

Influência de Operações Morfológicas em Algoritmo de Detecção de Alvos para Imagens SAR VHF UWB

Lucas P. Ramos, Victor I. A. Medeiros, Dimas I. Alves, Crístian Müller, Renato Machado e Bartolomeu F. Uchôa-Filho

Resumo—Este artigo apresenta um estudo sobre a influência de operações morfológicas em imagens de radar de abertura sintética (SAR) em banda VHF. Para avaliar os diferentes elementos estruturantes considerados nas operações morfológicas, utiliza-se o algoritmo de detecção de alvos proposto pela *Swedish Defence Research Agency* (FOI) e os dados obtidos pelo sistema SAR CARABAS II. As métricas de desempenho consideradas no estudo foram a probabilidade de detecção de alvos e a taxa de falso alarme. Como resultado, constata-se que a geometria do elemento estruturante considerado nas operações morfológicas influencia significativamente no desempenho do algoritmo de detecção de alvos.

Palavras-Chave—Operações Morfológicas, CARABAS II, SAR, CDA.

Abstract—This paper presents a study on the influence of morphological operations on synthetic aperture radar (SAR) images in VHF band. To evaluate the structuring elements considered in morphological operations, the target detection algorithm proposed by the Swedish Defense Research Agency (FOI) and the data obtained by the SAR system CARABAS II are used. The performance metrics considered in the study were the probability of target detection and the false alarm rate. As a result, it is revealed that the structural element considered in the morphological operations has a significant effect on the performance of the target detection algorithm.

Keywords—Morphological Operations, CARABAS II, SAR, CDA.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de radares de abertura sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*) foram propostos por Carl A. Wiley [1] em 1965, conceito que permitiu grandes avanços na tecnologia de radares [2]. Os sistemas SAR baseiam-se na movimentação relativa entre a antena do dispositivo e a área iluminada (irradiada), a fim de cobrir uma área equivalente a de um sistema com uma abertura efetiva de antena muito maior, permitindo a obtenção de imagens com maior resolução espacial, mesmo utilizando-se antenas com dimensões menores [3].

Lucas P. Ramos, Victor I. A. Medeiros e Crístian Müller, Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, Brasil, E-mails: lucasp@alunos.unipampa.edu.br, victorisrael@gmail.com, cristian.muller@unipampa.edu.br. Dimas I. Alves, Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, Brasil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil e Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Suécia, E-mail: dimasalves@unipampa.edu.br. Renato Machado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, Brasil, E-mail: rmachado@ita.br. Bartolomeu F. Uchôa Filho, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, E-mail: uchoa@eel.ufsc.br.

Devido a essas características, estes sistemas passaram a ter diversos fins, como por exemplo em aplicações relacionadas ao monitoramento de desastres naturais, atividades ilegais de desmatamento e de tráfico de drogas e de armas que ocorrem em regiões com camuflagem natural, como é o caso das fronteiras terrestres da Amazônia Brasileira [4]. Sistemas utilizados nesse contexto são denominados radares de penetração em folhagens (FOPEN), os quais utilizam sinais nas bandas P e *Very-High Frequency* (VHF) permitindo que o sinal tenha uma boa capacidade de penetração, o que torna o sistema bastante atrativo tanto para aplicações civis, e.g., detecção de remoção seletiva de árvores, quanto para aplicações de interesse militar, e.g., detecção de veículos camuflados e de instalações ilegais [5], [6]. É importante salientar que para ambas as situações é de interesse que os alvos supramencionados possam ser detectados com probabilidade de detecção (P_d - *probability of target detection*) elevada e baixa taxa de falsos alarmes (FAR - *false alarm rate*) [7].

Neste cenário estão inseridos a família de radares suecos *Coherent All Radio BAnd Sensing* (CARABAS), os quais vêm sendo desenvolvidos desde o início da década de noventa pela SAAB em parceria com a *Swedish Defence Research Agency* (FOI) [8], [9]. Os dados gerados pelos sistemas CARABAS permitem a geração de diversos produtos, desde mapas topográficos de alta resolução, até algoritmos de detecção de alvos. Este artigo aborda um tipo específico de algoritmo de detecção de alvos, conhecido por algoritmo de detecção de mudanças (CDA, *change detection algorithm*) [10].

