

## Detecção e estimação da velocidade de alvos móveis em imagens SAR multivisada

André Barros Cardoso da Silva<sup>1</sup>  
David Fernandes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - 12228-900 - São José dos Campos - SP, Brasil  
andrebc@hotmail.com  
david@ita.br

**Abstract.** This work presents a methodology for ground moving target detection and velocity estimation with a single channel SAR. A multilook processor generates two coregistered complex SAR images that are used in a DPCA (Displaced Phase Center Array) processor to detect moving targets and reject the stationary clutter. Given the moving targets position, the target's slant range velocity is estimated by the Doppler shift in the azimuth spectrum of the target. The target azimuth velocity is estimated by the distance between the two different positions that the target, with azimuth velocity, appear in the DPCA output image. Using simulated raw data and the Range-Doppler algorithm, the processor performance is evaluated with good results in presence of the noise and stationary clutter.

**Palavras-chave:** moving target detection, clutter rejection, DPCA, GMTI, detecção de alvos móveis, rejeição do clutter.

### 1. Introdução

O recente desenvolvimento de técnicas sofisticadas para a detecção e estimação da velocidade de alvos móveis tem possibilitado diversas aplicações de sensoriamento remoto utilizando sistemas SAR interferométricos, como: monitoramento de recursos naturais, de tráfego e até de fronteiras. Contudo, a utilização de sistemas multicanais pode ser proibitiva em algumas aplicações, sobretudo em baixas frequências, onde se exige uma separação física entre as antenas que pode ser inviabilizada pelo tipo de plataforma utilizada (Hinz et al., 2005; Bethke, 2006; Elarrat, 2012; Silva, 2011).

Este trabalho apresenta uma metodologia para a detecção e estimação da velocidade de alvos móveis utilizando um sistema SAR de um único canal, o processamento SAR multivisadas e a técnica DPCA (*Displaced Phase Center Array*). O DPCA é utilizado para a rejeição do *clutter* estacionário em um par de imagens complexas geradas pelo processo de multivisadas (Livingstone, 2002). Na imagem resultante da aplicação do DPCA estima-se a velocidade azimutal do alvo móvel em função dos deslocamentos do alvo detectado nesta imagem. A velocidade radial do alvo móvel é estimada através da frequência Doppler-centróide detectada no espectro dos dados comprimidos em range, no domínio range-Doppler. Para a avaliação da metodologia proposta foram simulados os dados brutos e realizada a síntese da imagem SAR utilizando o processador range-Doppler.

### 2. Efeitos da velocidade do alvo

A Figura 1 apresenta a geometria de iluminação de um alvo pontual em movimento, onde  $v_p$  é a velocidade linear da plataforma;  $H$  a altitude de voo;  $\theta$  o ângulo de visada do alvo;  $R(t_1), \dots, R(t_n)$  o histórico da distância relativa entre a plataforma e o alvo nos instantes  $t_1, \dots, t_n$ , dito tempo azimutal;  $y_c$  a coordenada em *ground range* do alvo no plano horizontal;  $v_{az}$ ,  $v_{rg}$  as componentes da velocidade do alvo nas direções azimutal (direção de voo da plataforma) e *ground range*, respectivamente (Sharma et al. 2006). Considera-se ainda que a plataforma em trajetória retilínea possui um SAR com um único canal composto de uma antena transmissora/receptora isotrópica.

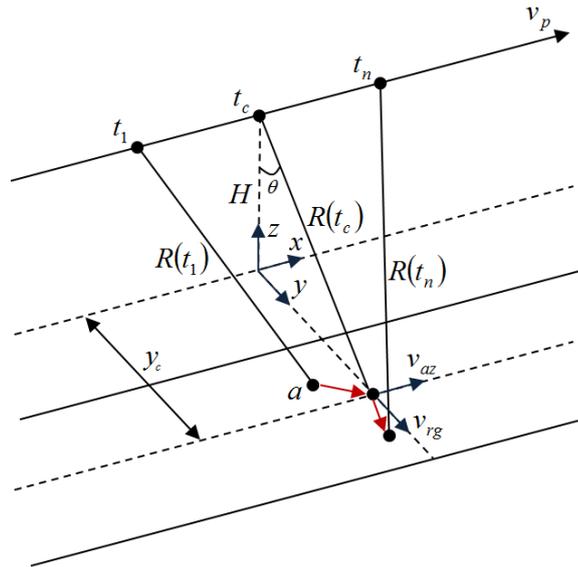


Figura 1. Modelo geométrico da cena e do alvo pontual em movimento.

