

Processador SAR - INPE/DLR

JOSÉ CLAUDIO MURA¹
JOÃO ROBERTO MOREIRA²

¹ INPE--Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515, 12227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil
mura@dpi.inpe.br

² DLR- Deutsche Forschungsanstalt fur Luft und Raumfahrt
Institut fur Hochfrequenztechnik - D-82230 Oberpfaffenhofen
hf39@vm.op.dlr.de

Abstract. A SAR (Synthetic Aperture Radar) Processor for airborne and spaceborne platforms is presented. This SAR Processor is based on a hybrid correlation algorithms. Look filters are used to increase its performance. A bidimensional azimuth reference function is used in order to correct the range migration during de azimuth compression.. The SAR Processor is evaluated with imagens from the sensors E-SAR (airborne) and ERS-1 (spaceborne).

Keywords: SAR, radar, processor

1 Introdução

Este trabalho é baseado nos resultados obtidos em cooperação com o Instituto de Alta Freqüência (NE-HF) do DLR (Deutsche Forschungsanstalt fur Luft und Raumfahrt), onde foi desenvolvido um Processador SAR (Synthetic Aperture Radar) para plataformas aerotransportadas e orbitais, Mura (1993).

O Processador SAR utiliza uma correlação simples para a compressão dos dados na direção perpendicular ao vôo, e uma correlação híbrida para compressão dos dados na direção de vôo. Também foram utilizados filtros de visadas para incrementar a performance de processamento. A compensação de movimento da plataforma (no caso aerotransportado) é obtida através da utilização do método RDM (Reflectivity Displacement Method), Moreira (1990), que extrai dos dados brutos as informações necessárias para a correção da imagem.

Foram utilizadas imagens do Sistema E-SAR (DLR) e do ERS-1 (ESA) para avaliação do processador.

2 Princípios básicos do Imageamento SAR

Um Sistema SAR é baseado em um radar de visada lateral, com coerência temporal de pulso para pulso.

A discriminação na direção perpendicular ao vôo (range) é obtida através de um pulso estreito, de período τ , modulado linearmente em freqüência, com um alto

produto (tempo) \times (largura de banda), $\tau \times B_r$. A máxima resolução atingível nessa direção, após a compressão de pulsos, é dada por $\delta_r = c/2B_r$, onde c é a velocidade da luz.

A discriminação na direção de vôo (azimute) é obtida pela integração coerente do retorno do radar de um certo alvo, durante o intervalo de tempo em que esse alvo é visto pelo radar (Abertura Sintética). A integração depende da história de fase do alvo em questão, dada por $\theta = 4\pi r \frac{v}{\lambda}$, onde r é a distância da plataforma ao alvo e λ o comprimento de onda da freqüência do Radar. O processo de integração é realizado através de uma correlação que comprime os pulsos na direção de azimute.

A resolução na direção de azimute depende do desvio de freqüência Doppler do alvo, B_D , durante o intervalo da Abertura Sintética (Δt), dado por: $B_D = \theta \frac{v}{\lambda}$. A resolução atingível em azimute é inversamente proporcional ao desvio Doppler, ou seja: $\delta_a = 1/B_D$. O desvio de freqüência Doppler acontece devido ao movimento da plataforma em relação a um ponto qualquer, ou seja, o radar vê um alvo em diferentes ângulos enquanto a plataforma se move.

3 Caracterização do sinal SAR

Para um melhor entendimento dos algoritmos de processamento SAR, é necessário conhecer as características do sinal SAR. As equações utilizadas

foram as mesmas propostas por McDonough et al. (1985)

