

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE GEOCODIFICADOR DE IMAGENS SAR

KARLUS ALEXANDER CÂMARA DE MACEDO
DAVID FERNANDES

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) – Centro Técnico Aeroespacial (CTA)
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 12228-900 - São José dos Campos - SP, Brasil
Tel.: (12) 3947-6807, Fax: (12) 3947-5878
{karlus, david}@ele.ita.br

Abstract. This work presents a methodology to evaluate the accuracy of a Synthetic Aperture Radar (SAR) image geocoding process. Based on the SAR imaging parameters, a simulated sensor trajectory and point target is generated. The proposed methodology is able to measure the geolocation error due a SAR Geocoding processor. The methodology is applied to evaluate the accuracy of a particular SAR geocoding processor.

Keywords: SAR image geocoding, SAR geocoding, SAR images, geolocation.

1. Introdução

Geocodificação de imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR) consiste na transformação desta imagem, originalmente em coordenadas do Radar (eixos radial e azimutal), em uma projeção cartográfica.

O método tradicional de avaliação de um processo de geocodificação SAR é baseado na análise da acurácia geométrica das imagens geocodificadas (Schreier, 1993). Os erros medidos são resultantes do processo de geocodificação utilizado e de todas as imprecisões e incertezas dos parâmetros utilizados, tais como, erros nas medidas de posição e velocidade do sensor (dados efemérides), imprecisão do Modelo Digital de Elevação (MDE), erros nos parâmetros da imagem SAR (como frequência Doppler centróide e espaçamento entre pixels). Assim sendo, quando se avalia a geocodificação a partir de imagens geocodificadas está-se avaliando também o processo de geração do MDE, o sistema de navegação, o processo de estimação da frequência Doppler centróide entre outros processos, não sendo possível avaliar o erro oriundo tão somente do método de geocodificação SAR empregado.

Para se ter um processo com os erros controlados, baseado na formulação *Range-Doppler* apresentado na seção 2, simula-se na seção 3 a trajetória do sensor SAR e alvos pontuais na imagem com as suas coordenadas conhecidas e vinculadas com os parâmetros da imagem que foram estabelecidos a priori. Com isso é possível obter-se as coordenadas geográficas (latitude, longitude, altitude) e as coordenadas radar (radial, azimute) verdadeiras dos alvos na imagem. Na seção 4 é apresentado a metodologia para avaliação de processos de geocodificação. Na seção 5 é realizada a avaliação de precisão, através da metodologia proposta, do geocodificador desenvolvido por Macedo (2001).

2. Formulação *Range-Doppler*

A geometria básica de imageamento SAR, **Figura 1**, consiste de uma plataforma (aeronave ou satélite) se movendo com velocidade V_S na altitude h , com uma antena que radia pulsos eletromagnéticos, de comprimento de onda λ e duração t_p , sobre uma área na superfície da Terra definida pelo feixe de iluminação da antena (Curlander, 1991). A direção do voo é denominada direção azimutal, e a direção de propagação do sinal transmitido é denominada direção radial.

A medida que o radar se move emitindo pulsos, uma seqüência de sinais ecos é recebida resultando em um sinal bidimensional que é função da distância radial R e do tempo azimutal t .