O CDA proposto pela FOI [11] é considerado neste artigo como *framework* de testes. De maneira geral, algoritmos CDA baseiam-se na natureza estática do ambiente monitorado, com o objetivo de suprimir pequenas variações e ressaltar mudanças de maior relevância nas imagens. O algoritmo CDA da FOI baseia-se no detector de razão de verossimilhança, conforme exemplificado em [12], [13] e utilizam operações morfológicas para reduzir a quantidade de falsos alarmes obtidos. É importante salientar que não foram encontrados estudos referentes ao impacto causado no desempenho dos algoritmos CDA pelo uso de diferentes elementos estruturantes nas operações morfológicas.

Assim, este artigo apresenta um estudo referente a influência do uso de diferentes elementos estruturantes nas operações morfológicas usualmente consideradas em algoritmos de detecção de mudanças para imagens SAR VHF UWB. Para

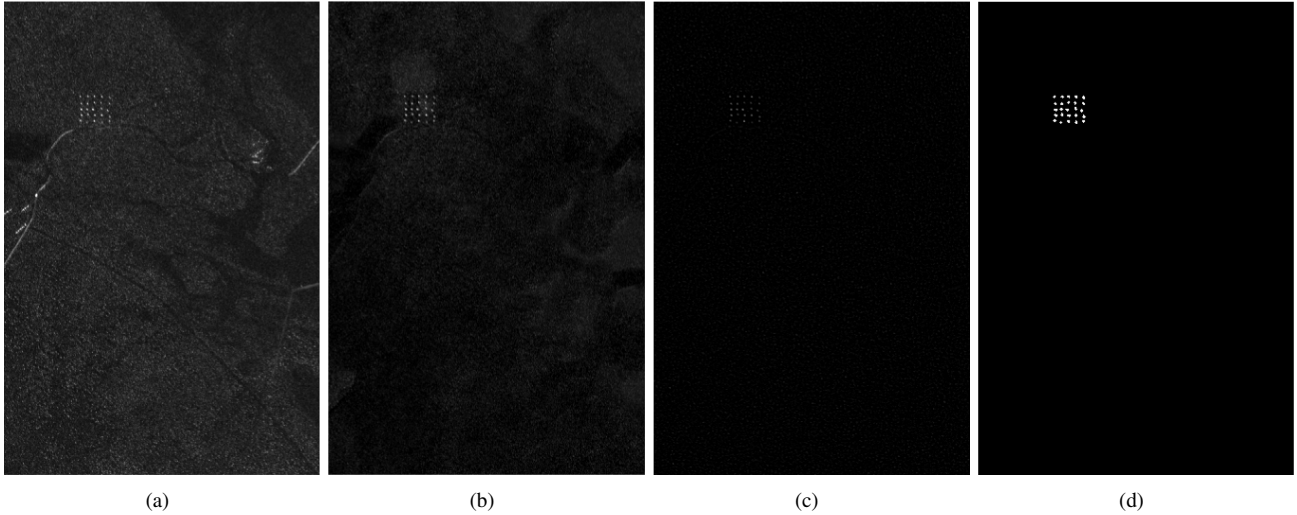


Fig. 1. Apresentação das etapas do algoritmo de detecção de alvos: (a) imagem de referência; (b) imagem de saída do processamento CDA; (c) imagem após passar pelo filtro CFAR; (d) imagem final que apresenta os alvos detectados.

o estudo proposto, consideram-se diferentes geometrias e tamanhos de elementos estruturantes (E.E.) utilizados nas operações, bem como a adequação do *threshold* considerado no detector de verossimilhança. Observou-se que o valor ótimo de *threshold* pode ser alterado com a mudança na geometria do elemento estruturante utilizado nas operações morfológicas. Como consequência, o desempenho do algoritmo CDA pode ser melhorado, desde que a combinação do elemento estruturante utilizado nas operações morfológicas estejam bem casadas com a configuração do detector.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção II introduz o conjunto de dados usados para o estudo proposto. A Seção III apresenta o algoritmo de detecção de mudanças avaliado. São apresentados na Seção IV os diferentes elementos estruturantes que foram utilizados na avaliação proposta. Os resultados de simulação são apresentados e discutidos na Seção V. Algumas considerações finais são apresentadas na Seção VI, concluindo o trabalho.