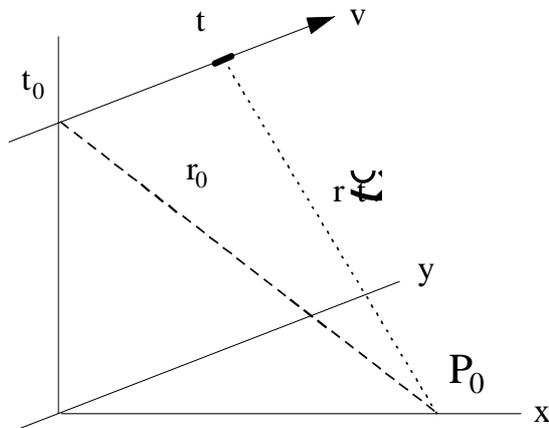


Figura 3.1 - Geometria de vôo do radar

Considerando a situação mostrada na figura 3.1, a localização de um ponto P_0 na imagem é caracterizada pela posição de azimute (direção do vôo) $t = t_0$ e pela menor distância sensor-alvo r_0 . Enquanto o sensor se move a uma velocidade v , a distância entre o sensor e o retorno vindo do ponto P_0 , varia de acordo com:

$$r = \sqrt{r_0^2 + v^2 (t - t_0)^2} \quad (3.1)$$

Essa variação de "range" tem diferentes curvaturas para diferentes r_0 , mas é invariante ao deslocamento com relação a t_0 . A equação 3.1 pode ser simplificada pela expansão em série de Taylor. Truncando os termos acima de 2a. ordem, obtém-se:

$$r \approx r_0 + \frac{v^2 (t - t_0)^2}{2r_0} \quad (3.2)$$

A diferença do "range" entre o tempo t e t_0 é chamado de migração do "range", ou seja:

$$\Delta r = r - r_0 \approx \frac{v^2 (t - t_0)^2}{2r_0} \quad (3.3)$$

Supondo-se que o radar emita um pulso de envoltória complexa $g(t)$, onde o tempo t define a localização da plataforma e τ o tempo com origem no ponto central do pulso na instante da transmissão, o sinal recebido do ponto P_0 , de reflexibilidade complexa $\sigma(r_0)$, é dado por:

$$g(r_0) \exp(j\omega_0 [\tau - 2r_0/c]) \times \exp(j\omega_0 [\tau - 2r(t)/c]) \quad (3.4)$$

onde ω_0 é a frequência da portadora do pulso do radar.

O sinal recebido do mapa de reflexividade é dado por:

$$g(r_0) \int_{T,R} \sigma(r_0) \exp(j\omega_0 [\tau - 2r(t)/c]) \times \exp(j\omega_0 [\tau - 2r_0/c]) \, d\text{du} \quad (3.5)$$

onde (T,R) é a região na superfície da terra iluminada pelo feixe do radar, com a plataforma em uma posição t . Dessa maneira o sinal SAR é modelado como uma convolução bi-dimensional da reflexividade complexa $\sigma(r_0)$, por uma função de resposta a impulso (função de Green), $h(r_0)$, dada por:

$$h(r_0) \int_{T,R} \sigma(r_0) \exp(j\omega_0 [\tau - 2r(t)/c]) \times \exp(j\omega_0 [\tau - 2r_0/c]) \, d\text{du} \quad (3.6)$$

4 Formação da imagem SAR

O objetivo do processamento SAR é produzir a imagem de amplitude do mapa de reflexividade, ou seja, $|\sigma(r_0)|$. Isto requer a implementação da função de Green inversa, h^{-1} , que convolvida com o sinal recebido fornece a imagem do solo, ou seja:

$$\sigma(r_0) = \int_{T,R} h^{-1}(r_0) \times \text{sinal recebido} \, d\text{du} \quad (4.1)$$

Para simplificação do modelo, considera-se somente as linearidades do sistema SAR, podendo-se assim desmembrar o processamento na direção de "range" e azimute separadamente.

Para se conseguir uma resolução mais fina na direção de "range", o radar transmite pulsos com um alto produto "período do pulso \times largura de banda", modulado linearmente em frequência (chirp), da seguinte forma:

$$s(t) = \cos(2\pi f_0 t + \frac{1}{2} K_r t^2) \quad |t| \leq \Delta\tau/2 \quad (4.2)$$

onde f_0 é a frequência portadora do pulso e K_r é o fator de modulação. O tempo $\tau = 0$ é tomado no ponto central do pulso. A largura de banda do pulso é de $B_r = K_r \Delta\tau$, centrada em f_0 . O pulso recebido, transmitido na posição t , após a demodulação é dado por:

$$g'(t) \cos(\pi f' [\tau - 2r(t)/c]) + \pi K_r [\tau - 2r(t)/c]^2 \quad (4.3)$$

onde f' (frequência intermediária) $\ll f_0$.

