

CORREÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA AEROTRANSPORTADO

Rafael Antonio da Silva Rosa ^{1,2}
David Fernandes ¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA/CTA
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - 12228-900 - São José dos Campos - SP, Brasil
david@ita.br, rafael@ita.br

²Orbisat da Amazônia Indústria e Aerolevanteamento S.A.
Av. Shishima Hifumi, 2911, sala 404, Parque Tecnológico, Urbanova - 12244-000
São José dos Campos - SP, Brasil
rafael@orbisat.com.br

Abstract. The SAR imaging presents a radiometrically uncalibrated result, since the side-looking radar, along with the antenna characteristics and the attitudes of the plane, make this image presents intensity variations. And, one of the biggest challenges faced today by the SAR imagery is exactly perform the radiometric correction, making possible the use of amplitude images for cartographic purposes, such as classification and planimetry. The objective of this work was, precisely, to study and implement a method of radiometric correction, generating SAR images with calibrated intensity.

Palavras-chave: correção radiométrica, radar de abertura sintética, SAR, imagem SAR.

1. Introdução

A geração da imagem SAR apresenta um resultado radiometricamente descalibrado, pois a visada lateral do radar, juntamente com as características da antena utilizada e, as atitudes da aeronave, fazem com que essa imagem apresente variações de intensidade.

Uma dos grandes desafios encontrados atualmente pelo imageamento SAR é exatamente realizar a *correção radiométrica*, tornando possível a utilização das imagens de amplitude para finalidades cartográficas, como por exemplo, classificação, planimetria, reconhecimento de linhas de alta e baixa tensão, edificações e massa d'água.

Para mostrar o efeito da correção radiométrica, a Figura 1 mostra como exemplo, a mesma imagem SAR, sem e com correção radiométrica, deixando a diferença evidente. Nesta figura nota-se que a imagem corrigida (Figura 1(b)) apresenta uma melhor qualidade, que se traduz em maior nitidez e menor quantidade de regiões saturadas ou sem contraste.

O problema da correção radiométrica tem sido objeto de estudo desde o início da utilização de imagens SAR. Dos cinco principais métodos de correção radiométrica mais conhecidos e mais utilizados, apenas um foi elaborado para plataformas aerotransportadas [1]. Todos os outros [2, 3, 4, 5] são voltados para plataformas orbitais, não havendo grande preocupação com a compensação dos movimentos da plataforma nem com a variação do ângulo de incidência e com o diagrama de irradiação da antena.

Além disso, todos esses métodos trabalham com a imagem SAR já geocodificada, enquanto que esse estudo visa trabalhar com a imagem de amplitude ainda em *slant range*, garantindo maior precisão por não trabalhar com erros propagados (dados interpolados).



Figura 1. Imagem SAR de Weiheim, Alemanha (AeS-1, banda X): antes (a) e depois da correção radiométrica (b).

Para uma correta análise quantitativa de imagens SAR e seu futuro uso cartográfico, faz-se necessária a realização da correção radiométrica, pois é um pré-requisito fundamental para que os parâmetros geofísicos sejam extraídos das imagens e possam ser comparados aos modelos teóricos. É também necessária quando estudos multi-temporais forem realizados e quando uma área for comparada com outras imagens da mesma área obtidas com outros sensores [6].

As operações da correção radiométrica envolvem um conjunto de medições realizadas antes e durante o vôo. Por exemplo, o diagrama de irradiação, que precisa de medições tanto antes quanto durante o vôo, devido a vários efeitos que podem influenciar as características da antena durante o vôo, como interferências na estrutura, distorções por efeitos térmicos, alta vibração durante a decolagem, entre outros.

Entretanto, é também necessário conhecer os ângulos de observação em azimute e em elevação, que dependem da direção de apontamento da antena e do perfil de altura do terreno.

Devem ser feitas medições precisas do comprimento de onda e da potência transmitida, do atraso interno do sistema (para estimar-se o parâmetro de *range delay* e, assim, a distância relativa entre o sensor e o alvo), do ganho eletrônico do receptor, das perdas do sistema, os efeitos da propagação e, o ganho do processador SAR.