No instante  $t = t_c$ , tem-se as coordenadas do alvo ( $x_{ac} = 0, y_{ac} = y_c, z_{ac} = 0$ ) e da plataforma ( $x_{pc} = 0, y_{pc} = 0, z_{pc} = H$ ). A distância (em *slant range*) entre o alvo e a plataforma neste instante é dada por:

$$R(t)^2 \Big|_{t=t_c} = (x_{ac} - x_{pc})^2 + (y_{ac} - y_{pc})^2 + (z_{ac} - z_{pc})^2 = R_c^2 = y_c^2 + H^2. \quad (1)$$

Em  $t = t_n$  tem-se as coordenadas do alvo ( $x_a(t_n) = x_c + v_{az}t_n, y_a(t_n) = y_c + v_{rg}t_n, z_a(t_n) = 0$ ) e da plataforma ( $x_p(t_n) = v_p t_n, y_p(t_n) = 0, z_p(t_n) = H$ ). A distância entre o alvo e a plataforma fica:

$$R(t)^2 = (v_{az}t - v_p t)^2 + (y_c + v_{rg}t)^2 + H^2 = R_c^2 + 2y_c v_{rg} t + \left[ (v_{az} - v_p)^2 + v_{rg}^2 \right] t^2. \quad (2)$$

A distância  $R(t)$  pode ser expandida em série de Taylor até o 2º grau, em torno de  $t - t_c$ :

$$R(t) \approx R_c + v_{sr} t + \frac{1}{2R_c} \left[ (v_{az} - v_p)^2 + v_{rg}^2 \left( \frac{R_c^2}{y_c^2} \right) \right] t^2. \quad (3)$$

Na aproximação em (3) considerou-se que a componente da velocidade *ground range* ( $v_{rg}$ ) projetada na direção *slant range* é dada por:  $v_{sr} = y_c v_{rg} / R_c$ ,  $\text{sen}(\theta) = y_c / R_c$  e que  $R_c \gg v_p T_i / 2$  sendo  $T_i$  é o tempo de iluminação do alvo pontual:  $T_i = R_c \Delta\theta_a$ , onde  $\Delta\theta_a$  é a abertura azimutal da antena SAR.

A fase do sinal eco de cada pulso transmitido pelo SAR é dada por:

$$\phi(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} R(t) = -2\pi \left\{ \frac{2R_c}{\lambda} + \frac{2v_{sr}}{\lambda} t + \frac{1}{\lambda R_c} \left[ (v_{az} - v_p)^2 + v_{rg}^2 \left( \frac{R_c^2}{y_c^2} \right) \right] t^2 \right\}, \quad (4)$$

e a frequência azimutal instantânea, do *chirp* azimutal, fica:

$$f_{az}(t) = \frac{\dot{\phi}(t)}{2\pi} = -f_{dc} - k_{az} t, \quad -T_i/2 \leq t \leq T_i/2 \quad (5)$$

onde,  $f_{dc}$  é a frequência Doppler centróide e  $k_{az}$  é a razão de variação do *chirp* azimutal, dados por:

$$f_{dc} = -2v_{sr} / \lambda, \quad k_{az} = \frac{\ddot{\phi}(t)}{2\pi} = -\frac{2}{\lambda R_c} \left[ (v_{az} - v_p)^2 + v_{sr}^2 \left( \frac{R_c^2}{y_c^2} \right) \right]. \quad (6)$$

Sendo, como usualmente,  $k_{az} T_i^2 \gg 1$ , a banda azimutal do sinal eco azimutal é dada por (Cumming e Wong, 2005):  $B_{az} \cong k_{az} T_i$ .

