

Influência de Janelas Internas em Filtros CFAR para Algoritmos de Detecção de Alvos em Imagens SAR

Lucas P. Ramos, Dimas I. Alves, Renato Machado e Bartolomeu F. Uchôa-Filho

Resumo— Este artigo investiga a influência de diferentes janelas internas utilizadas no filtro CFAR (*Constant False Alarm Rate*) para algoritmos de detecção de mudanças (CDA) em imagens de radares de abertura sintética (SAR) de resolução de comprimento de onda VHF. Os desempenhos obtidos, em decorrência das janelas aplicadas no filtro CFAR, foram avaliados em termos das métricas de probabilidade de detecção (P_d) e da taxa de falsos alarmes (FAR) para o algoritmo de detecção de mudanças proposto pela FOI (*Swedish Defence Research Agency*), com dados obtidos pelo sistema CARABAS II. Os resultados apresentados mostram que ao se utilizar janelas internas no filtro CFAR, pode-se obter melhorias significativas no desempenho de algoritmos de detecção de mudanças.

Palavras-Chave— CFAR, CDA, CARABAS II, SAR.

Abstract— This paper investigated the influence of different inner windows used in CFAR (*Constant False Alarm Rate*) filter for change detection algorithms (CDA) in VHF wavelength resolution synthetic aperture radar (SAR) images. The performance, obtained due to the adaptation of inner window into CFAR, is evaluated in terms of detection probability (P_d) and false alarm rate for the CDA proposed by the FOI (*Swedish Defense Agency Research*) and the data obtained by the CARABAS II system. Results show that by using inner windows in the CFAR, significant improvements can be obtained in the performance of change detection algorithms.

Keywords— CFAR, CDA, CARABAS II, SAR.

I. INTRODUÇÃO

A aplicação de SAR (*Synthetic Aperture Radar*) para o sensoriamento remoto da Terra vem ganhando ênfase há mais de três décadas, seja para o monitoramento do gelo marinho [1], para o monitoramento de áreas agrícolas [2], obtenções de mapas topográficos [3], atividades militares [4]-[5], entre outras aplicações [6]. Sua elevada utilização está relacionada, principalmente, a característica da tecnologia em fornecer imagens de alta resolução sem depender das condições climáticas, ou da presença de luz, assim como, a possibilidade de penetração do sinal em áreas com camuflagem natural (FOPEN - *Foliage Penetration*) [7]-[8].

Sistemas SAR FOPEN, quando utilizados com sinais nas bandas P e VHF (*Very-High Frequency*), se tornam de elevado interesse para diversos setores, seja para aplicações civis, e.g., busca ou monitoramento de atividades irregulares (ou ilícitas) realizadas em região com alta densidade de vegetação como é o caso das fronteiras terrestres da Amazônia Brasileira, seja em aplicações de interesse militar, e.g., detecção de alvos

militares ou de instalações ilegais para a defesa do território em regiões florestais [9]. Essa combinação se justifica pelo fato de o sistema ter uma boa capacidade de penetração em áreas de floresta e de ser menos sensível a objetos que tenham dimensões menores que o seu comprimento de onda, i.e., galhos de árvores, rugosidade do solo, folhas e ramos menores [10].

Nesse contexto, estão inseridos os radares suecos CARABAS (*Coherent All Radio BAnd Sensing*), os quais vêm sendo amplamente utilizados para as aplicações supracitadas desde a década de 90, através de estudos fomentados, principalmente, pela FOI (*Swedish Defence Research Agency*) e pela empresa sueca Saab [10]-[12]. Estes radares contam com três versões (I, II e III), sendo que os dados utilizados para este trabalho são referentes ao sistema CARABAS II, o qual atua em uma faixa de frequência de 20-90 MHz, correspondendo a comprimentos de onda entre 3,3 m e 15 m, com resolução de, aproximadamente, 2,5 m [13]. Uma boa maneira de detectar alterações realizadas pela atividade humana é usando um algoritmo CDA (*Change Detection Algorithm*). Este tipo de algoritmo busca identificar as mudanças de maior relevância na imagem, a partir da aquisição de imagens em momentos diferentes [14]-[15]. É importante salientar que para fins de comparação, o CDA proposto pela FOI em [13] será utilizado neste artigo como *framework* de testes.