Devido às incertezas de alguns dos parâmetros necessários para a correção radiométrica da imagem, a correção interna deve ser integrada à externa. Essa última é baseada nas medições feitas pelo uso de alvos especiais, como o refletor de canto. E tanto sistemas passivos quanto ativos podem ser usados. Esses sistemas ativos são receptores com alto ganho e boa isolamento polarimétrica, que permitem estimar as características da antena SAR.

2. Correção Radiométrica

A base desse método de correção radiométrica é a equação do radar [1, 7]:

$$P_d = \frac{P_t \cdot G_{Ar}^2(\theta_{el}) \cdot G_{Aa}^2(\theta_{az}) \cdot \lambda^3 \cdot G^E \cdot G_p \cdot \sigma^0}{(4\pi)^3 \cdot R^3 \cdot L_S} \quad (1)$$

Onde:

P_d : potência média recebida;

P_t : potência média da portadora (transmitida);

θ_{el} : ângulo de elevação da antena;

θ_{az} : ângulo da antena em azimute;

$G_{Ar}(\cdot)$: função ganho de transmissão e de recepção da antena em *range*:

$$G_{Aa}(\theta_{az}) = \int_{\theta_{az}-\Delta\theta}^{\theta_{az}+\Delta\theta} G_{Aa}(\theta) d\theta \quad (2)$$

$G_{aa}(\cdot)$: função ganho de transmissão e de recepção da antena em azimute;

$\Delta\theta$: ângulo de integração em azimute;

G^E : ganho eletrônico do receptor do radar;

G_p : constante do processador;

R : distância em *slant range*;

L_S : perda do sistema;

σ^0 : coeficiente de retroespalhamento:

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A_{cr}} = \sigma \cdot \frac{\sin \theta_{ir} \cdot \cos \theta_{ia}}{D_r \cdot D_a} \quad (3)$$

σ : RCS do alvo extenso contido em uma célula de resolução;

A_{cr} : área de uma célula de resolução;

θ_{ir} : ângulo de incidência local em *range*;

θ_{ia} : ângulo de incidência local em azimute;

D_r : dimensão radial da célula de resolução;

D_a : dimensão azimutal da célula de resolução.

Para uma correta correção, é muito importante determinar θ_{el} , θ_{az} , θ_{ir} e θ_{ia} . Com os dois primeiros ângulos, utilizando-se os diagramas de irradiação da antena, determina-se seu ganho; enquanto que, com os outros dois, calcula-se a área da célula de resolução A_{cr} . E, esses ângulos, por sua vez, dependem da posição real da antena, de sua direção de apontamento e, da posição do pixel (posição na imagem) na terra.

No caso orbital, devido à estabilidade da plataforma, a posição ideal é igual à posição real, enquanto que o apontamento da antena é definido pelo ângulo de visada do radar e pelo ângulo de depressão da antena.

Já no caso do radar aerotransportado, o dado SAR deve ser focado considerando a *trajetória ideal* de vôo. Cada pixel é então geocodificado utilizando-se a média da equação *Range-Doppler* em relação à *posição ideal*. Entretanto, do ponto de vista radiométrico, o pixel refere-se sempre à *posição real* da antena, ou seja, à posição onde a antena efetivamente transmitiu e recebeu. É por isso que os ângulos mencionados anteriormente devem ser determinados considerando-se a *posição e o apontamento reais* da antena. Assim, as variações de atitude do avião (rolamento, arfagem e guinada) devem ser totalmente levadas em consideração.

Além disso, como cada ponto na terra é associado com a elevação, os efeitos topográficos são diretamente incluídos na correção radiométrica. E com relação à derivação da área de espalhamento A_{cr} , diferentes métodos podem ser implementados quando tem-se disponível um DEM externo.