O período do pulso transmitido, $\Delta\tau$, é grande e portanto não oferece uma boa resolução, contudo, se o sinal recebido for correlacionado com uma réplica apropriada

do sinal transmitido, s' , tem-se o “filtro casado” cuja saída é dada por:

$$g' \frac{\sin \pi B_r [\tau - 2r_0/c]}{\pi B_r [\tau - 2r_0/c]} \exp[-j4\pi r_0 (\tau - 2r_0/c)/\lambda] \exp[j2\pi f' \tau] \quad (4.4)$$

para: $|\tau - 2r_0/c| \leq \Delta\tau$

onde * representa a operação de convolução.

Esta convolução é também chamada de compressão de “range”. O resultado básico é um sinal de frequência intermediária f' , com um envelope complexo (função sinc) de largura nominal em 3dB igual a $\delta\tau = 1/B_r$, centrado em $\tau_0 = 2r_0/c$. O envelope pode ser detectado pelo deslocamento do sinal a esquerda, por uma quantidade igual a f' . A nova posição do pico é deslocada para r_0 , com uma precisão $\delta_r = c\delta\tau/2 = c/2B_r$ (resolução em “range”) e um valor complexo igual a $\exp[j4\pi r_0/\lambda]$.

Os dados comprimidos em “range” forma uma seqüência de dados complexos do tipo $\exp[j4\pi r_0/\lambda]$. Devido a coerência do radar de pulso para pulso, os dados complexos de um ponto genérico da imagem possuem uma história de fase. A compressão em azimuth leva em conta essa história de fase, que é dada por:

$$\phi = 4\pi r_0 \dot{r} t \quad (4.5)$$

A partir da história de fase, calcula-se a variação de frequência devido ao efeito Doppler, ou seja:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \dot{r} t \quad (4.6)$$

Pode-se definir um coeficiente de variação da frequência Doppler da seguinte forma:

$$K_{az} = -\frac{4\pi}{\lambda} \dot{r} t \quad (4.7)$$

O apontamento da antena não é sempre perpendicular ao movimento da plataforma, como desejado, a variação nos ângulos de “pitch” e “yaw” da plataforma faz com que o apontamento não seja exatamente de 90° em relação a trajetória. Este desvio provoca um deslocamento da frequência central do Doppler, da seguinte forma:

$$f_{Dc} = -\frac{2v}{\lambda} \sin\psi \quad (4.8)$$

onde ψ é o ângulo formado entre o centro do feixe da antena e a normal ao deslocamento da plataforma.

O seqüência de amostras, comprimidas em “range”, na direção de azimuth pode ser caracterizada como um sinal modulado linearmente em frequência, com largura de banda $B_D = K_{az} \times \Delta t$, onde Δt é o

tempo que a plataforma leva para percorrer a abertura sintética, dada por $\Delta s = \theta_a r_0$, onde θ_a é o ângulo de abertura da antena. Dessa maneira o sinal FM em azimuth pode ser representado de forma similar ao da equação 4.2, ou seja:

$$g \exp[j4\pi r_0/\lambda] \exp[j2\pi f_{Dc} t_0 + j\pi K_{az} t_0^2] \quad (4.9)$$

para: $|t - t_0| \leq \Delta t/2$

A compressão em azimuth envolve então a aplicação de um “filtro casado”, com uma resposta a impulso da seguinte forma:

$$h \exp[-j\pi K_{az} t^2] \quad (4.10)$$

para: $|t| \leq \Delta t/2$

A saída do filtro casado, assumindo a não existência do “aliasing” ($PRF > B_D$), é uma seqüência de amostras obtida da seguinte forma:

$$b \exp[j4\pi r_0/\lambda] \exp[j2\pi f_{Dc} t_0] \times \exp[-j2\pi (r_0/\lambda + f_{Dc} t_0) t] \quad (4.11)$$

$$\times \Delta t \frac{\sin \pi B_D (t - t_0)}{\pi B_D (t - t_0)}$$

para: $|t - t_0| \leq \Delta t/2$

O pico da amplitude do sinal ocorre em $t = t_0$ com uma largura nominal em 3 dB igual a $\delta_a = 1/B_D$, que é a resolução em azimuth.