Este artigo avalia a influência do uso de diferentes janelas internas na normalização CFAR (*Constant False Alarm Rate*), usualmente utilizada em algoritmos de detecção de mudanças [16]. Para isso, foram consideradas diferentes geometrias e tamanhos de janelas internas em conjunto com a adequação do limiar de detecção utilizado no detector de razão de verossimilhança, para se obter melhores desempenhos em termos de FAR (*False Alarm Rate*). Com o estudo, observou-se que o desempenho do algoritmo pode ser bastante influenciado de acordo com a modificação no filtro CFAR. É importante salientar que até o presente momento não foram encontrados estudos referentes ao impacto causado em algoritmos CDA pelo uso de diferentes janelas internas no CFAR.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção II descreve o conjunto de dados utilizados para o estudo proposto. A Seção III apresenta o algoritmo de detecção de mudanças proposto pela FOI [13]. Na Seção IV, são apresentadas as diferentes geometrias e tamanhos de janelas internas adicionadas ao filtro CFAR utilizado no algoritmo proposto. Os resultados obtidos com o estudo são apresentados e discutidos na Seção V. Por fim, a Seção VI apresenta as considerações finais do trabalho.

Lucas P. Ramos, Renato Machado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, Brasil, e-mail: {lucaspr, rmachado}@ita.br; Dimas I. Alves, Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, Brasil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, e-mail: dimasalves@unipampa.edu.br; Bartolomeu F. Uchôa Filho, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, e-mail: uchoa@eel.ufsc.br.

II. CONJUNTO DE DADOS

O conjunto de dados utilizados neste trabalho consiste em 24 imagens obtidas com o sistema CARABAS II, divulgadas pela FOI e disponível em [17]. A divulgação desse conjunto de imagens tem como objetivo incentivar o desenvolvimento de novos algoritmos para detecção de alvos que estejam camuflados (escondidos) em florestas, com baixa taxa de falsos alarmes [13].

Esse *data set* faz parte de um conjunto de 150 imagens obtidas durante uma campanha de voo em 2002, em uma região militar chamada RFN Vidsel, no norte da Suécia. A região de teste abrange uma área de 2×3 km, e contém, além de zonas florestais e os alvos para detecção, rios, linhas de transmissão, cercas e outras construções [13].

Para esse experimento, foram considerados como alvos 25 veículos militares de médio e grande porte, sendo 10 veículos do modelo TGB11, 8 do modelo TGB30 e 7 do modelo TGB40, com dimensões (comprimento \times largura \times altura) $4,4 \times 1,9 \times 2,2$ m, $6,8 \times 2,5 \times 3$ m e $7,8 \times 2,5 \times 3$ m, respectivamente [13]. Para ilustrar o conjunto de imagens utilizadas, a Figura 1 apresenta um par de imagens fornecidos pela FOI, em que na imagem à esquerda, os alvos estão distribuídos na parte superior esquerda, enquanto na imagem à direita, os alvos estão agrupados no canto inferior direito. Mais informações referentes ao banco de dados utilizado podem ser encontradas em [13].

