

Detecção de Navios na Bacia de Campos usando Imagens SAR TerraSAR-X

Rafael L. Paes^{1,2}, João A. Lorenzetti², Douglas F. M. Gherardi²

¹Instituto de Estudos Avançados – IEAv
Divisão de Geointeligência

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto

Paes, R. L., rlpaes@dsr.inpe.br, Tel +55-12-39475370, Fax +55-12-39475370. Lorenzetti, J. A. loren@dsr.inpe.br, Tel +55-12-3945-6485, Fax +55-12-3945-6449. Gherardi, D. F. M., douglas@dsr.inpe.br, Tel +55-12-3945-6508, Fax +55-12-3945-6449.

RESUMO

A extensa costa brasileira e o crescente tráfego marítimo conduzem à busca por melhores meios de vigilância que auxiliem no controle do tráfego dos navios. O imageamento SAR orbital é uma importante ferramenta, especialmente devido sua habilidade de trabalhar dia e noite, com ou sem cobertura de nuvens e com regular capacidade de revisita. No presente estudo, alguns conceitos bem conhecidos sobre detecção de alvos em imagens SAR são investigados, aplicando-os às imagens do satélite TerraSAR-X (TSX) no modo ScanSAR (com 16m de resolução espacial e com área coberta de 100x150km), nas polarizações VV e HH. Estimaram-se os parâmetros estatísticos e através do teste de Kolmogorov-Smirnov verificou-se o ajuste das imagens TSX à distribuição K. O algoritmo de detecção baseado no conceito da Taxa Constante de Falso Alarme (*Constant False Alarm Rate*, em inglês – CFAR) é aplicado e sua performance é, então, verificada. A influência do ângulo de incidência, do tamanho das janelas do CFAR e da Probabilidade de Falso Alarme (PFA) é posteriormente analisada.

Palavras-chaves — Detecção de navios, CFAR, TerraSAR-X, distribuição K, imagens SAR, satélite.

1. INTRODUÇÃO

Neste artigo, um algoritmo para detecção de navios baseado no bem estabelecido conceito CFAR foi aplicado em imagens SAR na banda X obtidas do satélite alemão TerraSAR-X, e seus resultados foram avaliados. A Bacia de Campos, no Rio de Janeiro, é um local sobre uma área oceânica onde há exploração de petróleo com muitas plataformas. Associado a isto, o intenso e crescente tráfego marítimo aumenta os riscos de colisão e derramamento de óleo. Estes riscos podem ser monitorados ou, mesmo, gerenciados por um sistema de vigilância baseado em imagens de satélites, os quais têm mostrado resultados bastante eficientes e com respaldo na

literatura científica. Recentes atos de pirataria e terrorismo ocorridos pelo mundo reforçam o potencial deste tipo de aplicação.

2. MATERIAS E MÉTODOS

O satélite TerraSAR-X transporta um sensor SAR, operando na banda X (9,3 GHz), voando em uma órbita quase-polar sol-síncrona a uma altitude de 514km. Três imagens com polarização HH e duas com VV, em 16 bits amplitude (inicialmente), foram utilizadas (Tabela 1) para detectar os alvos na superfície marinha da Bacia de Campos, incluindo as vizinhanças do porto do Rio de Janeiro e das plataformas *offshore*. Todas as imagens foram adquiridas no modo ScanSAR, o qual foi escolhido por prover a maior cobertura espacial disponível para este satélite/ sensor. As imagens têm processamento *multilook*, são radiometricamente melhoradas (RaN *preprocessed*) e georreferenciadas. O modo ScanSAR do TSX possui a capacidade de cobrir uma área de 100x150km e uma resolução espacial de 16m. Foram utilizadas como verdade de campo as localizações fornecidas pelos dados do Sistema de Identificação Automática (*Automatic Information System*, em inglês – AIS) e pelo conhecimento das posições das plataformas. As condições dos ventos de superfície e da meteorologia, coincidentes com as imagens TSX, foram obtidas dos satélites Quikscat e GOES-10, respectivamente.