Nota-se em (5) que a velocidade do alvo em *range* ( $v_{rg} \neq 0$ ) provoca: a) um desvio de frequência ( $f_{dc}$ ) no espectro azimutal do sinal eco. Esse desvio provoca na imagem SAR um deslocamento na posição azimutal do alvo dado por  $\Delta x = v_p t_{dc}$ , onde o instante azimutal em que  $f_{az}(t)$  é nula é dado por  $t_{dc} = f_{dc}/k_{az}$  (Cumming e Wong, 2005), b) o  $t_{dc}$  não nulo acarreta também um deslocamento em distância (em *slant range*) na posição do alvo na imagem SAR dado por dado pela diferença  $\Delta R = R(t_{dc}) - R(t_c)$ , que pode ser expressa como  $\Delta R = \Delta x v_{sr} / (2v_p)$  em (6) (Bethke et al., 2006) e c) O fator  $2v_{sr}^2 R_c / (\lambda y_c^2)$  em (6) altera o valor da razão de variação do *chirp* azimutal ( $k_{az}$ ), que na imagem SAR provoca uma desfocagem do alvo.

O efeito da velocidade azimutal  $v_{az} \neq 0$  na fase do sinal recebido pode ser observado em (6) por meio do fator  $2v_{az}(v_{az} - 2v_p) / (\lambda R_c)$ , que também causa uma alteração no valor da razão de variação do *chirp* azimutal ( $k_{az}$ ), mais significativa que aquela causada por  $v_{rg} \neq 0$ , e que provoca a desfocagem do alvo na imagem SAR (Hinz et al., 2005).

### 3. Detecção e estimação da velocidade do alvo móvel

Inicialmente será realizada uma analogia entre a obtenção de duas imagens SAR multivisadas geradas por um SAR de um único canal, e duas imagens SAR geradas por um SAR com dois canais de recepção. Considera-se um sistema SAR com dois canais de recepção, onde uma antena atua como transmissora/receptora (TR1/RC1) e a outra antena somente como receptora (RC2), conforme disposto na Figura 2.

Para simplificação da notação, considerando somente a dimensão azimutal da imagem SAR, seja  $I_1(t)$  a imagem gerada pelo sensor A1 (TR1/RC1),  $I_2(t)$  a imagem gerada pelo sensor A2 (RC2), e  $d_x/2$  a distância entre as duas antenas que implica em um atraso entre as duas imagens SAR geradas, dado por  $\Delta't = d_x / 2v_p$ .

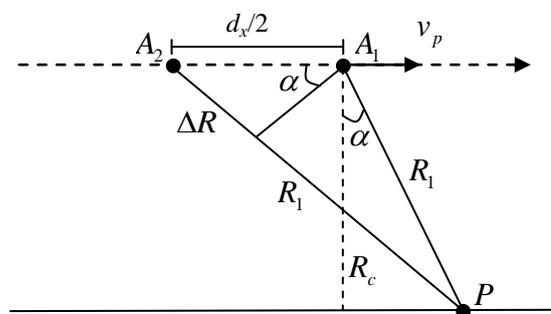


Figura 2. Vista de topo da geometria de um sistema SAR com dois canais.

Para uma dada cena com alvos estacionários, tem-se:

$$I_1(t) = I(t); \quad I_2(t - \Delta't) = I(t - \Delta't), \quad \Delta't = \frac{d_x}{2v_p}. \quad (7)$$

onde,  $I(t)$  representa a imagem complexa da cena observada, com banda  $B_{az}$ . Logo, o corregristo de  $I_2(t)$  com  $I_1(t)$  pode ser obtido pela operação  $I_{02}(t) = I_2(t + \Delta t)$ .

O processamento SAR monocanal de duas visadas pode ser representado através da antena do SAR com a abertura do feixe dada por  $\Delta\theta_a$ , dividida em duas subaberturas  $\Delta\theta_a/2$ , conforme a geometria disposta na Figura 3a. A configuração disposta nessa figura implica em uma divisão espectral azimutal sem superposição, como indicado na Figura 3b.