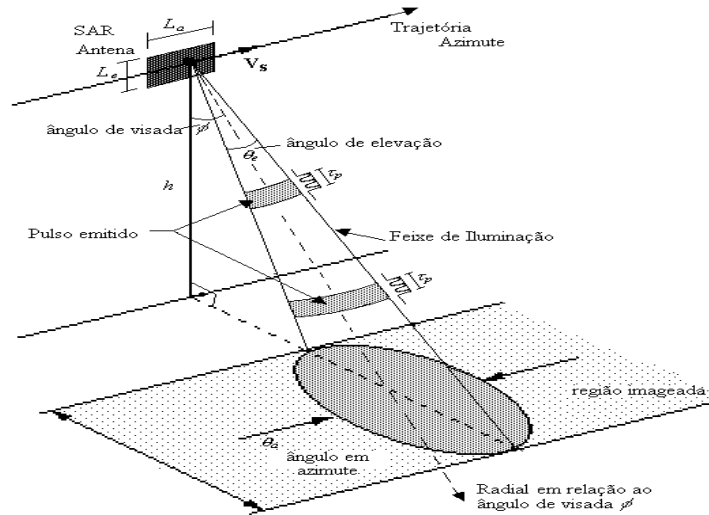


Figura 1: Geometria de imageamento SAR (visada lateral).

A frequência Doppler do sinal eco em azimute, f_D , depende da velocidade, altitude e direção de apontamento da antena. A equação *Doppler* (1) descreve a variação desta frequência relativa a um alvo pontual na superfície da terra, definido pelo vetor posição \mathbf{P} e velocidade \mathbf{V}_P , sendo \mathbf{S} e \mathbf{V}_S , respectivamente, o vetor posição e o vetor velocidade da antena do sensor radar.

$$f_D = \frac{2}{\lambda} \frac{(\mathbf{V}_S - \mathbf{V}_P) \cdot (\mathbf{S} - \mathbf{P})}{|\mathbf{S} - \mathbf{P}|} \quad (1)$$

O módulo dos vetores posição \mathbf{S} do sensor e \mathbf{P} do alvo forma a equação *Range* (2).

$$R = |\mathbf{S} - \mathbf{P}| \quad (2)$$

Figura 2 mostra a aquisição dos sinais ecos (dados brutos), que são detectados de forma coerente, obtendo-se assim sinais ecos complexo $r(\cdot) + j \cdot q(\cdot)$. Este sinal é então digitalizado e rearranjado na forma matricial, com índices i (direção radial) e n (na direção azimutal), para posterior processamento.

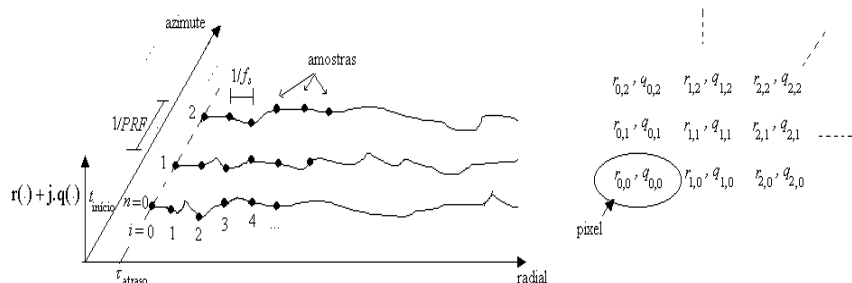


Figura 2: Dados Brutos.

Os dados da imagem SAR são separados no tempo na direção azimutal por $T_0 = 1/PRF$ (tempo de repetição de pulsos) e pelo período de amostragem $T_s = 1/f_s$ na direção radial.

A relação entre a distância R e o tempo azimutal t com os índices i e n da matriz de dados é dado por:

$$R = c[\mathbf{t}_{atraso} + i / f_s] / 2 \quad (3)$$

$$t = t_{início} + n / PRF \quad (4)$$

onde \mathbf{t}_{atraso} é o instante radial do início da amostragem e $t_{início}$ é o instante em azimute referente a aquisição da primeira linha na direção radial e c é a velocidade da luz.