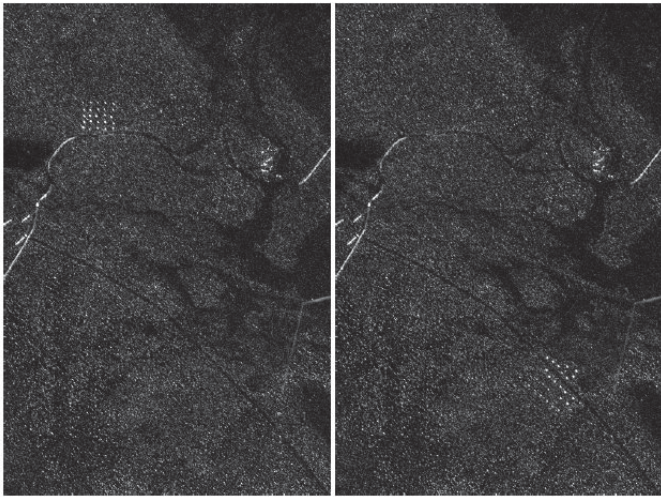


Fig. 1. Exemplo de um par de imagens obtidos pelo sistema CARABAS II.

III. ALGORITMO PROPOSTO PELA FOI

Esta seção apresenta o algoritmo CDA proposto pela FOI [13], baseado na análise de detecção de mudanças apresentada em [18]. A primeira etapa consiste na pré-deteção de mudanças entre uma imagem de interesse e outra de referência. Então, a imagem resultante dessa análise é submetida ao filtro CFAR, e por fim, passa pelo estágio de detecção, conforme é apresentado na Figura 2. Para fins de comparação, foram utilizados os mesmos dados de entrada apresentados em [13].

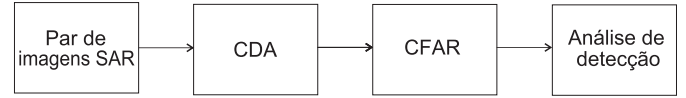


Fig. 2. Algoritmo de detecção proposto pela FOI.

A. CDA - Change Detection Algorithm

Os algoritmos CDA são utilizados com o intuito de identificar alterações de maior relevância na imagem. Para isso, o algoritmo em estudo, se baseia na análise entre uma imagem de interesse, na qual deseja-se identificar posição de alvos, e uma segunda imagem, que é chamada de referência. Como métrica de decisão, utiliza-se a razão de verossimilhança para testar as duas hipóteses (situação com alvo ou sem alvo) e maximizar a probabilidade de detecção (P_d) do alvo, mantendo-se uma taxa de falso alarme (FAR) constante. Pode-se escrever o teste de razão de verossimilhança como:

$$\Lambda = \frac{P(\mathbf{z}|H_1)}{P(\mathbf{z}|H_0)}, \quad (1)$$

em que \mathbf{z} representa o sinal recebido assumindo valores da imagem de interesse e de referência, \mathbf{z}_i e \mathbf{z}_r , respectivamente. Além disso, H_0 representa a hipótese da não existência de alvo e H_1 representa a hipótese de que existe alvo na imagem. As hipóteses H_0 e H_1 podem ser descritas como:

$$\begin{aligned} H_0 &: \mathbf{c} + \mathbf{n} \\ H_1 &: \mathbf{s} + \mathbf{c} + \mathbf{n}, \end{aligned} \quad (2)$$

em que \mathbf{s} é o vetor que indica o sinal alvo em uma das duas imagens, podendo assumir os valores $\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ou $\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, \mathbf{c} e \mathbf{n} são os vetores que denotam a contribuição do *clutter* e do ruído, respectivamente.

A fim de realizar o teste de hipótese apresentado em (1), a contribuição do *clutter* e do ruído foram modeladas assumindo distribuições Gaussianas [18]. É importante salientar que, geralmente, a consideração de uma distribuição Gaussiana para o *clutter* reduz o desempenho do CDA. Com essas suposições e utilizando as simplificações apresentadas em [13] e [19], a razão de verossimilhança pode ser representada da seguinte forma:

$$\mathbf{I}_d[i, j] = \Lambda = \frac{\mathbf{s}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z}[i, j]}{|\mathbf{s}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{s}|}, \quad (3)$$

em que $[i, j]$ referem-se às coordenadas das imagens, com dimensão 3000×2000 *pixels*, em que cada *pixel* compreende a área de 1×1 m², T denota a operação de transposição matricial, \mathbf{C} é a matriz covariância 2×2 estimada a partir de blocos (janelas) de 100×100 *pixels*, percorrendo a imagem com passos de 10 *pixels* até que a imagem tenha sido totalmente percorrida. É importante salientar que antes de realizar esta etapa, aplicou-se um filtro de média 5×5 nas imagens de interesse e referência para reduzir a influência do ruído em \mathbf{z} .