5 O processador INPE/DLR

O processador SAR foi implementado em linguagem C em estação UNIX. Possui uma interface para a entrada dos parâmetros de vôo, bem como um arquivo de parâmetros do sistema SAR utilizado. A figura 5.1 apresenta o diagrama em blocos do processador.

O primeiro passo do processamento SAR é a compressão dos dados na direção de “range”, para isso é necessário a geração da função de referência de “range”, s' da equação 4.4. Essa função é gerada a partir dos parâmetros do pulso transmitido (chirp). A compressão ocorre pela convolução dos dados brutos com a função de referência gerada (eq. 4.4).

Os dados comprimidos em “range” são filtrados na direção de azimuth, para atenuar a ambigüidade dos dados e também a supressão do efeito dos lóbulos laterais da antena.

Para estimar a frequência Doppler central, eq. 4.8,

utiliza-se a técnica chamada de “clutterlock”, Curlander (1991), que extrai do espectro dos dados comprimidos em “range” a frequência f_{Dc} .

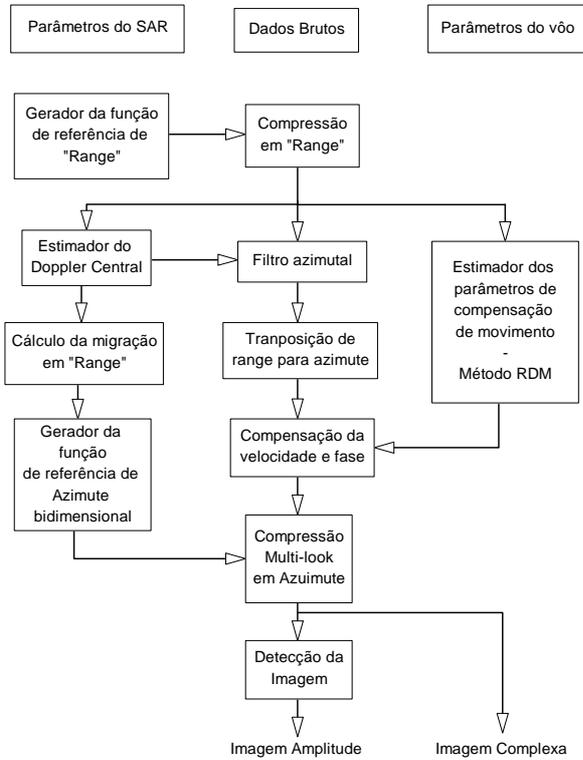


Figura 5.1 - Diagrama em blocos do Processador SAR

A migração em “range” é caracterizada pelo “deslocamento” e “curvatura” na posição dos dados (no sentido de azimute) dentro da matriz de dados brutos. A migração influencia no aumento da complexidade de processamento e na qualidade final da imagem. O deslocamento, também conhecido como “range walk”, ocorre quando o ângulo ψ (squint angle) não é exatamente zero (eq. 4.8), produz um efeito linear. A curvatura de “range” é significativa quando a abertura sintética é muito grande comparada com a distância plataforma-alvo, produz um efeito quadrático na migração, eq. 3.3.

Para evitar a correção da matriz de dados brutos, gera-se uma função de referência bi-dimensional, com uma migração de “range” e uma história de fase ideal, baseada na equação 4.10. Os parâmetros f_{Dc} e K_{az} não são necessariamente conhecidos a priori, e podem ser estimados a partir dos dados comprimidos em “range”, utilizando a técnica “clutterlock”.

A história de fase de um dado ponto na imagem,

eq. 4.5, não é ideal devido aos erros de movimento da plataforma. Os parâmetros da compensação de movimento devem ser estimados para que os dados sejam corrigidos, permitindo assim uma exata integração coerente dos dados (compressão em azimute). O método utilizado é o RDM (Reflectivity Displacement Method) proposto por Moreira (1990). Esse método utiliza os dados comprimido em “range” para calcular o espectro azimutal dos dados, Figura 5.2, e com isso derivar os parâmetros para a correção de velocidade da plataforma e da variação de fase na direção perpendicular a direção de voo.