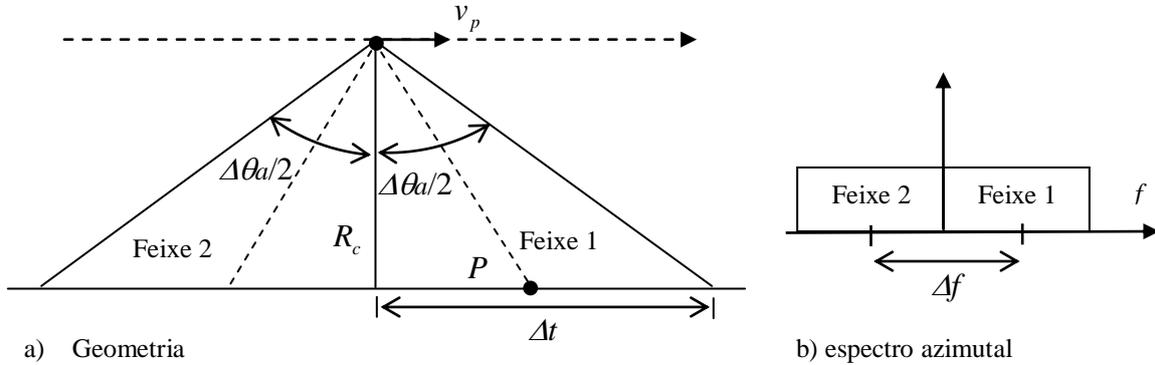


Figura 3. Vista de topo da geometria de um sistema SAR com um canal e multivisada.

No caso multivisada, para uma cena com alvos estacionários, tem-se:

$$\begin{cases} \xi_1(f) = \xi(f - \Delta f / 2) \\ \xi_2(f) = \xi(f + \Delta f / 2), \Delta f = B_{az} / 2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1(t) = I(t) \exp(-j2\pi\Delta f t) \\ I_2(t) = I(t) \exp(+j2\pi\Delta f t). \end{cases} \quad (8)$$

onde,  $\xi_1(f)$  e  $\xi_2(f)$  são os espectros das imagens  $I_1(t)$  e  $I_2(t)$ , respectivamente,  $\xi(f)$  é o espectro de  $I(t)$ , que representa a imagem da cena observada com banda  $\Delta f$ , centrada em zero, e  $B_{az}$  é a banda do *chirp* azimutal.

O corregristo das imagens multivisadas é obtido com  $\xi_{01}(f) = \xi_1(f + \Delta f / 2)$  e  $\xi_{02}(f) = \xi_2(f - \Delta f / 2)$ . A diferença temporal entre uma visada e outra é dada por  $\Delta t = T_i/2$ .

O DPCA faz a subtração das imagens complexas dos dois canais, atuando como um filtro passa altas que rejeita o *clutter* estacionário, podendo ser usado tanto no conjunto de duas imagens corregristadas de um SAR com dois canais (Elarrat, 2011), quanto em um par de imagens multivisadas de um SAR monocanal. A imagem diferença na saída de um DPCA é dada por:

$$D(t) = I_1(t) - I_2(t) = \begin{cases} |I_1(t)| \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t)\right] \left\{ 1 - \exp\left[j\frac{\pi v_{sr}}{\lambda d_x v_p}\right] \right\}, \text{ dois canais} \\ |I_1(t)| \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t)\right] \left\{ 1 - \exp\left[j\frac{\pi v_{sr} R_c \Delta\theta_a}{\lambda v_p}\right] \right\}, \text{ um canal} \end{cases} \quad (9)$$

onde, a diferença de distância entre os canais é a) para o SAR com dois canais, dado que  $\Delta t = d_x / 2v_p$ , tem-se  $v_{sr} \Delta t = d_x / 2v_p$ , devido ao deslocamento do alvo no período de tempo  $\Delta t$  e b) para o SAR monocanal  $v_{sr} \Delta t = v_{sr} R_c \Delta\theta_a / (2v_p)$ . Tem-se ainda que

$$|D(t)| = |I_1(t)| \left| \text{sen}\left(\frac{\pi}{\lambda d_x v_p} v_{sr}\right) \right|, \text{ dois canais e } |I_1(t)| \left| \text{sen}\left(\frac{\pi R_c \Delta\theta_a}{\lambda v_p} v_{sr}\right) \right|, \text{ um canal.} \quad (10)$$

Em ambos os casos, alvos com velocidade  $v_{sr} \neq 0$  ou  $v_{rg} \neq 0$  são rejeitados pelo DPCA. A Figura 4 mostra o diagrama de blocos do processo de detecção dos alvos móveis com o sistema SAR de um único canal na configuração multivisada, com duas imagens coregistradas e o DPCA.