B. CFAR - Constante False Alarme Rate

Visto que o desempenho na detecção é prejudicado pela presença de retornos de interferência devido a reflexos de construções, árvores, linhas de transmissão, entre outros objetos, os esquemas de detecção com um limiar fixo podem acabar resultando em um número excessivo de falsos alarmes ou numa baixa detecção de alvos [7]. Para contornar esse problema, realiza-se uma normalização através do filtro CFAR, a qual tem como objetivo manter a taxa de falso alarme constante, para um determinado limiar de detecção (Th - *Threshold*) [8],[20].

O filtro CFAR avaliado neste estudo é formado por duas janelas: Uma janela externa de 31×31 *pixels*, utilizada para se obter a estatística proveniente do *background* e uma segunda janela interna chamada de janela de guarda ao redor do *pixel* de interesse, de 17×17 *pixels*, preenchida com zeros conforme é ilustrado na Figura 3. Neste processo, o filtro CFAR tem como *pixel* central, o *pixel* de interesse. Assim, o novo *pixel* normalizado é dado por:

$$\mathbf{I}_N[i, j] = \frac{\mathbf{I}_d[i, j] - \mu}{\sigma}, \quad (4)$$

em que $\mathbf{I}_d[i, j]$ é a amplitude do *pixel* de interesse, $\mathbf{I}_N[i, j]$ representa sua nova amplitude após a normalização e μ e σ representam a média e o desvio padrão obtidos com os dados da janela externa, respectivamente.

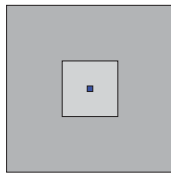


Fig. 3. Diagrama simplificado do filtro CFAR.

C. Análise de Detecção

O primeiro passo nessa etapa consiste em identificar os alvos na imagem através da aplicação de um limiar Th . O principal objetivo deste limiar é manter a probabilidade de falso alarme em níveis baixos, podendo ser um valor adaptável ou fixo [8]. A nova imagem binarizada pode ser descrita a partir da seguinte relação:

$$\mathbf{I}_B[i, j] = \begin{cases} 0 & \text{se } \mathbf{I}_N[i, j] < Th \\ 1 & \text{se } \mathbf{I}_N[i, j] \geq Th. \end{cases} \quad (5)$$

Por fim, são realizadas operações morfológicas na imagem binária com o intuito eliminar *pixels* isolados e de agrupar *pixels* que estejam próximos entre si, conforme pode ser visto em [21]. No estudo foram propostas duas operações, sendo uma operação de erosão seguida de uma de dilatação com um elemento estruturante quadrático de tamanho 3×3 , excluindo os objetos de dimensão menor que o alvo e unindo alvos que estão próximos. Para facilitar a análise do estudo, garantindo que a forma dos objetos detectados seja mantida, utilizou-se apenas uma dilatação nesta etapa. É importante salientar que a utilização de um número maior de operações morfológicas não foi considerado neste artigo.

