

Compensação de movimento para geração de imagens SAR do SIVAM

Ricardo de Queiroz Veiga^{1,2}
David Fernandes²

¹ Instituto de Estudos Avançados – IEAv/CTA
Rodovia dos Tamoios, km 5,5 – 12228-840 - São José dos Campos - SP, Brasil
veiga@ieav.cta.br

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA/CTA
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, 122 - 122281-900 - São José dos Campos - SP, Brasil
david@ele.ita.br

Abstract. This paper presents a motion compensation algorithm applied to the SAR processor. This algorithm was designed to correct the antenna phase center trajectory to a straight line. It was also designed to improve computation performance while keeping a good accuracy for image focusing and segment mosaic construction. Practical results with SIVAM's real data are also presented.

Palavras-chave: synthetic aperture radar, SAR, SAR image processing, SAR image synthesis, radar de abertura sintética, processamento de imagens SAR, síntese de imagens SAR.

1. Introdução

O radar de abertura sintética (SAR) são embarcados em plataformas móveis, como aeronaves ou satélites. Nas plataformas móveis, o movimento avante do radar corresponde a uma das dimensões de varredura utilizada para formar a matriz de dados brutos. A outra dimensão da cena é a direção da propagação do pulso transmitido ao longo do alcance.

Todas as plataformas reais possuem vários graus de liberdade que permitem variações de posição e orientação. Estas variações ocorrem: a) nos três eixos de rotação da plataforma (arfagem, rolagem e derrapagem); b) afastamentos horizontais ou verticais da linha ideal de vôo; e c) variações da velocidade.

Os desvios de trajetória devem ser corrigidos para que um SAR aerotransportado seja capaz de gerar imagens bem focalizadas. Especialmente se as imagens formarem pares interferométricos, utilizados na geração de modelos de elevação digital da superfície terrestre.

Há vários níveis de correção de trajetória e de velocidade que podem ser aplicados: a) se o diagrama de irradiação da antena possui largura angular do lóbulo principal comparável ou inferior às rotações da plataforma, a orientação da antena deve ser corrigida para compensar tais movimentos; b) se o radar se afastar da linha ideal de vôo mais que a resolução em alcance, então, a janela de amostragem deve ser ajustada para manter o sinal alinhado corretamente na matriz de dados; c) se houver variações de velocidade da plataforma radar, o sistema radar deve ajustar sua amostragem de forma a manter o espaçamento entre pulsos uniforme; e d) o uso da fase do sinal no processamento requer que a precisão das estimativas de desvios horizontais e verticais sejam aproximadamente da ordem de um décimo do comprimento de onda da portadora do sinal transmitido.

Os métodos que envolvem o processamento do sinal para corrigir os desvios de trajetória, causados por perturbações, são conhecidos por MOCOMP (*Motion Compensation*). Tipicamente, o MOCOMP emprega uma trajetória retilínea ideal, como referência para a correção da fase e amostragem dos dados (Curlander, 1991; Stevens et al. 1994 e Stevens et al. 1995).

O conhecimento preciso da posição da plataforma é, geralmente, fornecido por um Sistema de Navegação Inercial combinado a um GPS, montado próximo à antena do radar. Contudo, os limites de precisão deste sistema, em particular o de deriva, são problemáticos e, dependendo da resolução desejada, pode ser necessário usar os próprios dados coletados pelo SAR para corrigir a informação de posição, através de técnicas conhecidas por “Autofoco”. (Moreira, 1989) e (Dall, 1991). Sistemas mais modernos passaram a incorporar um DGPS para aumentar a precisão da medida de posição da plataforma.

A compensação de trajetória desenvolvida neste trabalho foi utilizada no processador de síntese de imagens do projeto PROSAR-BR desenvolvido no IEAv para o SIVAM, (Veiga, 2004). O PROSAR-BR é composto por três subsistemas complementares e foi integrado à estrutura de processamento SAR hoje existente no SIVAM e no 2º/6º GAv: a) Subsistema de Processamento SAR – SPSAR; b) Subsistema de Processamento Distribuído – PRODIS; e c) Subsistema de Catálogo, Consulta e Armazenamento – CATCON.