TABELA 1 – IMAGENS TERRASAR-X UTILIZADAS

Data	Modo/ Swath	Res.	Pol.	Orbita	Visada	Hora (UTC)
12 julho 2008	ScanSAR/ 100x150km	16 m	VV	Asc.	Right	08:12
24 julho 2008	“	“	VV	Asc.	Right	21:08
09 agosto 2008	“	“	HH	Asc.	Right	21:16
30 outubro 2008	“	“	HH	Desc.	Right	08:12
04 novembro 2008	“	“	HH	Desc.	Right	10:36

Estas imagens possuem um tamanho em torno de 17000x20000 pixels, então, para facilitar o processamento, foram divididas em imagens menores com o tamanho de 5000x5000 pixels. Cada imagem foi convertida para valores em intensidade, a partir dos quais a autocorrelação espacial entre pixels foi calculada. O teste de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para verificar se os elementos representantes do *clutter* oceânico ajustam-se à distribuição K. Os parâmetros da distribuição K são a média amostral, o Número Equivalente de Looks (NEL), e o parâmetro ordem (ν). O NEL é obtido pela Equação 1 e ν , que é resolvido numericamente, pela Equação 2 [2]:

$$NEL = \frac{Mean^2}{Variance} \quad (1)$$

$$\ln \nu - \psi^{(0)}(\nu) + \frac{\nu}{ENL} \left(\frac{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i^2}{\left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \right)^2} \right) = \ln \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \right) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \ln x_i + \frac{1}{2ENL} \quad (2)$$

onde ν é o parâmetro ordem da distribuição K; $\psi^{(0)}$ é a função digamma; e x_i é cada elemento da amostra. A detecção de alvos é baseada em um algoritmo de processamento local chamado CFAR que localiza amostras das imagens que são estatisticamente maiores do que seu arredor oceânico [4] [5]. O algoritmo CFAR percorrerá toda a imagem e calculará o limiar adequado para discriminar alvos e *background* marinho, baseado em uma PFA previamente estabelecida e na estimação dos parâmetros da distribuição. Valores acima deste limiar serão considerados como alvos, abaixo dele, *clutter* oceânico. Finalmente, nós cruzamos as localizações dos *clusters* detectados com as informações AIS, utilizadas como verdade de campo e, assim, avaliar o desempenho do algoritmo de detecção [5]. A Figura-de-Mérito (FdM), dada pela Equação 3, foi empregada como medida de desempenho [1]:

$$FdM = \frac{N_{td}}{N_{fa} + N_{vc}} \quad (3)$$

onde N_{td} é número total de detecções verdadeiras; N_{fa} é o número de falsos alarmes; e N_{vc} é o número de verdades de campo.

Conforme sugestão de [6], o tamanho das janelas será 5x5, 7x7 e 15x15 pixels para a do alvo, do *buffer* e do *background*, respectivamente. De agora em diante, nos referiremos à configuração das janelas como 5_7_15. A detecção de alvos ocorrerá após a definição do limiar. Para calcular este limiar, que também é resolvido numericamente (Equação 4), onde o usuário deve definir uma PFA, enquanto os outros parâmetros (parâmetro de ordem e média amostral) são estimados das amostras das

imagens, adaptativamente. O algoritmo compara o valor médio da janela do alvo com o limiar selecionado. Se este valor for igual ou superior ao limiar estabelecido, então, serão aceitos como alvos. Caso contrário, serão rejeitados [2]

$$PFA^{(K)} = \frac{2}{\Gamma(\nu_B)} \left(\frac{\nu_B t}{\mu_B} \right)^{\nu_B/2} K_{\nu_B} \left[2 \sqrt{\frac{\nu_B t}{\mu_B}} \right] \quad (4)$$

onde μ_B é o valor médio da janela do *background* que coleta os dados do *clutter*; e t que o valor central da janela do alvo, o qual será testado como um possível limiar, se corresponder a uma PFA pré-definida.

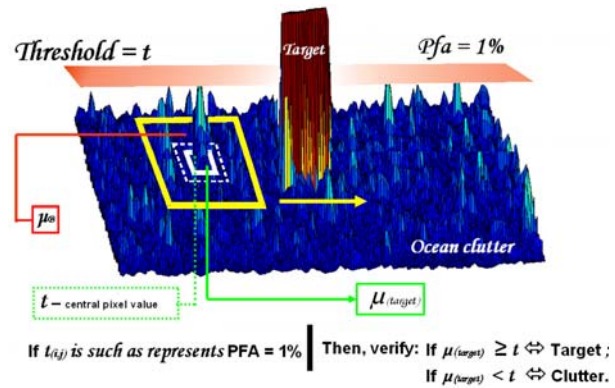


Figura 1 – Esquema de detecção: o conjunto de janelas deslizantes computa as estatísticas locais e aplicam a regra de decisão baseada na Probabilidade de Falsos Alarmes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estimação de parâmetros e verificação da autocorrelação espacial

Imagens de alta resolução espacial, como as do TerraSAR-X, representam muito bem a textura da cena. Isto requer uma atenção especial na escolha do tamanho da área selecionada para a estimação de parâmetros, pois fortes variações de brilho poderão afetar a correta estimação. Percebe-se que as regiões na imagem que correspondem ao cavado das ondas são normalmente homogêneas (com pequena variação de brilho), o que as torna favoráveis para uma apropriada estimação. O parâmetro de ordem da distribuição K é muito sensível às variações de brilho, as quais têm influência direta no sucesso dos resultados.