IV. CFAR MODIFICADO

Com o objetivo de reduzir a taxa de falsos alarmes proposta em [13], foi proposta em [22] uma adaptação ao filtro CFAR, levando-se em consideração a média de um conjunto de *pixels* em torno do *pixel* de interesse, $\mathbf{I}_d[i, j]$ [22]. Nessa análise, ao realizar a média ao redor do *pixel* central, leva-se em consideração mais informações referentes ao alvo, fazendo com que possíveis flutuações nos valores dos *pixels* possam ser suavizadas. É válido lembrar que, o princípio de funcionamento do filtro é semelhante ao apresentado em (4). Entretanto, devem-se levar em consideração informações referentes à nova janela adicionada. O novo *pixel* normalizado será dado por:

$$\mathbf{I}_M[i, j] = \frac{\mu_v - \mu}{\sigma} \quad (6)$$

em que μ_v é o valor médio dos *pixels* contidos na janela em vermelho (Figuras 5,7 e 9), incluindo o *pixel* de teste.

O conjunto de *pixels* pertencentes a esta janela interna (J.I.) pode apresentar diferentes formas e dimensões. Neste trabalho são consideradas algumas janelas de formatos clássicos, apresentados a seguir:

- **Quadrática:** J.I. no formato quadrático. Consideram-se os tamanhos de janelas 3×3 , 5×5 e 7×7 , em que os *pixels* pertencentes a esta J.I. de acordo com a sua dimensão estão destacados em preto conforme a Figura 4. O novo CFAR modificado é apresentado na Figura 5.

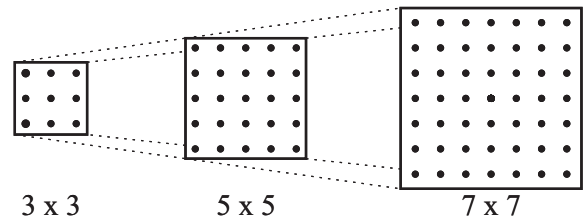


Fig. 4. Geometria e Dimensões da J.I. Quadrática.

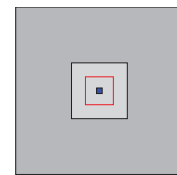


Fig. 5. Diagrama simplificado do filtro CFAR com J.I. Quadrática.

- **Diamante:** J.I. no formato diamante. Consideram-se os tamanhos de janelas 3×3 , 5×5 e 7×7 , em que os *pixels* pertencentes a esta J.I. de acordo com a sua dimensão estão destacados em preto conforme a Figura 6. O novo CFAR modificado é apresentado na Figura 7.
- **Cruz:** J.I. no formato cruz. Consideram-se os tamanhos de janelas 3×3 , 5×5 e 7×7 , em que os *pixels* pertencentes a esta J.I. de acordo com a sua dimensão estão destacados em preto conforme a Figura 8. O novo CFAR modificado é apresentado na Figura 9.

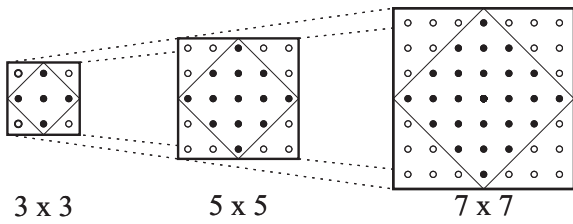


Fig. 6. Geometria e Dimensões da J.I. Diamante.

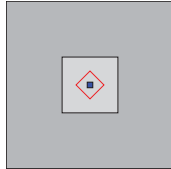


Fig. 7. Diagrama simplificado do filtro CFAR com J.I. Diamante.

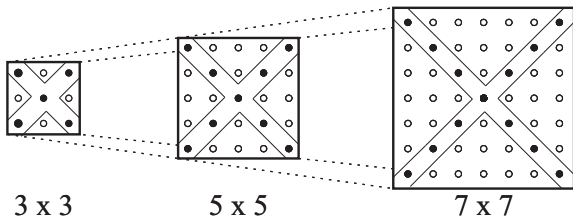


Fig. 8. Geometria e Dimensões da J.I. Cruz.