Após a transposição dos dados de “range” para azimute, a matriz dos dados pode ser acessada em linhas azimutais, facilitando a correção dos dados e a posterior compressão em azimute.

A correção dos dados é obtida através de uma reamostragem dos dados de acordo com a variação de velocidade, para compensar o a frequência de repetição de pulso (PRF) constante, o Doppler espectro é também deslocado de acordo com a variação de fase. Após essa etapa do processamento o dado pode ser comprimido na direção de azimute.

A compressão de azimute é realizada pela convolução dos dados pela função de referência bi-dimensional gerada, eq. 4.11. Uma função de correlação híbrida é utilizada para compensar a migração de “range”. A técnica de “multi-look” é utilizada para permitir a redução do ruído Speckle. Após a soma dos “looks” a imagem complexa pode ser detectada para se obter uma imagem de amplitude (detecção linear).

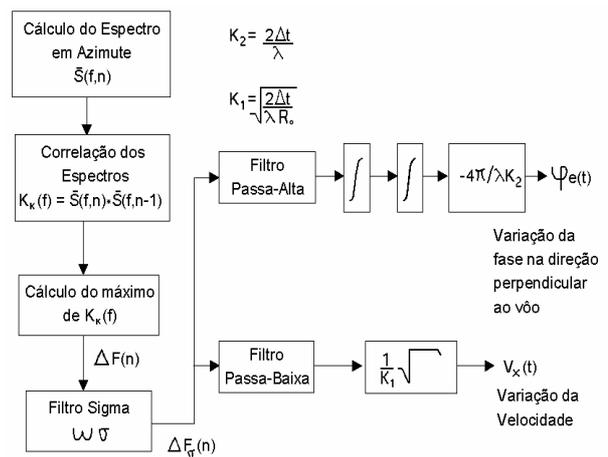


Figura 5.2 - Diagrama em blocos do método RDM

6 Resultados obtidos

O processador SAR foi testado com imagens do sistema E-SAR (DLR), aerotransportado, e do sistema ERS-1

(ESA), orbital.

A imagem do sistema E-SAR mostrada na Figura 6.1 (região de Oberpfaffenhofen - Alemanha), gerada pelo processador SAR INPE/DLR, apresenta uma boa qualidade geométrica e radiométrica e com uma boa compensação de movimento. Essa imagem foi gerada em 8 “looks” com uma resolução de 2.0 metros em “range” e 3.0 metros em azimute.

pelo processador INPE/DLR sem os módulos de “filtro azimutal” (a largura de banda B_D é muito pequena nesse sistema, não permitindo essa filtragem), de “compensação de movimento” (a plataforma do ERS-1 é suficientemente estável). Essa imagem foi gerada em 8 “looks” com uma resolução de 25 metros em “range” e 25 metros em azimute.

A Figura 6.3 mostra duas imagens do Sistema E-SAR utilizadas para a verificação do desempenho do



Figura 6.1 - Imagem do Sistema E-SAR de 8 “looks” e resolução de 2.0 x 3.0 metros