3. Simulação de Alvos Pontuais em Imagens SAR

A trajetória ideal da plataforma de um sensor SAR pode ser descrita como uma rota definida na superfície de um elipsóide de revolução. A posição do sensor dependerá do elipsóide de referência escolhido (por ex., WGS84), podendo a posição no espaço do sensor ser dada em um sistema de referência solidário a Terra de coordenadas cartesianas (x, y, z) ou em coordenadas geográficas (latitude \mathbf{f} , longitude \mathbf{q} altitude h). A posição do sensor será dada pelas seguintes equações de posição em função do tempo t (Farrell, 1976):

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{f}(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_N(\mathbf{x})}{\mathbf{r}_m(\mathbf{f}) + h(\mathbf{x})} d\mathbf{x} \quad (5)$$

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{V_L(\mathbf{x})}{[\mathbf{r}_p(\mathbf{f}) + h(\mathbf{x})] \cos \mathbf{f}(\mathbf{x})} d\mathbf{x} \quad (6)$$

$$h(t) = h(t_0) - \int_{t_0}^t V_V(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (7)$$

onde: t_0 é um instante inicial, V_N é a velocidade para o Norte, V_L é a velocidade para o Leste, V_V é a velocidade na direção vertical local, $\mathbf{r}_p(\cdot)$ é o raio de curvatura principal e $\mathbf{r}_m(\cdot)$ é o raio de curvatura meridional do elipsóide de referência.

Definindo-se em um instante inicial t_0 uma latitude, longitude, altitude e velocidade para um certo sensor SAR, tem-se os dados de posição do sensor resolvendo as equações de (5) a (6) para um instante de tempo t qualquer.

Tomando-se os dados da posição do sensor, em coordenadas cartesianas, $\mathbf{S}(S_x(t), S_y(t), S_z(t))$ e de velocidade $\mathbf{V}_S(V_{sx}(t), V_{sy}(t), V_{sz}(t))$ simulados como sendo a trajetória nominal do sensor SAR, arbitra-se uma posição geográfica $\mathbf{P}(P_x, P_y, P_z)$, em coordenadas cartesianas, ou $\mathbf{P}(\mathbf{f}, \mathbf{q}, h)$, em coordenadas geográficas de uma alvo, de modo que este seja iluminado pela antena SAR.

A posição azimutal do alvo na imagem SAR formada corresponde ao instante em que o centro do feixe da antena aponta para o alvo. Quando o centro do feixe da antena está sobre o alvo tem-se a frequência Doppler centróide, f_{Dcent} . Definindo a frequência Doppler centróide e o comprimento de onda desejados resolve-se a equação Doppler para cada posição do sensor de forma a encontrar-se o instante t_{cent} no qual o alvo está no centro do feixe da antena. Este procedimento é ilustrado na **Figura 3**.

A frequência Doppler calculada a cada posição do sensor é comparada com a frequência Doppler centróide estipulada. Quando a frequência Doppler centróide for igual ou estiver entre a frequência Doppler calculada na posição anterior e posterior da trajetória do sensor, então temos que o instante de apontamento da antena no alvo se encontra entre os instantes referentes a estas duas posições (**Figura 3**). Interpolando linearmente a frequência Doppler entre esses dois instante obtém-se uma estimativa da frequência Doppler centróide desejada e consequentemente o instante de apontamento da antena no alvo.

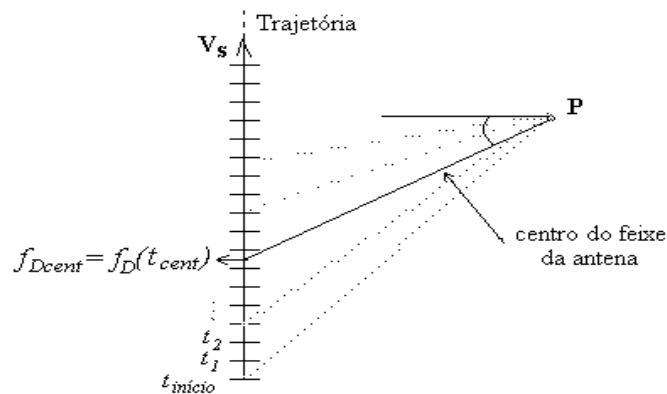


Figura 3: Encontro do instante de iluminação.