3. Método Proposto

Este algoritmo implementado, de correção radiométrica, no início, é independente da geocodificação, ou seja, considera apenas os movimentos do avião, os diagramas de irradiação da antena em elevação e em azimute, e o ângulo de incidência. Posteriormente, considera a distância até o alvo.

Sua ação principal é construir uma imagem focada (*foc image*), em que cada pixel contém um fator de correção do valor radiométrico do pixel correspondente da imagem SAR (imagem de amplitude). Assim, a imagem SAR será multiplicada por essa imagem (*foc image*), ponto a ponto, tendo como resultado uma imagem SAR radiometricamente corrigida, no que se refere à influência dos diagramas de irradiação da antena, das atitudes da aeronave e dos ângulos de incidência.

Para isso, em cada posição em *range*, uma simulação de *chirp* em azimute ($C0$) é criada, usando todos os parâmetros do radar. Posteriormente, duas seqüências de *chirps* ($C1$ e $C2$) são criadas (Figura 2), com sucessivas cópias de $C0$, sendo que os *chirps* em $C2$ são atrasados de $T_C/2$ em relação a $C1$, onde T_C é o período de repetição (em número de amostras) dos *chirps* concatenados um após o outro, ou seja, o tamanho dos *chirps*. Essas duas seqüências de *chirps* serão, mais adiante, somadas uma à outra. E a razão de serem duas seqüências é diminuir a interferência (*speckle*) de um *chirp* no seu adjacente (chegou-se a esse número de maneira empírica), pois assim, os *chirps* ficam mais distantes um do outro antes de serem processados.

Nesse algoritmo, trabalha-se com *arrays* de, no máximo, n posições. Seja p_{AZ} o *presuming factor* em azimute, p_{AZml} o *presuming factor* em azimute após o *multilook*, n_{CHI} o número máximo de *chirps* que podem ser concatenados em $C1$ e $C2$ ($n_{CHI} = n/T_C$) e, $T_{Cmax \cdot p_{AZml}}$ o tamanho máximo em amostras do *chirp* em azimute considerando todas as linhas em *range*. Então, pode-se definir n_{CHIr} como a razão entre o tamanho máximo do *chirp* em azimute e o tamanho do *chirp* em azimute para uma posição em *range* genérica ($n_{CHIr} = T_{Cmax \cdot p_{AZml}}/T_C$).

Seja n_{AZ} o número de amostras em azimute da imagem SAR, então $n_{CHI_t} = n_{AZ \cdot p_{AZml}}/T_C$ ($n_{CHI_t} < n$) é o número total de *chirps* concatenados em $C1$ e em $C2$, separadamente, que cobrirá toda a imagem SAR em azimute. Em outras palavras, n_{CHI_t} amostras da imagem SAR correspondem ao centro dos *chirps* em $C1$ e $C2$. Assim, as definições precisas de $C1$ e $C2$ são:

$$C1(k) = \sum_{i=-n_{CHIr}}^{n_{CHI_t} + n_{CHIr}} C0(k - iT_C + T_{C_{MAX}} p_{AZ_{ml}} - T_C/2) \quad (4)$$

$$C2(k) = \sum_{i=-n_{CHIr}}^{n_{CHI_t} + n_{CHIr}} C0(k - iT_C + T_{C_{MAX}} p_{AZ_{ml}}) \quad (5)$$

Das definições anteriores de $C1$ e $C2$ e das definições de n_{CHIr} e n_{CHI_t} , verifica-se que: há n_{CHIr} *chirps* no início de $C1$ e $C2$; n_{CHIr} *chirps* no fim de $C1$ e $C2$; e $n_{CHI_t}+1$ *chirps* no centro de $C1$ e de $C2$. Os $n_{CHI_t}+1$ *chirps* no centro compõem a parte útil de $C1$ e $C2$ (os centros dos *chirps* correspondem aos pixels na imagem SAR), enquanto que n_{CHIr} *chirps* no início e no fim são usados para a consideração de borda e não são usados na imagem simulada *foc image*. A Figura 2 também ajuda a entender a razão de n_{CHIr} e $T_{Cmax \cdot p_{AZml}}$. Os índices negativos são a parte circular que deveriam se localizar na extrema direita do *array*. Os primeiros dois sinais são os *arrays* $C1$ e $C2$, mas não deslocados para a direita. Já os dois últimos sinais são $C1$ e $C2$ exatamente como devem ser, ou seja, já deslocados.