Neste trabalho, a autocorrelação espacial de 0,2 entre dois pixels foi considerada como razoavelmente baixa e com esta porcentagem é possível observar resultados consistentes. A autocorrelação calculada em amostras do *near*, *mid* e *far range* produziram resultados muito

similares em todas as estimações (Figura 2): três *lags* verticais (na direção em azimute) e dois *lags* na horizontal (em range) foram utilizados para descorrelacionar as amostras da imagem para a estimação de parâmetros. Após a reamostragem devido a descorrelação, as amostras deverão formar um vetor de 121 elementos; este tamanho proporciona uma relativa pequena variância dos estimadores, no caso de imagens *multilook* como estas [3].

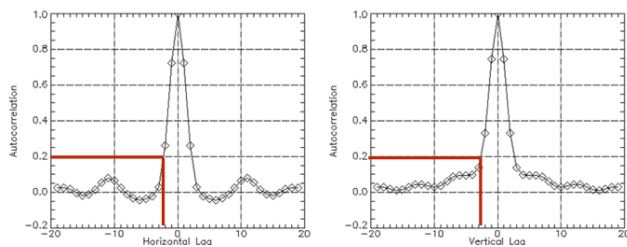


Figura 2 – Resultados comuns às estimações das imagens TerraSAR-X: dois *lags* na horizontal e três *lags* na vertical.

TABELA 2 – PARÂMETROS AMOSTRAS E RESULTADOS DO TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

		TerraSAR-X ScanSAR VV		
		Near range	Mid Range	Far range
Parâmetros amostrais	Média	7472.0165	4733.8843	3758.2727
	2°	10959016.94	5377954.928	3006800.512
	Momento	19	8	4
	Curtose	3.442	4.1986	4.2493
	Assimetria	0.78895	1.1376	1.1567
distribuição K	Assimetria ²	0.62244	1.2941	1.3381
	NEL	5	4	5
	Média	7472.0165	4733.8843	3758.2727
	NEL	5	4	5
	ν	10	6	10
KS test	H	0	0	0
	p-valor	0.57849	0.23568	0.87212
	Ksstat	0.066116	0.10744	0.033058
		TerraSAR-X ScanSAR HH		
		Near range	Mid Range	Far range
Parâmetros amostrais	Média	4747.4711	2202.8512	1625.5124
	2°	7265449.439	906578.2589	609860.2498
	Momento	2		
	Curtose	6.3756	2.819	3.3388
	Assimetria	1.5361	0.67634	0.84007
distribuição K	Assimetria ²	2.3596	0.45744	0.70572
	NEL	3	5	4
	Média	4747.4711	2202.8512	1625.5124
	NEL	3	5	4
	ν	3	10	6
KS test	H	0	0	0
	p-valor	0.87212	0.65767	0.50022
	Ksstat	0.033058	0.057851	0.07438

Para realizar o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), gerou-se uma amostra sintética aleatória com distribuição K, depois foi comparada a uma amostra da imagem. Como resultado, verificou-se que distribuição K ajustou-se muito bem às amostras, como pode ser visto na Figura 3 e na Tabela 2. Para este teste de KS, o nível de significância usado foi de 1%. Então, se o p-valor for maior que 0,01 (1%), as amostras passarão no teste. A

letra H na Tabela 2 significa Hipótese. Se zero for o resultado, significará que hipótese nula (que ambas amostras possuem a mesma distribuição) foi aceita. Por outro lado, a presença do número 1 (um) representará a aceitação da hipótese alternativa (as amostras não possuem a mesma distribuição). A diferença máxima entre as duas CDF Empíricas (Empirical CDF, em inglês – ECDF) é mostrada pelo item Ksstat.