Com o instante de apontamento t_{cent} encontrado, calcula-se a distância radial do alvo, $R_{cent} = |\mathbf{S}(t_{cent}) - \mathbf{P}|$. Pode-se então arbitrar o índice i do pixel na radial e o índice n do pixel em azimute que se deseja ter o alvo pontual na imagem SAR. O instante azimutal t_{inicio} que corresponderá a primeira linha da imagem, e o atraso t_{atraso} correspondente ao primeiro pixel da imagem, conforme ilustrado na Figura 2, serão dados respectivamente por:

$$t_{inicio} = t_{cent} - i / PRF \quad (8)$$

$$t_{atraso} = 2R_{cent} / c - n / f_s \quad (9)$$

Se $i=n=0$ o alvo está em um dos cantos da imagem. Para uma imagem de I pixels na radial e N pixels em azimute com o alvo no seu centro tem-se $i=(I-1)/2$ e $n=(N-1)/2$. Através de (8) e (9) pode-se gerar alvos em diferentes posições da imagem e desta maneira avaliar alvos mais próximos ou mais afastados do sensor, bem como alvos em diferentes posições azimutais.

Para que os dados de posição e velocidade estejam sincronizados com as posições radiais e azimutais estipuladas é necessário simular novamente os dados de trajetória de forma que se obtenha a posição do sensor em t_{inicio} , e que se tenha N dados de trajetória espaçados de $1/PRF$.

Com a nova simulação da trajetória obtém-se as coordenadas radial e azimutal precisas de um alvo pontual com posição geográfica perfeitamente conhecida, tendo-se apenas uma pequena imprecisão em azimute devido ao fato da frequência Doppler centróide do alvo imageado não necessariamente coincidir com os instantes de amostragem dos dados efemérides (posição e velocidade) do sensor. Assim sendo, a frequência Doppler centróide desejada no início da simulação não é igual a frequência Doppler centróide efetivamente simulada. Com esta diferença de frequência Doppler centróide Δf_{Dc} , o erro em azimute Δn em pixels será estimado por (Curlander, 1991):

$$\Delta n = \Delta f_{Dc} PRF / f_r \quad [\text{pixels}] \quad (10)$$

onde f_r é a taxa de variação de frequência Doppler.

Na simulação com dados típicos de um SAR desenvolvida na seção 5, onde o dados de trajetória estão espaçados de $1/PRF$, a precisão da frequência Doppler centróide é da ordem de 1×10^{-5} Hz e o erro de posição azimutal é da ordem de 1×10^{-5} a 1×10^{-3} pixels. Este erro é inferior ao erro que se deseja mensurar e analisar que é da ordem de 0,05 pixels. No entanto, caso se deseje gerar frequências Doppler centróide mais precisas pode-se incrementar a frequência de amostragem dos dados de trajetória.

4. Metodologia de Avaliação da Precisão da Geocodificação

Comparando as coordenadas radial, azimute ou geográfica (i_c, n_c e $\mathbf{P}(f_c, q, h_c)$) resultante de um processo de geocodificação SAR de uma alvo, com as coordenadas verdadeiras (i_v, n_v ou $\mathbf{P}(f_v, q, h_v)$) obtidas por intermédio da simulação descrita anteriormente, tem-se o erro proveniente do processo de geocodificação.

Utilizando na geocodificação os mesmos parâmetros envolvidos na simulação de formação da imagem é possível identificar os erros do processo de geocodificação resultantes devido unicamente ao método de geocodificação utilizado. Caso se deseje ainda mensurar o comportamento do geocodificador com a variação dos parâmetros ou/e da trajetória, basta inserir erro no parâmetro de entrada do geocodificador ou/e erro ou perturbação na trajetória simulada.

A **Figura 4** mostra o esquema de avaliação de precisão para um processo de geocodificação inversa (conversão de coordenadas geográfica do alvo para radial e azimute da imagem) e direta (conversão da radial e azimute da imagem para coordenadas geográficas).