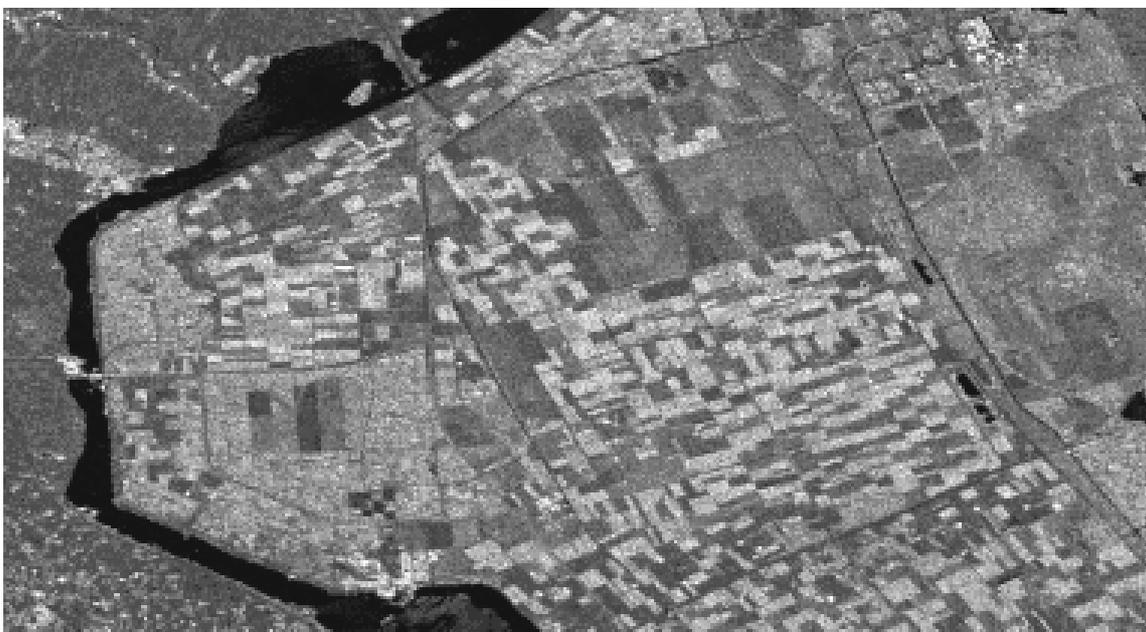
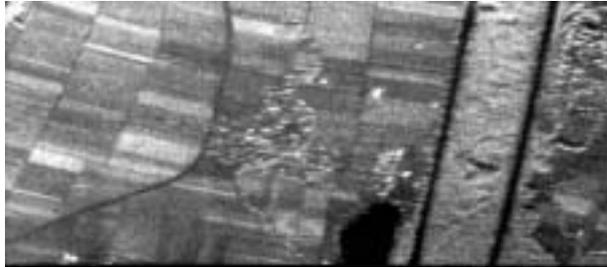


Figura 6.2 - Imagem do Sistema ERS-1 de 8 “looks” e resolução de 25.0 x 25.0 metros

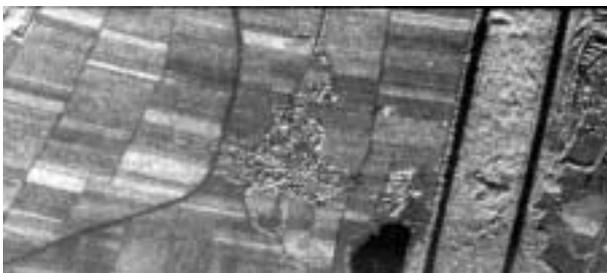
A imagem do sistema ERS-1 apresentada na Figura 6.2 (região de Flevoland - Holanda) foi gerada

módulo de compensação de movimento baseado no método RDM. A primeira imagem (a) foi processada

sem o módulo de compensação de movimento e a segunda (b) com o módulo. A imagem (b) mostra-se bem focada, com as bordas bem mais definidas.



(a) - Processada sem compensação de movimento



(b) - Processada com compensação utilizando o RDM

Figura 6.3 - Exemplo da utilização do método RDM

7 Conclusão

O processador SAR INPE/DLR mostrou-se bastante eficiente, permitindo a compressão dos dados em azimute, através de uma correlação híbrida, mesmo em imagens com uma grande migração de "range". O processador mostrou-se também bastante versátil, podendo ser configurado para o processamento de imagens de diversos sistemas, tanto aerotransportados como orbitais. A cooperação com o DLR foi de fundamental importância para que o INPE adquirisse tecnologia de geração de imagens SAR.

8 Referências

Curlander, J. C., R. N. McDonough (1991). "Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing", John Wiley, New York.

McDonough, R. N., B. E. Raff and J. L. Kerr (1985). "Image formation from spaceborne synthetic aperture radar signals", Johns Hopkins APL Technical Digest, 6(4), pp. 300-312.

Moreira, J. R. (1990). "Estimating the residual error of the reflectivity displacement method for aircraft motion error extraction from SAR raw data", Proc. Int. Radar Conf., pp. 70-75.

Mura, J. C. (1993). "Performance and interferometric capabilities of the INPE/DLR SAR Processor", 8. Radarsymposium, Neubiberg - Germany, pp. 166-171.