O processo de compensação de trajetória implementado também atende à necessidade de produzir blocos de imagens que se justapõem sem sobreposição com os seus vizinhos. Essa característica é essencial, pois dispensa a etapa de geração do mosaico existente no sistema fornecido, pelo fabricante do SAR, para o SIVAM. A capacidade de produzir imagens registradas também foi estendida para os canais de mapeamento do SAR-SIVAM. Dessa forma, os produtos fornecidos pelo SPSAR dispensam as etapas de correção entre os canais para utilizá-los em interferometria e multi-polarimetria.

O processo de compensação de trajetória desenvolvido foi incorporado ao algoritmo *Range Doppler (RDA)* de síntese de imagens SAR, (Veiga, 2004), cujo diagrama de blocos é apresentado na **Figura 1**.

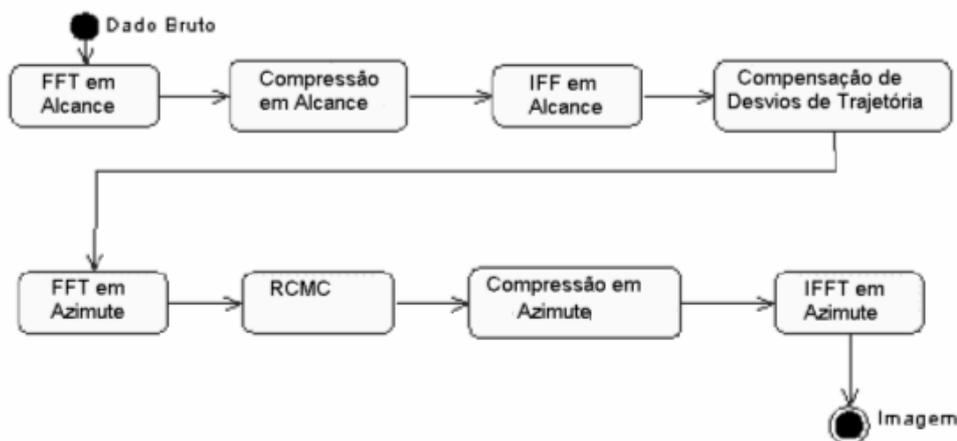


Figura 1: estrutura do RDA com compensação de desvios de trajetória para síntese de imagens SAR.

2. Efeitos de desvios de trajetória não compensados

Quando a plataforma com o SAR não percorre a trajetória ideal, a fase do sinal relativa a um alvo pontual não corresponde exatamente à fase do filtro casado projetado para a compressão dos dados brutos. Isto faz com que a resposta do filtro apresente distorções que dependem do erro de fase do sinal.

Os erros de fase podem ser distribuídos em três categorias: baixa frequência; senóides de alta frequência e banda larga.

Os erros de baixa frequência são aqueles que causam oscilações da fase do sinal inferiores a um ciclo por intervalo de integração da abertura sintética. As imagens com esse tipo de erro

apresentam distorções geométricas, causadas pelo deslocamento do alvo, e degradação da resolução. Os erros de alta frequência são caracterizados por um erro de fase senoidal dominante com pelo menos dois ciclos de oscilação durante o intervalo de integração e causam perda de contraste e surgimento de alvos espúrios. Os erros de banda larga são compostos por frequências de oscilação, que causam perda de contraste e redução da relação sinal–ruído (Carrara et al., 1995). A **Figura 2** apresenta duas imagens corrompidas por erros de trajetória não compensados e uma imagem corrigida.