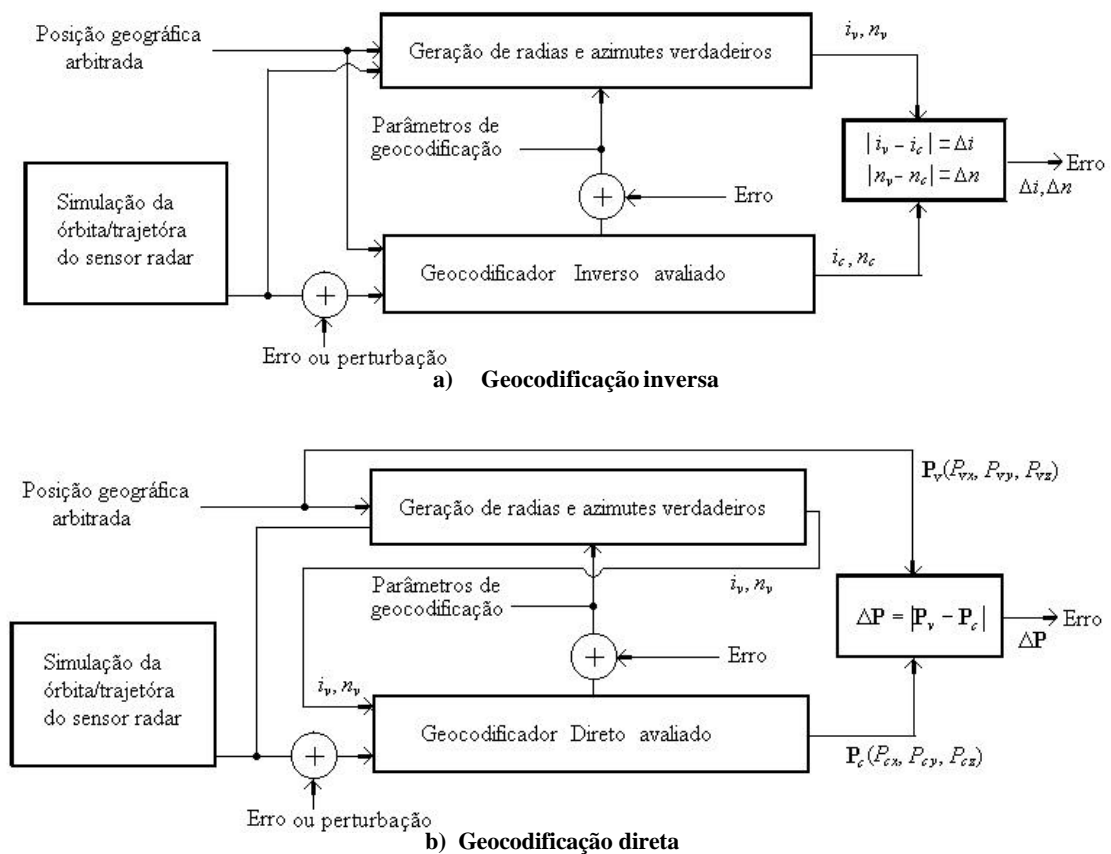


Figura 4: Esquema de avaliação da precisão da geocodificação.

No esquema da **Figura 4** um alvo em uma mesma posição geográfica, pode ser representado em diferentes posições na imagem, utilizando-se das expressões (8) e (9). A avaliação do geocodificador é feita tomando-se a diferença entre os coordenadas verdadeiras (i_v, n_v ou $\mathbf{P}(P_{vx}, P_{vy}, P_{vz})$), oriunda da simulação, e as calculadas (i_c, n_c e $\mathbf{P}(P_{cx}, P_{cy}, P_{cz})$) encontradas pelo processo de geocodificação analisado. Assim sendo para a geocodificação direta temos:

$$\Delta \mathbf{P} = |\mathbf{P}_v - \mathbf{P}_c| \quad (11)$$

O deslocamento d_m , em unidades de comprimento, devido ao erro de geolocalização no processo de geocodificação direta é dado então por:

$$d_m = |\Delta \mathbf{P}| = \sqrt{\Delta P_x^2 + \Delta P_y^2 + \Delta P_z^2} \quad (12)$$