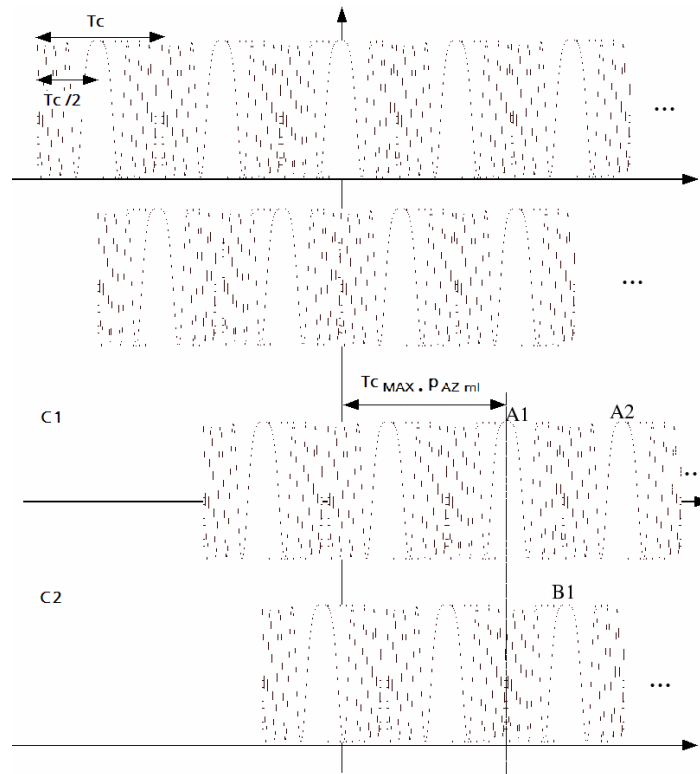


Figura 2. Construção dos arrays $C1$ e $C2$.

Somente as posições em azimute $A1, A2, \dots, An$ de $C1$ (posições centrais dos *chirps* de $C1$) e $B1, B2, \dots, Bn$ de $C2$ (posições centrais dos *chirps* de $C2$) serão correspondentes às posições na imagem SAR, assim, as posições em azimute da imagem de amplitude também são amostradas com período de amostragem $Tc/2$. Vê-se que os n_{CHIR} *chirps* e a distância $T_{Cmax} \cdot p_{AZ ml}$ são usados para garantir uma borda que será extraída após o processamento (convolução). Dessa forma, as $n_{CHIR}+1$ posições $A1, A2, \dots, An_{CHIR}+1$ de $C1$ mais as $n_{CHIR}+1$ posições $B1, B2, \dots, Bn_{CHIR}+1$ de $C2$ são usadas, ou seja, $2n_{CHIR}+2$ posições em azimute da imagem SAR para cada posição em *range*.

Depois da construção de $C1$ e $C2$, os arrays EL e AZ são construídos, utilizando-se os ângulos de rolagem, arfagem e guinada, e calculando o ângulo de incidência (utilizando-se um modelo de elevação, como o SRTM, por exemplo, em *slant range*). Cada elemento do array EL contém a posição correspondente a um ganho do diagrama de irradiação da antena em elevação (AGP_{EL}) que corrigirá o ganho errado da imagem SAR para esta posição em azimute (para cada linha em *range*). O array AZ é análogo ao EL , mas para o diagrama de irradiação da antena em azimute (AGP_{AZ}). Com EL e AZ , cria-se o array $CAL = (AGP_{EL}[EL] \cdot AGP_{AZ}[AZ])^{-1}$.