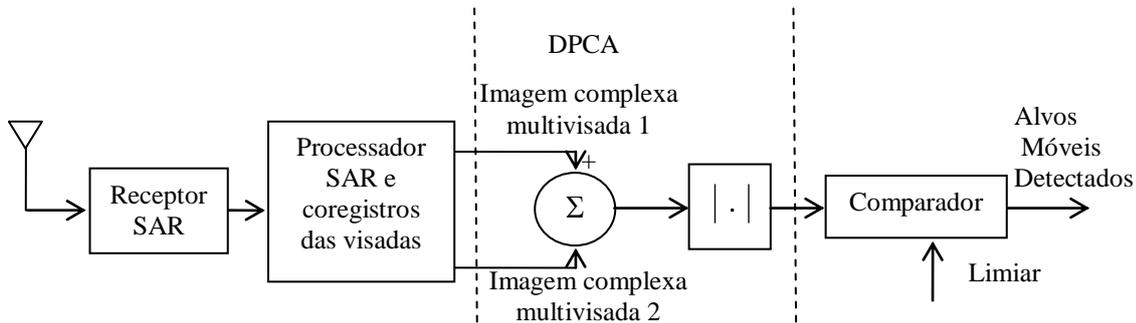


Figura 4. Detecção de alvos móveis utilizando processamento com multivisada e o DPCA.

Os alvos móveis com velocidades não nulas passam pelo DPCA, que rejeita o *clutter* estacionário. O limiar serve para rejeição do resíduo do *clutter* estacionário extenso, que apesar de ter um desvio Doppler nulo possui um espalhamento espectral.

O alvo com velocidade azimutal passa pelo DPCA, mas em cada visada é apresentado em uma posição diferente. Isso possibilita a estimativa da velocidade  $v_{az}$  do alvo medindo-se a diferença entre as duas posições, dada por  $\delta x$ , na imagem DPCA. A velocidade azimutal pode então ser estimada por  $\delta x = v_{az} \Delta t \Rightarrow v_{az} = \delta x / \Delta t \cong 2v_p \delta x / (R_c \Delta \theta_a)$ .

A estimativa da velocidade radial é realizada através da estimativa da frequência Doppler-centróide do espectro azimutal dos dados brutos comprimidos em range. A Figura 5 mostra a frequência Doppler-centróide da velocidade em *slant range*, dado que  $f_{dc} = -2v_{sr} / \lambda$ .

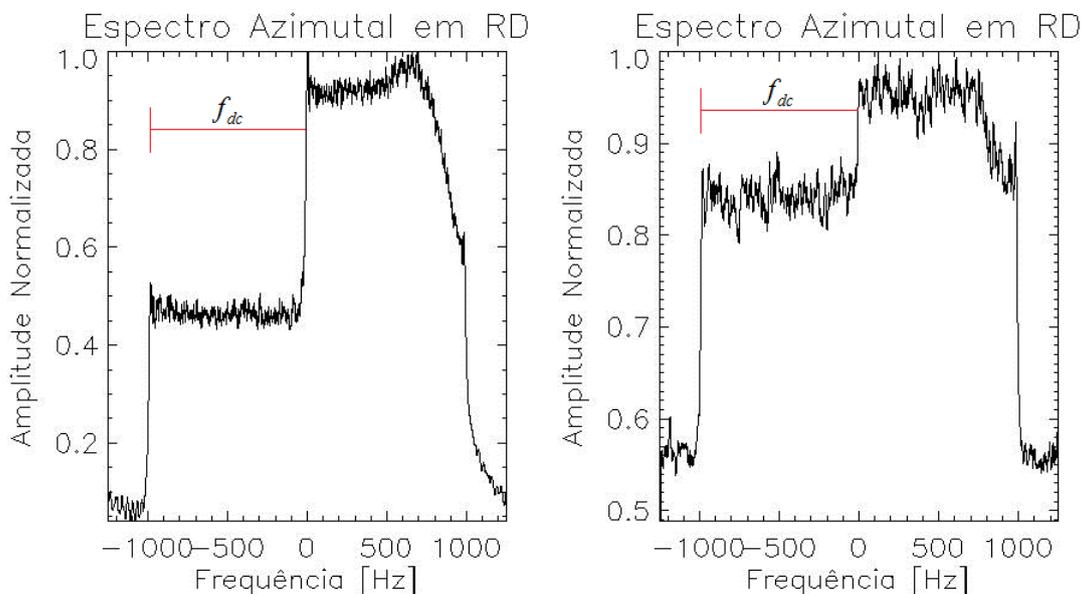


Figura 5. Espectro dos dados comprimidos em range: CNR=30dB (esq.) e CNR=0dB (dir.).