Para geocodificação inversa temos em pixels:

$$\Delta i = |i_v - i_c| \text{ [pixels]} \quad (13)$$

$$\Delta n = |n_v - n_c| \text{ [pixels]} \quad (14)$$

para obter Δi e Δn em unidades de comprimento basta multiplicá-los respectivamente pelo espaçamento radial e azimute entre pixels.

O deslocamento d em pixels devido ao erro de geolocalização no processo de geocodificação inversa é dado em pixels por:

$$d = \sqrt{\Delta i^2 + \Delta n^2} \text{ [pixels]} \quad (15)$$

5. Avaliação da Precisão de um Geocodificador

Para analisar a potencialidade do método proposto fez-se a avaliação da precisão do geocodificador SAR desenvolvido por Macedo (2001) para um sensor SAR orbital e outro aerotransportado. Para o sensor aerotransportado considerou-se também o caso de uma trajetória com perturbação. O geocodificador avaliado implementa a geocodificação inversa e prevê a aproximação da trajetória do sensor por um polinômio primeira ordem (Geocodificador de Primeira Ordem) ou segunda ordem (Geocodificador de Segunda Ordem).

Para o SAR orbital, com trajetória nominal sem perturbação, considerou-se um alvo na posição geográfica $14,921^\circ$ de latitude sul, $37,211^\circ$ de longitude oeste e 481,66m de altitude e os seguintes parâmetros: início do imageamento $t_{início} = 0,591s$; atraso do sinal eco $t_{atraso} = 0,0060098s$; velocidade do sensor $V_L = V_V = 0m/s$ $V_N = 790.935,63m/s$; latitude do sensor de 15° sul e longitude de 41° oeste em $t_0 = 0s$; altitude do sensor $h = 790.935,64m$; frequência Doppler centróide $f_{Dcent} = 407,501Hz$; comprimento de onda $\lambda = 0,0565m$; espaçamento radial = 7,905m e espaçamento azimutal = 4,226m. A **Figura 5** apresenta os resultados de precisão do geocodificador para uma imagem (I \times N) de 1025 \times 2049 pixels. O resultado tem como base a interpolação do resultado de precisão para vinte e cinco coordenadas radial e azimute distribuídas na imagem de 1025 \times 2049 pixels. **Figura 5a** mostra a precisão do geocodificador de primeira ordem e **Figura 5b** mostra a precisão do geocodificador de segunda ordem.

Constata-se pelas figura **Figura 5** que a variação do erro na direção radial é praticamente constante, enquanto que em azimute tem-se um erro maior de geolocalização nos alvos nos extremos azimutais da imagem. Este erro é causado fundamentalmente pela aproximação polinomial da trajetória que o geocodificador utiliza. Para uma trajetória orbital aproximada por uma função linear (**Figura 5a**) verificou-se uma diferença entre o valor real de velocidade (V_{Sx} , V_{Sy} e V_{Sz}) e o aproximado da ordem de 3m/s, causando um deslocamento d de aproximadamente 115 pixels, inviabilizando deste modo a geocodificação orbital com aproximação de primeira ordem para a trajetória do sensor. Utilizando-se uma função polinomial de segunda ordem para descrever a trajetória tem-se um erro de geocodificação de apenas 0.02 pixels nos extremos da imagem.