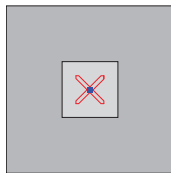


Fig. 9. Diagrama simplificado do filtro CFAR com J.I. Cruz.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para fins de comparação do desempenho das J.I. utilizados no CFAR, utilizam-se como referências os resultados apresentados em [13]. Os resultados foram avaliados em termos da probabilidade de detecção (P_d), a qual é definida pela razão entre a quantidade de alvos detectados e os 25 alvos presentes na imagem e em termos da FAR, a qual é definida pela divisão do número de falsos alarmes pela área de 6 km^2 .

A Tabela I apresenta os resultados obtidos para as diferentes janelas internas apresentadas na Seção IV, adotando o mesmo Th utilizado em [13]. Nesse contexto, observa-se que o tamanho da J.I., quando casado com o tamanho dos alvos em estudo, pode afetar positivamente o desempenho do CDA [16].

Para se avaliar o desempenho de cada J.I. em relação ao algoritmo proposto, variou-se o Th entre 5 e 7, com passos de 0,5, gerando-se assim as curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic Curve*) apresentadas nas Figuras 10-12. Através dos resultados obtidos, observou-se que, em todas as J.I., foi possível obter a mesma P_d apresentada em [13] com uma menor taxa de falsos alarmes.

Em uma outra análise, em que se deseja, exclusivamente, uma menor taxa de FAR, as J.I. Quadrática e Cruz apresentaram uma maior redução, deslocando a curva ROC mais para a origem em comparação com o algoritmo proposto pela FOI para um mesmo valor de Th . Nesse contexto, o CFAR proposto poderia ser utilizado em conjunto com outro algoritmo que garanta uma elevada P_d , tornando o método híbrido uma opção mais adequada.

Por fim, observou-se que as J.I. Quadrática e Cruz apresentaram-se mais sensíveis a variações do Th , tornando sua aplicação mais específica, especialmente a J.I. Cruz. Em contrapartida, a J.I. Diamante comportou-se de forma mais estável em comparação com as demais, de acordo com as Figuras 10-12. Essa solução torna-se interessante, considerando uma aplicação em que se deseja obter uma certa estabilidade na P_d melhorando seu parâmetro em FAR ou até mesmo em uma aplicação em que não seja possível se alterar o Th . Acredita-se que essa estabilidade esteja relacionada com a forma com que os alvos foram distribuídos no terreno, visto que 75% dos alvos foram posicionados de tal maneira a possuírem uma inclinação (mesma seção reta-radar) em relação ao ângulo de passagem do voo [13].

TABELA I

PARÂMETROS FAR e P_d OBTIDOS PARA O ALGORITMO PROPOSTO PELA FOI COM DIFERENTES J.I. E $Th = 6$.

Geometria	Tamanho	P_d (%)	FAR (km^{-2})
FOI	Pixel	98,33	2,47
Quadrático	3x3	98,00	1,24
	5x5	97,00	0,32
	7x7	94,17	0,08
Diamante	3x3	98,33	1,57
	5x5	97,50	0,81
	7x7	97,00	0,28
Cruz	3x3	98,00	1,09
	5x5	96,83	0,27
	7x7	94,00	0,09