#### 4. Resultados

Nesta sessão avalia-se o desempenho do algoritmo DPCA proposto frente à dinâmica de comportamento dos alvos, e a estimativa das componentes do vetor velocidade destes alvos. Considera-se uma imagem SAR em particular com quatro alvos de comportamentos distintos: alvo 1 ( $v_{az} = 0, v_{sr} = 0$ ); alvo 2 ( $v_{az} = 0, v_{sr} = -7\text{m/s}$ ); alvo 3 ( $v_{az} = 10\text{m/s}, v_{sr} = 0$ ); e alvo 4 ( $v_{az} = -7\text{m/s}, v_{sr} = 12\text{m/s}$ ).

Dados de simulação:  $v_p = 200\text{m/s}$ ;  $H = 5500\text{m}$ ;  $\lambda = 0,03\text{m}$ ;  $\text{PRF} = 2500\text{Hz}$ ; comprimento efetivo da antena em azimute  $0,2\text{m}$ ; *pixel spacing* em azimute  $0,08\text{m}$ ; *pixel spacing* em range  $0,5\text{m}$ ;  $T_i = 1,22\text{s}$ ; resolução em azimute  $0,4\text{m}$ ; resolução em range  $2,0\text{m}$  e *squint angle* nulo.

Os testes realizados mostraram que o alvo 1 (estacionário) foi rejeitado, e fixando-se uma razão sinal-clutter (SCR) igual a  $30\text{dB}$  e variando-se a razão clutter-ruído (CNR), tem-se alvos detectados até uma  $\text{CNR} \geq -10\text{dB}$ .

A Figura 6, enfatizando-se os alvos, mostra a soma do módulo das imagens multivisada (esq.) e a saída do processador DPCA (dir.), considerando-se uma relação clutter-ruído (CNR) igual a  $-10\text{dB}$  e uma relação sinal-clutter (SCR) igual a  $30\text{dB}$ . Nessa figura nota-se, nos alvos 3 e 4, o efeito da velocidade azimutal do alvo que provoca duas detecções em posições azimutais diferentes, uma em cada imagem multivisada.

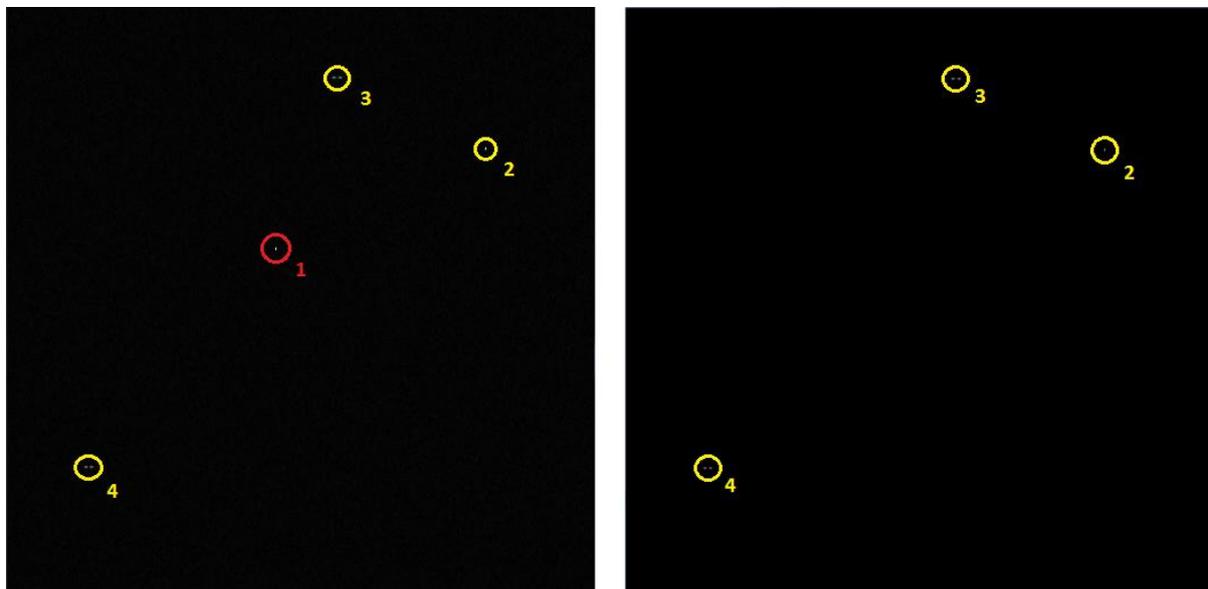


Figura 6. Soma do módulo das imagens multivisada (esq.) e saída do DPCA (dir.).