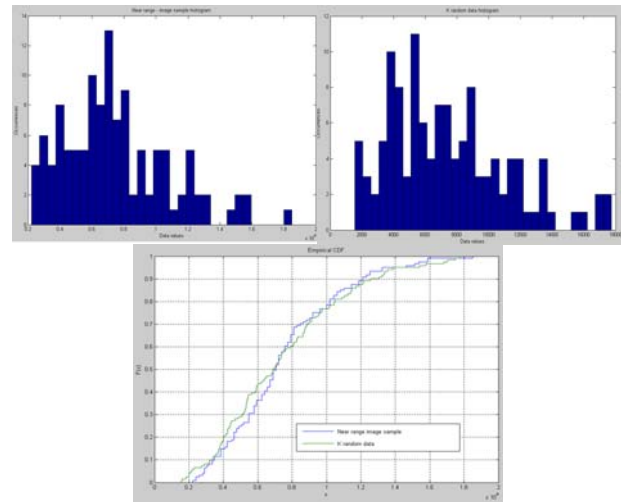


Figura 3 – Um comparação entre um histograma de uma amostra do *near range* (esquerda) e um histograma de uma amostra sintética com distribuição K (direita). Um exemplo da similaridade entre a ECDF de uma amostra K distribuída e de uma amostra da imagem (baixo).

3.2 Ângulo de incidência, configuração das janelas e influência da PFA

Falsos alarmes são mais frequentes no *far range* e as perdas de detecções tendem ocorrer no *near range*, quando os ventos de superfície não são tão intensos (<10kt) e não há células de chuva significantes e/ ou presença de nuvens *cumulus nimbus*. Entretanto, quando a agitação na superfície oceânica aumenta, falsos alarmes também podem aparecer no *near range*. Condições meteorológicas e o ângulo de incidência influenciam na escolha do limiar: se o retorno do sinal do *background* é alto, o limiar será mais alto do que o habitual.

Após verificações empíricas, observou-se que a configuração das janelas 5_7_15 foi considerada como a mais indicada para ser aplicada às imagens com esta resolução. Para situações recorrentes, um bom compromisso entre configuração de janelas e PFA seria: 5_7_15 e 1%, respectivamente.

Outra maneira de reduzir os falsos alarmes seria diminuir a PFA, com o correspondente aumento do limiar. A razão entre os valores médios da janela do alvo (TGT) e da janela do *background* (BG) para os alvos aceitos também aumentará. A Tabela 3 mostra este efeito ao mudar a PFA de 1% para 0,1%. Com a redução da PFA os valores dos

pixels aceitos como alvos serão, agora, 27% mais intensos do que aqueles para a PFA de 1%.

TABELA 3 – INFLUÊNCIA DA PROBABILIDADE DE FALSO ALARME SOBRE O LIMAR (THRESHOLD)

Data da imagem:	Config. janelas:	Far range
09 agosto 2008	5 7 15	
Threshold	PFA = 1%	Razão TGT/BG
17161	0,0097371	2.78
Threshold	PFA = 0,1%	Razão TGT/BG
28900	0,00095756	3.52

3.3 Verificação do Desempenho

Uma Figura-de-Mérito (FdM) foi proposta por [1] e é uma razão entre o número total de alvos verdadeiros detectados, o número de falsos alarmes e o número total de verdades de campo. As imagens TSX mostraram um bom desempenho, conforme este critério. A Tabela 4 mostra todas as imagens processadas e as respectivas FdM.

No entanto, esta FdM não é a melhor medida porque leva em conta qualquer ponto brilhante na imagem (pixel isolado), que tenha passado indevidamente no teste, como falso alarme. Então, por exemplo, na imagem de 24 de julho de 2008 muitos pixels isolados apareceram, reduzindo o desempenho do detector. A presença de muitas células de chuva foi responsável pela geração de áreas heterogêneas, e como consequência, os parâmetros não foram apropriadamente estimados, proporcionando os falsos alarmes.

TABELA 4 – DESEMPENHO DA DETECÇÃO

Data imagem	# Falsos Alarmes	# Perdas	# Detec. Verdad.	# Verd. campo	FdM
12 julho 2008	01	-	04	04	0,80
24 julho 2008	15	01	24	25	0,60
09 ago 2008	-	-	06	06	1
04 nov 2008	07	-	22	22	0,75
30 out 2008	-	02	41	43	0,95

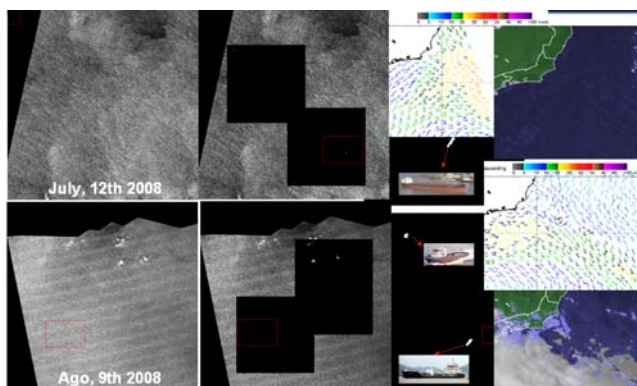


Figura 4 – Exemplos de detecção: pedaço da imagem original (esquerda); áreas detectadas (centro); velocidade do vento – imagem Quikscat – e cobertura de nuvens – imagem GOES-10 – dados auxiliares (direita).