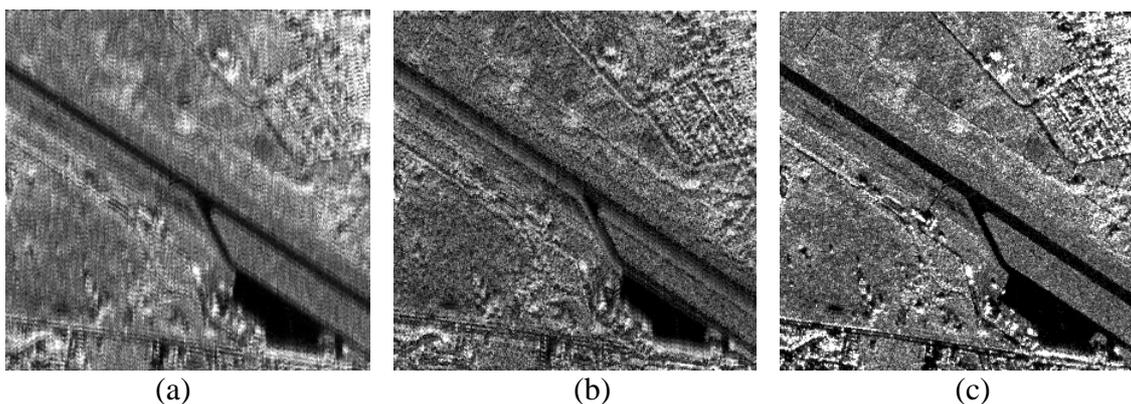


Figura 2: imagens corrompidas por desvios de trajetória não compensados: (a) deriva; (b) oscilação e (c) Imagem sem desvios (c).

3. Compensação dos desvios

Idealmente, o histórico de fase de cada um dos alvos, observados na coleta de dados, deveria ser corrigida individualmente. Entretanto, isso não é possível porque os históricos de fase estão misturados nas amostras e a sua separação requer, justamente, o conhecimento do seu histórico. O problema reside no fato de que um deslocamento lateral da plataforma introduz variações de fase no sinal que dependem do azimute relativo dos alvos.

Uma forma comum de se realizar a compensação de fase é somar a diferença de fase relativa a um alvo que acompanha o radar à mesma velocidade e a uma distância constante da trajetória. Essa é a compensação de linha e é a mais empregada nesse tipo de compensação de fase. A compensação de ponto é realizada com mais frequência para o modo de imageamento SAR *spot* (Carrara et al., 1995). A fase das amostras de todos os pulsos são corrigidas para um mesmo ponto – o mesmo apontado continuamente pela antena. A **Figura 3** ilustra as duas formas mais comuns de compensação de trajetória. Na compensação para um ponto, as medidas de distâncias são feitas para o ponto fixo de referência **A**. O ponto **B** representa a posição sobre a trajetória ideal para a qual a fase do sinal é corrigida. Quando a correção é feita para uma linha, o ponto de referência **E** acompanha o azimute do centro de fase da antena e a correção de fase é feita para que o sinal corresponda à coleta realizada do ponto **D**.

Na compensação para linha, cada pulso tem a fase de suas amostras corrigidas de forma que o sinal eco de um alvo, situado a uma distância constante e uma direção fixa do radar, tenha a mesma fase caso a coleta tivesse sido realizada sobre a trajetória ideal. Sendo $r(x) = \overline{CE}$, $r'(x) = \overline{DE}$ e λ_c o comprimento de onda da portadora do sinal transmitido, as fases relativas de um alvo localizado em E são:

$$\phi(x) = -4\pi \frac{r(x)}{\lambda_c} \quad (3.1)$$

$$\phi'(x) = -4\pi \frac{r'(x)}{\lambda_c} \quad (3.2)$$

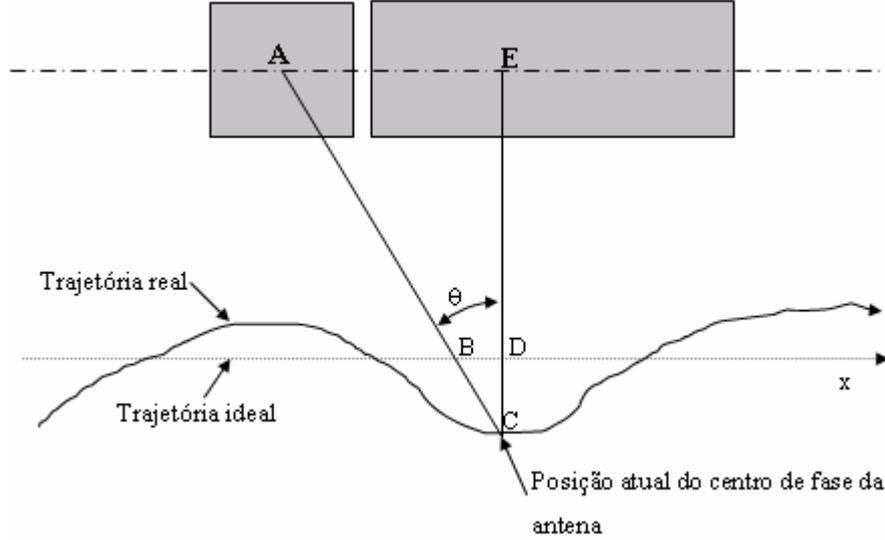


Figura 3: compensação de desvios de trajetória para um ponto e para uma linha.

Para que a fase do sinal corrigido do alvo E seja igual a ϕ' , é necessário somar a diferença de fase

$$\Delta\phi(x) = -4\pi \frac{r'(x) - r(x)}{\lambda_c} \quad (3.3)$$

às fases das amostras do sinal eco correspondente ao azimute x . Para um alvo localizado em A , fora da linha de visada que une os pontos E e C , a correção de fase estipulada em (3.3) possui um erro de fase residual $\phi_e(\theta)$ que depende da separação angular θ relativa ao ponto E , localizado na perpendicular da trajetória ideal.

$$\phi_e(\theta) = \Delta\phi(x)(1 - \cos(\theta)) \quad (3.4)$$

Para uma resolução espacial ρ_a , o ângulo de abertura sintética θ_p é dado por:

$$\theta_p = \text{asin}\left(0,2165 \frac{\lambda_c}{\rho_a}\right) \quad (3.5)$$

Substituindo o ângulo θ e a diferença de fase, da equação (3.4), pelo ângulo θ_p , da equação (3.5) e pela diferença de fase da equação (3.3), tem-se:

$$\Delta\phi_{\max}(x) = -4\pi \frac{r'(x) - r(x)}{\lambda_c} \left(1 - \cos\left(\text{asin}\left(0,2165 \frac{\lambda_c}{\rho_a}\right)\right)\right) \quad (3.6)$$

A equação (3.4) mostra que o erro de fase aumenta com o afastamento da trajetória ideal, com a frequência da portadora e com o afastamento angular θ . Contudo, para uma dada resolução em azimute, a equação (3.5) mostra que o afastamento angular aumenta com o comprimento de onda e o resultado é uma relação quase linear, **Figura 4**, entre o erro de fase máximo, equação (3.6), e o comprimento de onda. Para o PROSAR, isso significa que a compensação de trajetória da banda L, comprimento de onda maior, é mais crítica que a da

banda X, por causa do erro maior na correção de fase. Significa, também, que o uso de uma trajetória ideal única, para a correção de fase de todos os blocos, pode apresentar uma degradação quando a deriva é excessiva, pois a antena não estará apontando para a perpendicular da trajetória ideal e o ângulo máximo da abertura deve ser acrescido do ângulo de *squint*.

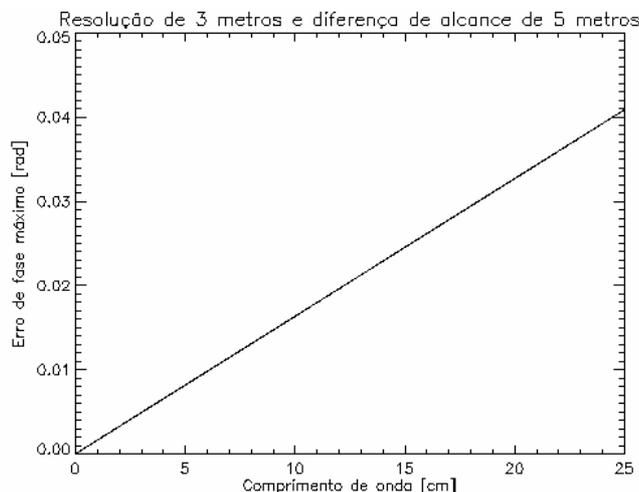


Figura 4: erro de fase máximo.