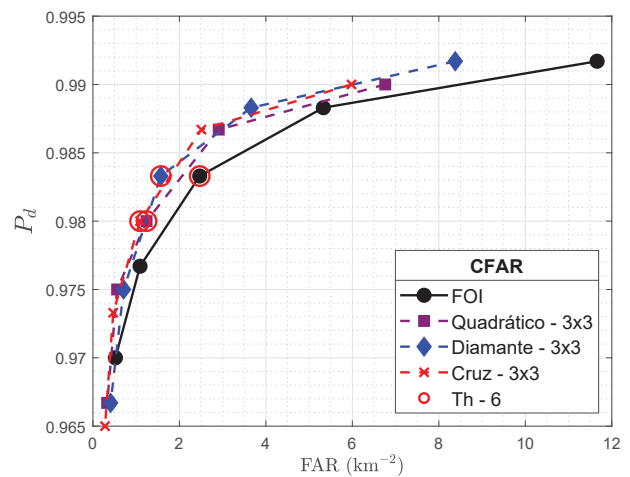
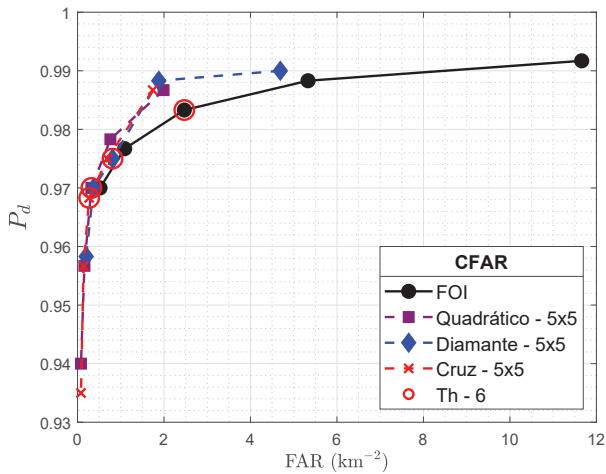
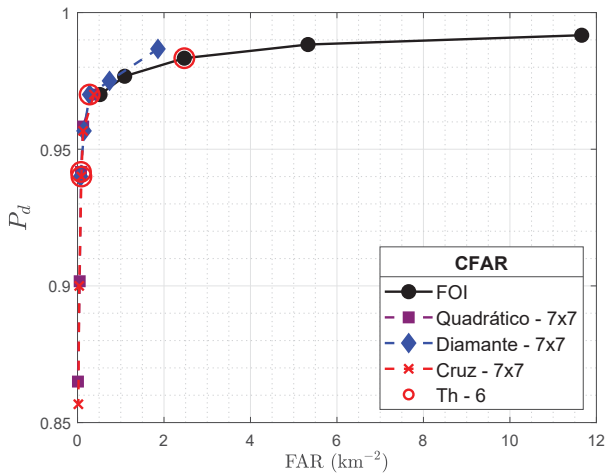


Fig. 10. Curva ROC para J.I. 3x3 pixels.