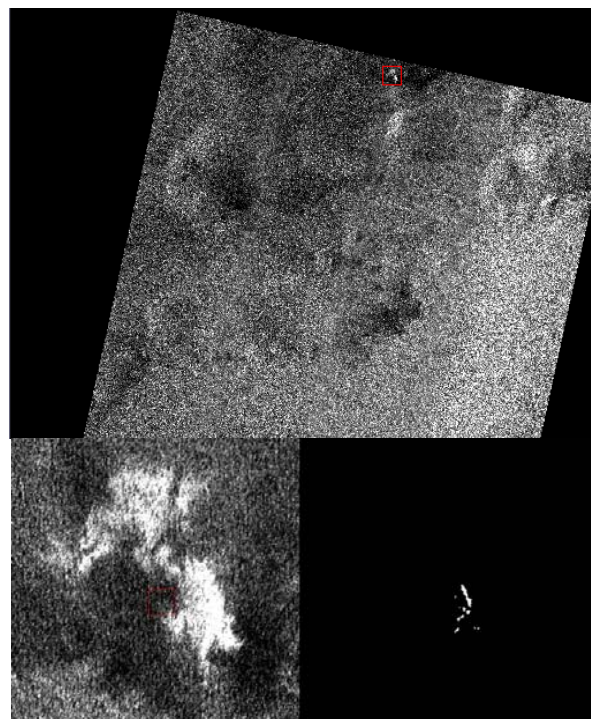


Figura 5 – Imagem 24 de julho de 2008. Exemplo de uma fonte inevitável de falsos alarmes: nuvens *cumulus nimbus*. O zoom na imagem (baixo-esquerda) corresponde à caixa vermelha da imagem acima e à esquerda-baixo está a imagem correspondente ao resultado da detecção (o algoritmo não conseguiu evitá-lo).

4. CONCLUSÃO

Podemos concluir que o modo ScanSAR do TerraSAR é um bom compromisso entre área coberta, resolução espacial e capacidade de detecção. A configuração de janelas 5_7_15 e 1% de PFA mostraram os melhores resultados e recomendamos como configuração padrão. A distribuição K ajustou-se satisfatoriamente às amostras das imagens e a correta estimação de parâmetros conduz a bons resultados. O algoritmo CFAR teve um bom desempenho para as imagens TSX com uma performance média de 82,36%.

5. AGRADECIMENTOS

Nós gostaríamos de agradecer à Infoterra por generosamente ceder as imagens TerraSAR-X e ao Cenpes/ PETROBRAS por prover as informações das plataformas de petróleo na região imageada e usadas como verdade de campo. Nós também somos gratos à AISLive.com e à Marinha do Brasil por gentilmente

cederem os dados AIS. Nosso especial agradecimento aos Esquadrões de Patrulha da Força Aérea Brasileira que proporcionaram a aquisição de verdade de campo através da localização das embarcações durante as missões de patrulhamento.

6. REFERÊNCIAS

[1] Foulkes, S.B., Booth, D.M. “Ship Detection in ERS and Radarsat Imagery using a Self-Organising Kohonen Neural Network”. *Proceedings of Conference on Ship Detection in Coastal Waters*, Digby, Nova Scotia, Canada, 2000.

[2] Oliver C., Quegan S. “Understanding synthetic aperture radar images”, Artech House, Boston, Chapter 5 - pp.129, 1998.

[3] Redding N.J. “Estimating the Parameters of the K Distribution in Intensity Domain”. Surveillance Systems Division - Electronics and Surveillance Research

Laboratory - Defence Science and Technology Organisation – DSTO. July, 1999.

the Intensity Domain

[4] Rey M.T, Drosopoulos A., Petrovic D. “A search procedure for ships in RADARSAT imagery”, *Defence Research Establishment Ottawa - DREO*. Ottawa, November 1996.

[5] Vachon, P.W., Campbell, J., Bjerklund, C., Dobson, F., Rey, M. “Ship detection by the RADARSAT SAR: Validation of Detection Model Predictions”. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1997, 23 (1): 48-59.

[6] Wackerman, C., Clemente-Colon, P., Pichel, W., Friedman, K., Li, X. “Automatic Detection of Ships Using RADARSAT SAR Imagery”. *Proceedings of Conference on Ship Detection in Coastal Waters*, Digby, Nova Scotia, Canada, 2000.