Conforme o diagrama do RDA, apresentado na **Figura 1** logo após a transformação inversa de Fourier em alcance é realizada a correção do sinal para compensar os desvios de trajetória e variações de velocidade da aeronave. Na **Figura 5** são apresentadas as etapas da compensação de desvios de trajetória. Os parâmetros geométricos da trajetória são fornecidos pela unidade de medição inercial, instalada sobre o pedestal da antena. Desses parâmetros são calculados os coeficientes de correção de fase e do interpolador em alcance para tornar a trajetória de coleta retilínea. Em seguida, determinam-se os coeficientes do interpolador para tornar o intervalo de amostragem em azimute uniforme, antes de se executar a transformada de Fourier em azimute. Esses mesmos coeficientes são utilizados para estimar os coeficientes de correção radiométrica que serão utilizados durante a etapa de compressão em alcance do RDA.

Na **Figura 5** incluiu-se a estimativa dos coeficientes de correção radiométrica proposto por Veiga, (2004). A **Figura 6** apresenta a geometria adotada para compensação dos desvios da trajetória para uma linha de referência. Cada uma das amostras do sinal coletado na posição real deve ser multiplicada por um valor complexo de amplitude unitária com a fase dada em (3.3).

Como, na prática, o ângulo ϵ , mostrado na **Figura 6**, é muito pequeno, a equação da correção de fase pode ser simplificada para :

$$\Delta\phi(x) = \frac{-4\pi}{\lambda_c} [\delta y \cos(\psi) - \delta z \sin(\psi)] \quad (3.7)$$

δy é o afastamento lateral e δz é o afastamento vertical, ambos referentes à posição da trajetória real em relação à trajetória ideal

O ângulo de depressão ψ da linha de visada pode ser calculado para uma distância de referência, normalmente o centro da imagem, por:

$$\psi = \arcsin\left(\frac{h}{r'}\right) \quad (3.8)$$

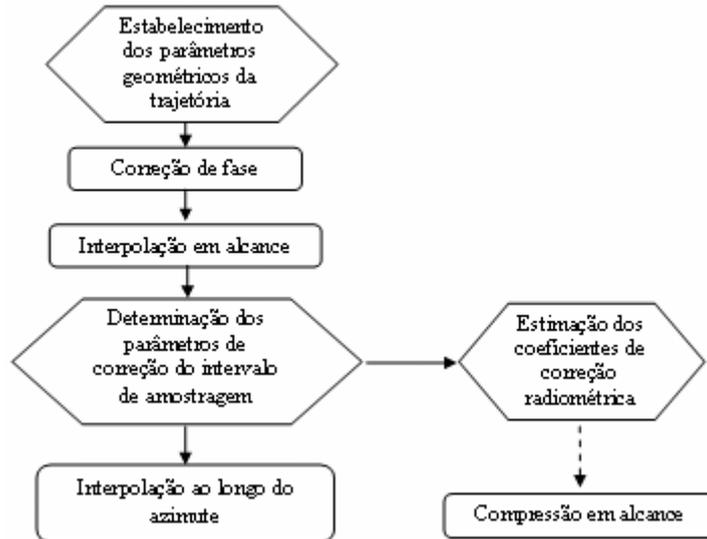


Figura 5: compensação de desvios de trajetória.

A vantagem dessa simplificação está no valor constante de ψ para toda a cena. Assim, os coeficientes da equação podem ser pré-calculados pela equação (3.8). Esta compensação é aplicada no processo de formação de imagem após a compressão em alcance: $S(x, r')$, onde

$$S(x, r') = S(x, r' - \delta r) \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda_c} \delta r\right) \quad (3.9)$$

$S(x, r')$ são os dados brutos comprimidos em alcance sem a compensação dos desvios da trajetória e $S(x, r)$ são os dados corrigidos.