A Tabela 1 mostra os resultados das estimativas das componentes do vetor velocidade dos alvos destacados na saída do DPCA. Observa-se que não há estimativa de velocidade para o alvo 1 (estacionário) devido à sua rejeição na saída do DPCA.

Tabela 1. Estimativas das componentes de velocidade dos alvos móveis:  $\text{SCR} = 25\text{dB}$  e  $\text{CNR} = 0\text{dB}$ .

Alvos	$\hat{v}_{sr}$ (m/s)	Erro em $\hat{v}_{sr}$ (%)	$\hat{v}_{az}$ (m/s)	Erro em $\hat{v}_{sr}$ (%)
2	-6,95	0,72	0,00	0,00
3	0,00	0,00	10,11	1,10
4	11,75	2,13	-7,14	2,00

Nas condições do cenário escolhido tem-se que: a) foi possível a detecção dos alvos móveis; b) a estimativa da velocidade azimutal apresentou um erro máximo de  $2,00\%$  c) a estimativa da velocidade radial por meio frequência Doppler centróide teve um erro máximo de  $2,13\%$ .

Na simulação realizada observou-se que, com  $SCR=25\text{dB}$  e  $CNR=0\text{dB}$ , a menor velocidade em *range* e em azimute detectável foi de aproximadamente  $2\text{m/s}$  e  $1\text{m/s}$ , respectivamente.

## 5. Considerações Finais

Foi proposta uma estrutura de um processador para detectar e estimar as velocidades de alvos móveis utilizando um SAR monocanal e o algoritmo DPCA. Os resultados obtidos por meio de simulações mostram a viabilidade de utilização desse processador em sistemas SAR monocanal.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP/CT-Aeronáutico que, por meio do Projeto AEROSAR (ITA e FUNDEP), deu suporte financeiro a este estudo e ao CNPq pela concessão de uma bolsa de mestrado.

## Referências Bibliográficas

- BETHKE, K. -H. et al. **Air - and spaceborne monitoring of road traffic using SAR moving target indication - Project TRAMRAD**. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v.61, p.243–259, 2006.
- CUMMING, Ian G.; WONG, Frank H. **Digital processing of synthetic aperture radar data**. Boston: Artech House, 2005. 660p.
- ELARRAT, I. F. **Deteção e estimação de velocidade de alvos móveis em imagens SAR utilizando multicanais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- HINZ, S.; MEYER, F.; LAIKA, A.; BAMLER, R. Spaceborne traffic monitoring with dual channel Synthetic Aperture Radar – theory and experiments. Proceeding of the IEEE, Computer Society Conference on, CVPR 2005, Vol.3, p.7-7, 20-26, June 2005.
- KIRSCHT, M. **Detection and focused imaging of moving objects evaluating a sequence of single-look SAR images**. In: International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 3., 1997, Copenhagen. Proceedings... [S.l.: s.n.], 1997. v. I, p. 393–400.
- KIRSCHT, M. **Detection and focused imaging of moving objects evaluating a sequence of single-look SAR images**. In: International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 3., 1997, Copenhagen. Proceedings... [S.l.: s.n.], 1997. v. I, p. 393–400.
- KLEMM, R. **Principles of Space-Time Adaptive Processing**. 3 ed. London, UK: IET, 2006.
- LIVINGSTONE, C. E. et al. An airborne synthetic aperture radar (SAR) experiment to support RADARSAT-2 ground moving target indication (GMTI). **Canada Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 794-813, 2002.
- SHARMA, J.J.; GIERULL, C.H.; COLLINS, M.J. **The influence of target acceleration on velocity estimation in dual-channel SAR-GMTI**. In: IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, Vol. 44, N. 1, pp. 134-147, Jan 2006.
- SILVA, A. Q. **Deteção de alvos móveis utilizando Radar de Abertura Sintática com uma única antena**. 2011. 123f. Tese de Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação – Área de Telecomunicações - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.