Em seguida, $C1$ e $C2$ são processados separadamente: são multiplicados por CAL separadamente e esses dois produtos são individualmente focados. Finalmente, eles são adicionados formando o sinal $FOC0$ (Figura 3), que contém as $2n_{CHIR}+2$ posições da imagem SAR em azimute amostradas $A1, A2, \dots, An_{CHIR}+1$ e $B1, B2, \dots, Bn_{CHIR}+1$, para cada linha em *range*.

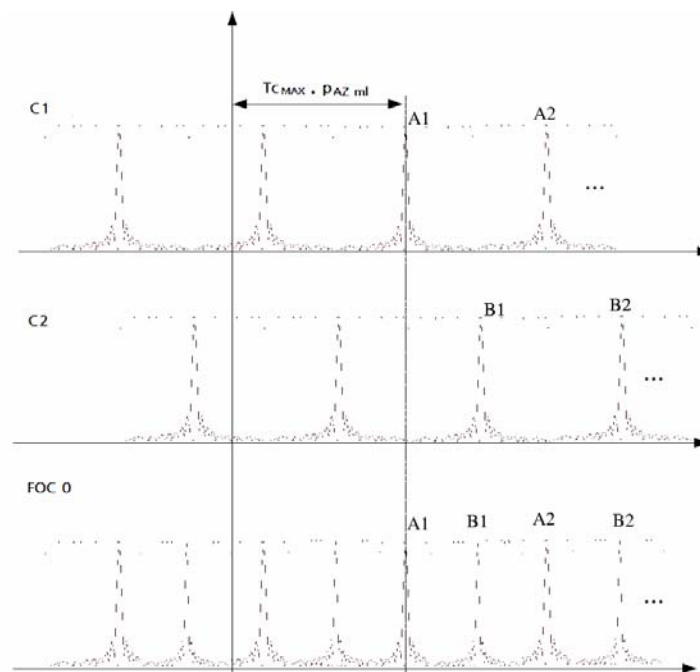


Figura 3. Construção do $FOC0$.

Finalmente, é montada uma matriz (CAL_{FOC}) das dimensões da imagem SAR, em que cada linha é o array $FOC0$ calculado para cada posição em *range*. E CAL_{FOC} é a imagem artificial que será multiplicada à imagem de amplitude para realizar-se a correção radiométrica.

Mas, antes de se fazer essa multiplicação, a imagem CAL_{FOC} , juntamente com a própria imagem de amplitude, é geocodificada. Assim, a correção radiométrica, propriamente dita, é realizada apenas na imagem SAR já geocodificada.

Finalmente, é feita a correção devido à atenuação proporcional ao cubo da distância entre a antena e o alvo.

3. Resultados

Utilizou-se para testes uma área na região centro-oeste do Brasil, bem plana, com uma inclinação média de 1m a cada 1km. Esse tipo de cenário faz com que erros de correção não sejam confundidos com o relevo.

A imagem de amplitude, em *slant range*, inicialmente sem correção radiométrica é a seguinte:

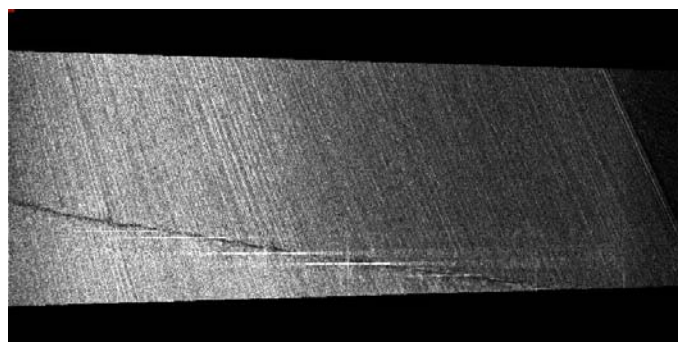


Figura 4. Imagem SAR, em *slant range*, sem correção radiométrica.

Na Figura 7(a) tem-se a mesma imagem já geocodificada, mostrando como ficaria a imagem SAR final sem a correção radiométrica.