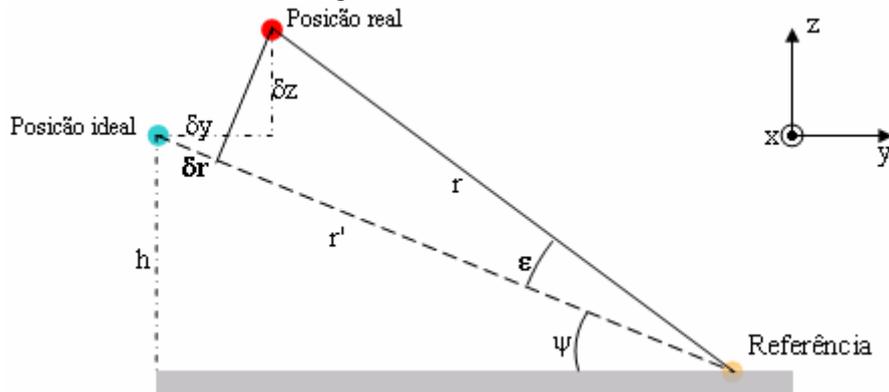


Figura 6: geometria para compensação de trajetória.

4. Resultados

A compensação de desvios de trajetória por linha foi implementada com êxito. A **Figura 7** mostra duas imagens da banda L, polarização VV, do porto de Santos. A **Figura 7a** foi gerada pelo RDA sem aplicar a correção de desvios de trajetória. Comparando-a com a **Figura 7b** percebe-se que a primeira está desfocalizada. A imagem (b) foi gerada com a aplicação da correção de desvios de trajetória. A avaliação do desempenho da compensação de trajetória foi feita medindo-se a resolução de um alvo selecionado da imagem. O alvo escolhido foi um dos postes de iluminação, indicado na imagem como alvo pontual, sobre uma das pontes que

ligam o porto de Santos ao continente. A resolução foi determinada medindo-se a largura do lóbulo principal desse alvo 3 dB abaixo do seu ponto de máximo. A **Tabela 1** contém a resolução nominal do SAR, para o modo de coleta empregado, e os resultados da medição da resolução do alvo indicado após o processamento.