Fig. 11. Curva ROC para J.I. 5×5 pixels.Fig. 12. Curva ROC para J.I. 7×7 pixels.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou um estudo sobre a influência de diferentes janelas internas aplicadas no filtro CFAR modificado, este que é comumente utilizado em algoritmos de detecção de mudanças para imagens SAR. Constatou-se que o algoritmo de detecção de mudanças com o CFAR modificado apresentou uma melhora no desempenho nas métricas P_d e FAR comparado ao algoritmo de detecção de mudanças em [13]. Como estudos futuros, vislumbra-se a proposição de algoritmos híbridos, unindo filtro CFAR modificado juntamente com algoritmos que possam garantir uma elevada probabilidade de detecção, maximizando os ganhos de desempenho $P_d \times FAR$.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio financeiro do Centro de Pesquisa e Inovação Sueco Brasileiro (CISB), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Gao, X. Wang, Y. Gao, J. Dong, and S. Wang, "Sea Ice Change Detection in Sar Images Based on Convolutional-Wavelet Neural Networks," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019.
- [2] H. McNairn and B. Brisco, "The Application of C-band Polarimetric SAR for agriculture: a review," *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3), 525-542, 2004.
- [3] T. G. Yitayew, W. Dierking, D. V. Divine, T. Eltoft, L. Ferro-Famil, A. Rösel and J. Negrel. "Validation of Sea-Ice Topographic Heights Derived From TanDEM-X Interferometric SAR Data With Results From Laser Profiler and Photogrammetry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56.11, 6504-6520, 2018.
- [4] I. Walterscheid, J. H. Ender, A. R. Brenner, and O. Loffeld, "Bistatic SAR processing and experiments," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(10), pp. 2710-2717, 2006.
- [5] H. Hellsten, L. M. Ulander, A. Gustavsson, and B. Larsson, "Development of VHF CARABAS II SAR," in *Radar Sensor Technology*, vol. 2747, pp. 48-61, International Society for Optics and Photonics, 1996.
- [6] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, n. 1, pp. 6-43, 2013.
- [7] C. Oliver and S. Quegan, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*, SciTech Publishing 2004.
- [8] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, *Principles of Modern Radar Volume I - Basic Principles*, SciTech Publishing, 2010.
- [9] H. Hellsten, L. M. Ulander, A. Gustavsson, and B. Larsson, "Development of VHF CARABAS II SAR," in *Radar Sensor Technology*, International Society for Optics and Photonics, vol. 2747, pp. 48-61, 1996.
- [10] R. Machado, M. I. Pettersson, V. T. Vu, P. Dammert, and H. Hellsten, "Empirical-statistical analysis of amplitude SAR images for change detection algorithms," in *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, (pp. 365-368), 2015.
- [11] H. Hellsten, P. O. Froelind, A. Gustafsson, T. Jonsson, B. Larsson, G. Stenstrom, B. T. Binder, M. I. Mirkin, and S. Ayasli, "Ultrawideband VHF SAR design and measurements," *Aerial Surveillance Sensing Including Obscured and Underground Object Detection*, International Society for Optics and Photonics, vol. 2217, pp. 16-26, 1994.
- [12] H. Hellsten, S. Sahlin, and P. Dammert, "Polarimetric subsurface SAR imaging outcome of theoretical development and CARABAS III tests," in: *International Radar Conference*, pp. 1-8, 2014.
- [13] M. Lundberg, L. M. H. Ulander, W. E. Pierson, and A. Gustavsson, "A challenge problem for detection of targets in foliage," in *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIII*, vol. 6237, pp. 62730K, 2006.
- [14] L. M. Ulander, *VHF-Band SAR for Detection of Concealed Ground Targets*, Swedish Defence Research Agency Linköping, 2005.
- [15] N. Lv, C. Chen, T. Qiu and A. K. Sangaiah, "Deep learning and superpixel feature extraction based on contractive autoencoder for change detection in SAR images," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 14, n. 12, p. 5530-5538, 2018.
- [16] K. El-Darymli, P. McGuire, D. Power and C. R. Moloney. "Target detection in synthetic aperture radar imagery: A state-of-the-art survey," *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1), 071598, 2013.
- [17] U.S.A. Force, *Sensor Data Management System*. https://www.sdms.afrl.af.mil/index.php?collection=vhf_change_detection. [Online; Acessado em: 15 de Abril de 2019].
- [18] L. M. Ulander, W. Pierson, and A. Gustavsson, "Change detection for low-frequency SAR ground surveillance," *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 152(6), pp. 413-420, 2005.
- [19] L. M. Ulander, P. O. Froelind, A. Gustavsson, H. Hellsten, T. Jonsson, B. Larsson, and G. Stenstrom, "Performance of the CARABAS-II VHF-Band synthetic aperture radar," in *2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, (vol.1, pp. 129-131), 2001.
- [20] W. L. Melvin and J. Scheer, *Principles of modern radar: radar applications*, SciTech Publishing, 2014.
- [21] L. P. Ramos, V. I. A. Medeiros, D. I. Alves, C. Müller, R. Machado e B. F. Uchoa-Filho, "Influência de Operações Morfológicas em Algoritmo de Detecção de Alvos para Imagens SAR VHF UWB," *XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBRT 2018*, Campina Grande - Brasil, pp. 747-751, 2018.
- [22] A. C. Fabrin, R. D. Molin, D. I. Alves, R. Machado, F. M. Bayer, and M. I. Pettersson. "A CFAR optimization for low frequency UWB SAR change detection algorithms," in *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, (pp. 1071-1074), 2017.