Como explicado no item anterior, a imagem de correção, CAL_{FOC} , é calculada ainda em *slant range*. Para a imagem anterior, essa matriz CAL_{FOC} seria a seguinte:

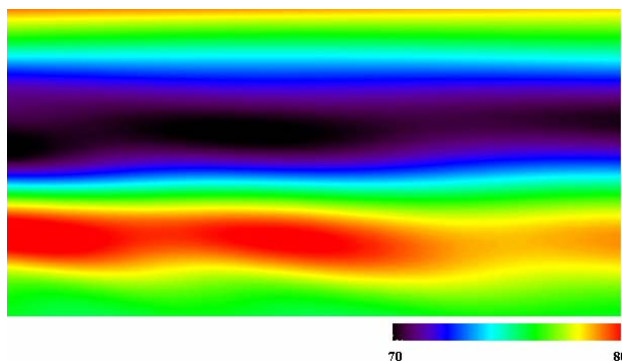


Figura 5. Imagem de correção, CAL_{FOC} , em *slant range*.

Para uma melhor compreensão, tem-se na Figura 6(a) a mesma imagem CAL_{FOC} , mas geocodificada.

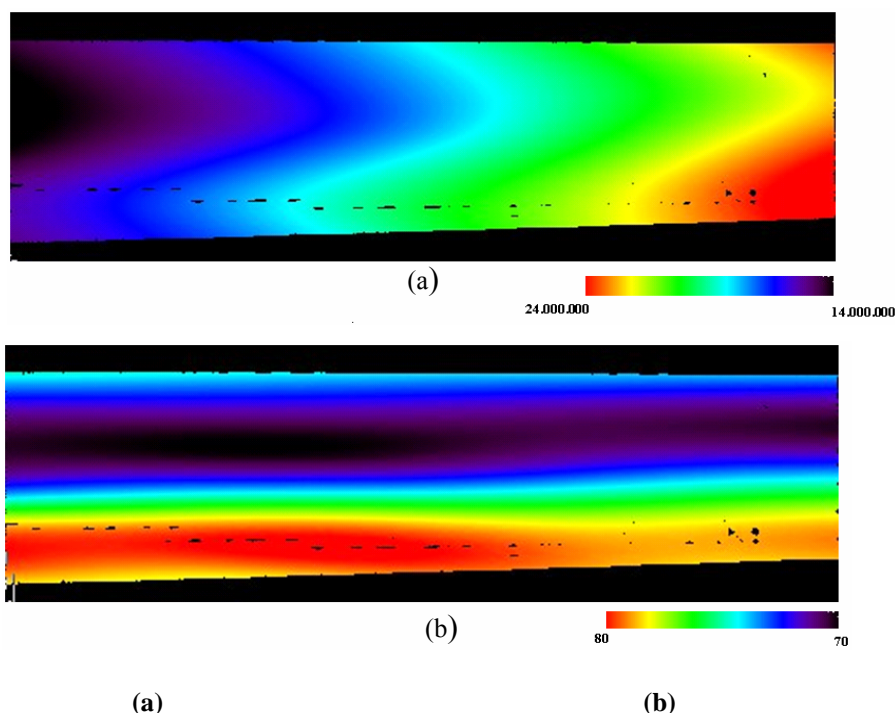


Figura 6. Imagem CAL_{FOC} geocodificada (a) e composição das matrizes de correção, geocodificadas, CAL_{FOC} e R^3 (b).

O próximo passo é a correção radiométrica devido à atenuação proporcional ao cubo da distância entre a antena e o alvo. Construindo-se uma única matriz de correção geocodificada, tem-se a Figura 6(b).

E, finalmente, tem-se na Figura 7(b) a imagem SAR final, geocodificada, corrigida radiometricamente.