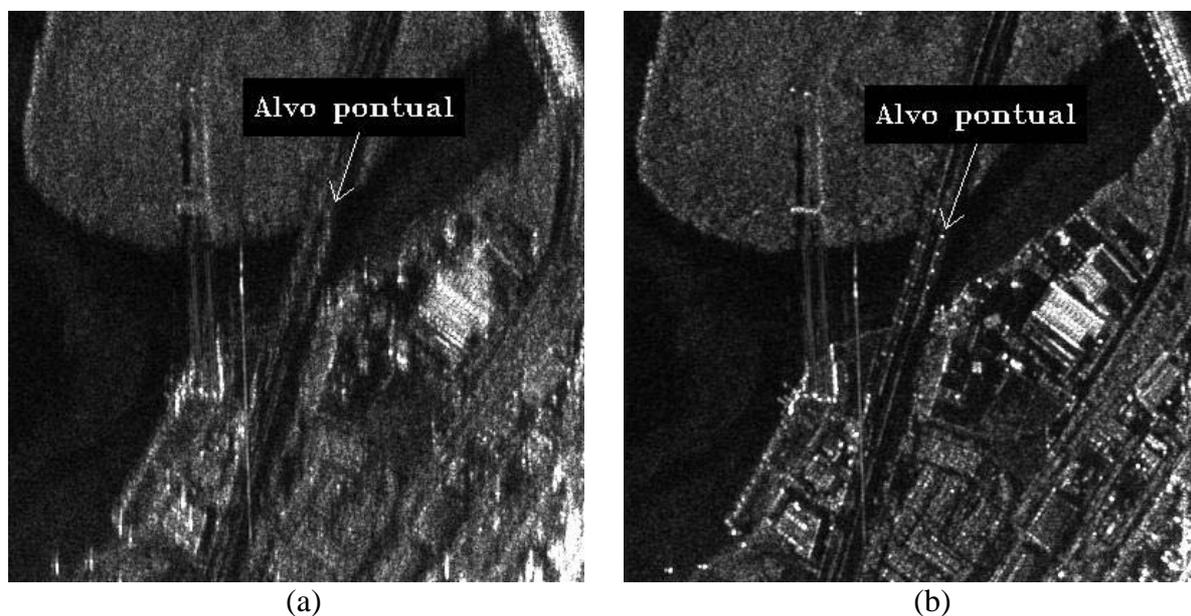


Figura 7: imagem SAR sem compensação de desvios de trajetória (a) e com compensação de desvios de trajetória (b).

Tabela 1: resolução da imagem da banda L.

Fonte	Resolução [m]
Resolução nominal do sistema	3,30
Imagem (a)	8,46
Imagem (b)	3,98

A imagem da **Figura 8** mostra como o processo de compensação de movimento desenvolvido pode gerar imagens corregistradas na banda X e L do SAR do SIVAM.



Figura 8: composição colorida dos canais da banda X-HH (verde e azul) e banda L-VV (vermelho) da área do rio Paraíba no setor norte de São José dos Campos, coletados em dezembro de 2003.

5 Conclusões

O desenvolvimento do Subsistema de Processamento SAR – SPSAR, em conjunto com o Subsistema de Processamento Distribuído – PR, permitiu ao IEAv fornecer um sistema alternativo para síntese de imagens SAR do SIVAM. Para a síntese das imagens foi empregado o *Range Doppler Algorithm* – RDA, com correção de desvios de trajetória. O desempenho do PROSAR-BR superou o requisito imposto pela CCSIVAM. O PRODIS é capaz de distribuir o processamento através de uma rede local de computadores, produzindo imagens corregistradas de todos os canais de mapeamento do SAR. Os testes realizados no computador do INMET e os resultados apresentados pelo PRODIS demonstraram que o processamento distribuído por computadores do tipo PC é uma solução adequada para a síntese de imagens SAR. Finalmente, é importante ressaltar que esse trabalho só foi possível graças ao trabalho de absorção de tecnologia conduzido pela CCSIVAM. Os conhecimentos adquiridos junto ao fabricante do radar foram fundamentais na adequação dos modelos teóricos do RDA às particularidades do sistema.

Referências

- Carrara, W. G.; Goodman, R. S.; Majewski, R. M. **Spotlight Synthetic Aperture Radar**. Norwood: Artech House, 1995. 533 p.
- Curlander, J. C.; McDonough R. N. **Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing**. Indianapolis: Wiley, 1991. 672 p.
- Dall, J. A. New Frequency Domain Autofocus Algorithm For SAR. In: International Geoscience And Remote Sensing Symposium, 1991, Helsinki, **Proceedings...** Helsinki, IGARSS, 1991, v. 2, p. 1069-1072.
- Moreira, J. R., A New Method Of Aircraft Motion Error Extraction From Radar Raw Data For Real Time Sar Motion Compensation. In: Geoscience And Remote Sensing Symposium, 12., 1989, Vancouver, Canadá. **Proceedings...** Vancouver, IEEE, 1989, p. 2217-2220.
- Stevens, D. R.; Cumming I. G.; Gray, A. L. Motion Compensation For Airborne Interferometric Sar. In: Geoscience And Remote Sensing Symposium, 1994. Pasadena, Califórnia. **Proceedings...** IEEE, 1994, v. 32, p 1967-1970.
- Stevens, D. R.; Cumming, I. G.; Gray A. L. Options for Airborne Interferometric SAR Motion Compensation. In: Geoscience And Remote Sensing SymposiUM,1995, Florença, Itália. **Proceedings...** v. 33, n. 2, p. 409-420.
- Veiga, R. Q. **Processador SAR com compensação de movimento para o SAR-SIVAM**. 2004. 90 p. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de aeronáutica, São José dos Campos. 2004.