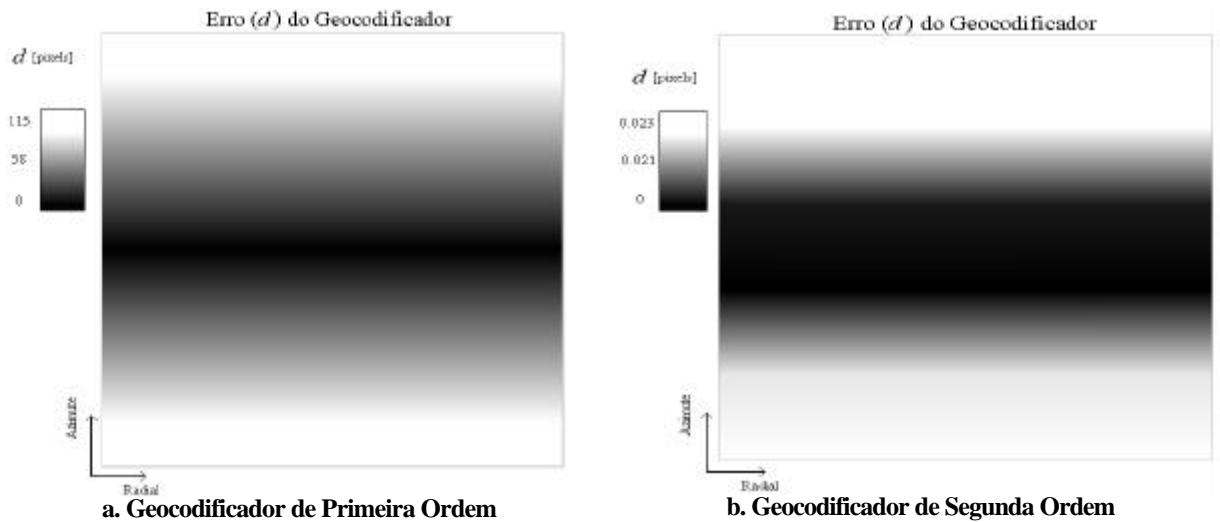


Figura 5 Precisão do Geocodificador avaliado para um sensor SAR orbital.

Para o SAR aerotransportado, com trajetória nominal sem perturbação, considerou-se um alvo na mesma posição e altitude anteriores e os seguintes parâmetros: início do imageamento $t_{início} = 0,0093723$ s; atraso do sinal eco $t_{atraso} = 3,6516 \times 10^{-5}$ s; velocidade do sensor $V_L = V_V = 0$ m/s $V_N = 121,78$ m/s; latitude do sensor de $14,92^\circ$ sul e longitude de $37,25^\circ$ oeste em $t_0 = 0$ s; altitude do sensor $h = 4.000$ m; frequência Doppler centróide $f_{Dcent} = 6,991$ Hz; comprimento de onda $\lambda = 0,05654$ m; espaçamento radial = $1,309$ m; espaçamento azimutal = $0,374$ m.