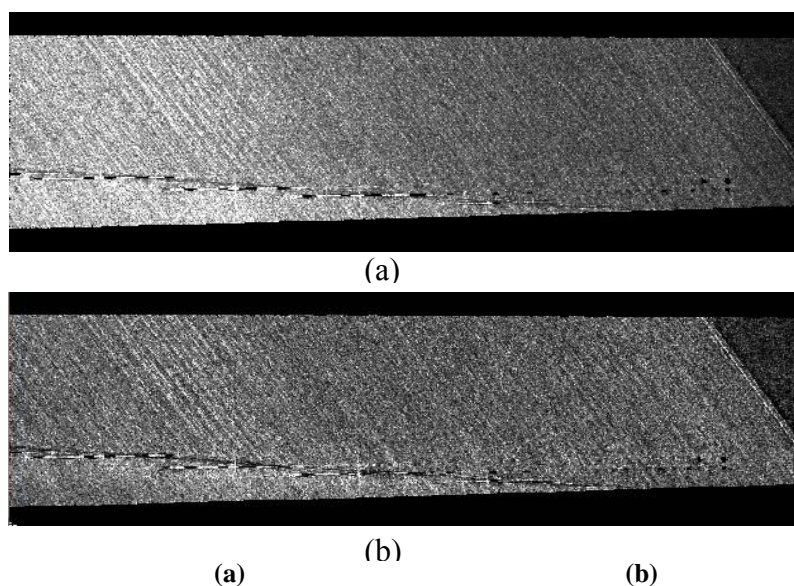


Figura 7. Imagem SAR, geocodificada, antes (a) e após (b) a correção radiométrica.

4. Conclusão

Neste trabalho, estudou-se e se implementou um método de correção radiométrica, baseado na equação do radar, ou seja, levando em conta os diversos ganhos e atenuações do sinal. Assim, foi necessário levar em conta quatro itens: o diagrama de irradiação da antena, os movimentos da aeronave, o ângulo de incidência e a distância entre o alvo e a antena.

E, através dos diversos testes realizados, entre eles o apresentado neste trabalho, mostrou-se que o método é bastante eficaz, satisfazendo todas as necessidades dos usuários de imagens SAR, no que diz respeito ao quesito radiométrico, tornando possível sua utilização para finalidades cartográficas, como por exemplo, classificação, planimetria, reconhecimento de linhas de alta e baixa tensão, edificações e massa d'água.

Mas, salienta-se que esse método funciona apenas para o *forward geocoding*, ou seja, não funcionará para o *backward geocoding*, precisando de algumas alterações para tal. Sugere-se então, como trabalho futuro, o desenvolvimento de um método de correção radiométrica voltado para isso.

Referências

- [1] HOLECZ, F.; PASQUALI, P.; MOREIRA, J.; NÜESCH, D. Rigorous Radiometric Calibration of Airborne AeS-1 InSAR DATA. **Proceedings of Intern. Geosc. and Remote Sens. Symposium**, Seattle, USA, July, 1998.
- [2] FREEMAN, A.; MOGHADDAM, M.; ZINK, M.; ZEBKER, H. Radiometric Correction of SAR Images of Varying Terrain Heights. **Proc. IGARSS '92**, Houston, Texas, p.271-273, 1992.
- [3] MEIER, E.; HOLECZ, F.; NÜESCH, D. Radiometric Corrections in Slant Range and Geocoded SAR Images Considering Topographic Effects. **Proc. IGARSS '92**, Houston, Texas, p.620-622, 1992.
- [4] SHIMADA, M.; HIROSAWA, H. Slope Corrections to Normalized RCS Using SAR Interferometry. **IEEE Trans. on Geoc. and Rem. Sensing**, v.38, n.3, p.1479-1484, May 2000.
- [5] SMALL, D.; MEIER, E.; NÜESCH, D. Robust Radiometric Terrain Correction for SAR Image Comparisons. **Proc. IGARSS '04**, Anchorage, Alaska, p.1730-1733, 2004.
- [6] FRANCESCHETTI, G; LANARI, R. **Synthetic Aperture Radar Processing**. CRC Press LCC, Boca Raton, 2000.
- [7] FREEMAN, A. SAR Calibration: an Overview. **IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.**, v.30, n.6, 1992.