi_{\text{outros}}$$

↑
remoção
da fase
orbital

↑
remoção
da fase
topográfica



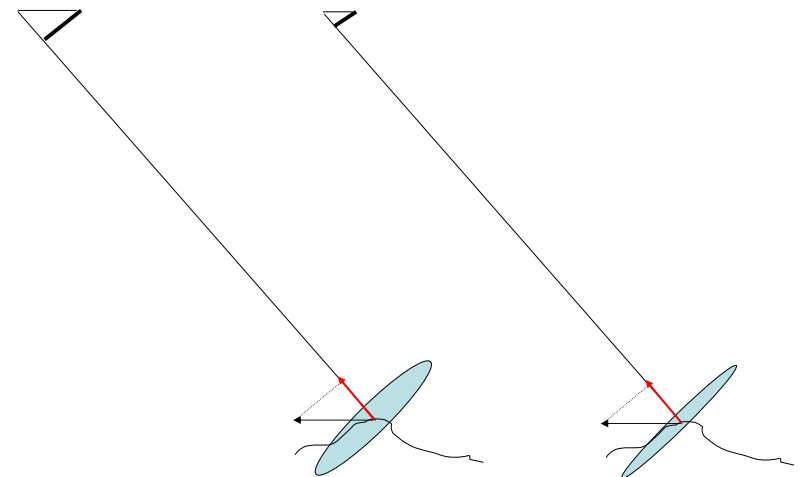
Todo erro de modelagem de uma camada
contamina a camada inferior



Deslizamento nos Alpes franceses

→ *baseline*
 cada par de datas → deslocamento
 coerência

O radar só é sensível à componente do movimento na direção da visão
 O erro depende da *baseline*



Interferometria para modelagem do relevo

Fotogrametria e interferometria : capacidades semelhantes

- ✓ capacidade de cobertura mundial com precisão de aprox. 10 m
- ✓ sensibilidade às condições atmosféricas
- ✓ superfície topográfica inacessível em áreas de floresta

O lidar espacial dá acesso às 2 informações :

- A elevação da superfície topográfica
- A elevação do nível superior das folhagens



Caso da interferometria com 1 antena :

- Contribuição de fenômenos não-topográficos
- A precisão do MDE não é previsível

Interferometria diferencial para monitoramento geofísico



topometria terrestre

GPS

interferometria radar

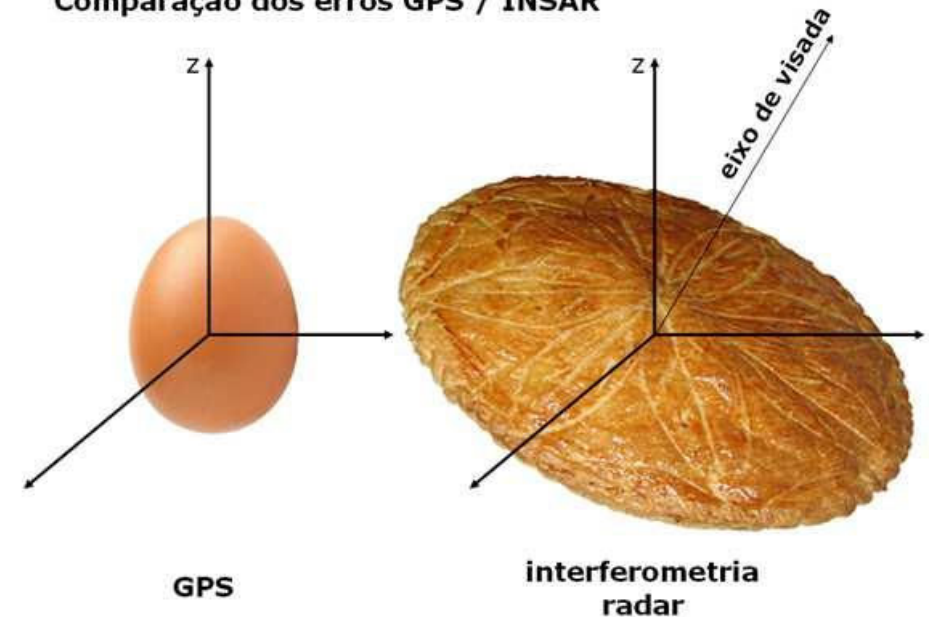
localização relativa :
medidas de ângulos e
distâncias

localização absoluta

medida do deslocamento
entre 2 datas
(1 componente)

	topometria terrestre	GPS	interferometria radar
extensão	pequena	grande	grande
precisão	mm	cm	cm
amostragem espacial	descontínuo	descontínuo	contínuo
amostragem temporal	descontínuo	contínuo	descontínuo
componentes direcionais	todas	horizontal	vertical

Comparação dos erros GPS / INSAR



Conclusão

A interferometria radar pode contribuir a

- ✓ levantamentos topográficos
- ✓ monitoramento de deformações

Forneceu o primeiro MDE na escala mundial

A precisão não é previsível

Ainda é um tema de pesquisa