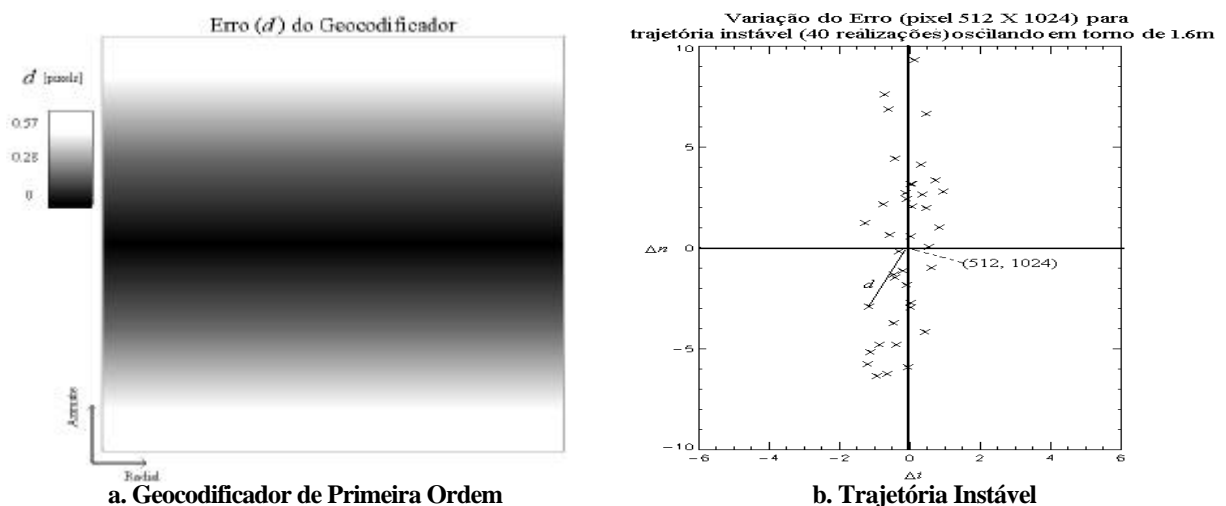


Figura 6: Precisão do Geocodificador avaliado para um sensor SAR Aerotransportado.

A **Figura 6a** apresenta os resultados de precisão, interpolada, do geocodificador SAR analisado para vinte e cinco coordenadas radial/azimute distribuídas em uma imagem SAR aerotransportada de 1025×2049 pixels.

Perturbando-se a trajetória do SAR aerotransportado para analisar o efeito de uma trajetória instável adicionou-se à trajetória nominal do SAR aerotransportado realizações de um processo aleatório passa faixa $N_o(t)$ (Peebles, 1993) com as seguintes características: flutuação média: 1,6m, frequência espectral média da flutuação: 0,0363Hz e espalhamento espectral da flutuação: 0,1608Hz. Para todas as realizações de ruído faz-se $N_o(t_{cent}) = 0$ de modo que os parâmetros e coordenadas simuladas anteriormente no instante centróide t_{cent} continuem os mesmos. Para 40 realizações de trajetória instável obteve-se, para um alvo pontual no centro da imagem (pixel 512×1024), um erro de geolocalização no intervalo [$1.97 \text{ pixels} \leq d \leq 4.96 \text{ pixels}$] com 95% de confiança (**Figura 6b**).

Para imagens SAR de sensores aerotransportado a aproximação linear é precisa o suficiente para geocodificação, estando o erro nas extremidades de uma imagem de 1025×2049 pixels na ordem de 0,5 pixels (**Figura 6a**).

6. Conclusão

A metodologia para avaliação da precisão de geocodificadores SAR apresentada mostrou ser prática e eficiente para analisar a precisão da geocodificação SAR através do controle dos parâmetros de imagem e sensor SAR utilizados no processo de geocodificação.

A metodologia apresentada pode ser utilizada ainda para avaliar os erros devido a certas imprecisões de dados ou parâmetros de geocodificação. Trabalhos futuros incluem a análise da influência, na precisão da geocodificação, da taxa de amostragem dos dados de trajetória, dos erros no Modelo Digital de Elevação (MDE) e dos erros nos parâmetros de geocodificação.

Agradecimentos

Ao Programa CNS-ATM do Termo Aditivo I da Cooperação CTA-DECEA, desenvolvido no ITA, pela bolsa de estudos concedida no período de março a setembro de 2002. A ATECH e CCSIVAM pelo auxílio concedido através do Termo Aditivo I da Cooperação CTA-CCSIVAM.

Referências

Curlander, P.J.; McDonough, R. N. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. New York: Wiley Series & Sons, 1991. 260 p.

Farrell, J. L. *Integrated Aircraft Navigation*. New York: Academic Press, 1976.

Macedo, K. A. C. *Development of a SAR Geocoding Processor*. Master (Thesis) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2001. 130 p.

Peebles, P. Z. *Probability, Random Variables and Random Signal Principles*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1993. 401 p.

Schreier, G. *SAR Geocoding: Data and Systems*. Karlsruhe: Wichmann, 1993. 435 p.