II. DESCRIÇÃO DOS DADOS

Com o objetivo de fomentar o desenvolvimento de estudos sobre novos algoritmos CDA, foi disponibilizado para a comunidade científica um conjunto de 24 imagens, com dimensão de 2000×3000 pixels, obtidas com o sistema CARABAS II [11], [14]. Esse subconjunto faz parte de um conjunto de 150 medições obtidas durante uma campanha de voo em 2002, em uma região militar chamada RFN Vidsel localizada no norte da Suécia. A região de testes de interesse compreende uma área retangular de $2 \text{ km} \times 3 \text{ km}$, sendo caracterizada pela presença de áreas florestais.

Para as campanhas de coleta de dados, foram considerados 25 alvos compostos por 3 tipos diferentes de veículos TGB11, TGB30 e TGB40 [11]:

- TGB11 - 10 Unidades - $4,4 \times 1,9 \times 2,2\text{m}$;
- TGB30 - 8 Unidades - $6,8 \times 2,5 \times 3\text{m}$;
- TGB40 - 7 Unidades - $7,8 \times 2,5 \times 3\text{m}$.

As 24 imagens consideradas foram obtidas a partir de quatro missões, com seis passagens da plataforma móvel

para cada missão. Para a identificação das imagens, adotou-se a mesma nomenclatura considerada em [11]. Maiores informações sobre o banco de dados considerado neste artigo podem ser encontradas em [11].

Cabe salientar que as imagens utilizadas já foram previamente processadas [15], [16] e geocodificadas [17]. Deste modo, as etapas de formação e geocodificação da imagem não serão objetos de estudo neste artigo.

III. ALGORITMO PROPOSTO PELA FOI

O algoritmo de detecção de alvos utilizado como *framework* neste trabalho consiste em uma etapa de detecção de mudanças entre a imagem referência e a imagem teste, na aplicação do filtro espacial denominado CFAR (*constant false alarm rate*) e em uma etapa de detecção. A Fig. 1 apresenta uma imagem teste e as três etapas de processamento supramencionadas. Cabe ressaltar que a entrada do algoritmo CDA consiste em duas imagens, a imagem referência e a imagem teste. De modo a permitir a comparação de resultados, utilizam-se os mesmos dados de entrada e as configurações de simulação apresentadas em [11].

A. Algoritmo de Detecção de Mudanças

O método utilizado baseia-se em um teste de hipótese em que consideram-se duas imagens como dados de entrada sendo uma de interesse, na qual deseja-se detectar os alvos e uma segunda imagem de referência, a qual é utilizada para suprimir o *clutter* da imagem de interesse.

O CDA proposto pela FOI utiliza o teste de razão de verossimilhança. A contribuição de *clutter* e de ruído térmico na formação da imagem foram modelados como processos Gaussianos complexos circularmente simétricos de média zero [10]. Baseado na análise e nas simplificações apresentadas em [9] e [11], a razão de verossimilhança é dada por :

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

em que $[x, y]$ refere-se às coordenadas das imagens, s é o vetor que indica a presença de alvo em uma das duas imagens, podendo assumir os valores $s = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ou $s = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, T denota a operação de transposição matricial, 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 toda a imagem tenha sido toda percorrida e $z = \begin{bmatrix} z_i \\ z_r \end{bmatrix}$, em que z_i e z_r representam as imagens de interesse e de referência, respectivamente.

Para reduzir a influência do ruído em z , as imagens de interesse e de referência foram submetidas a um filtro de média de dimensões 5×5 , conforme descrito em [11] antes de serem utilizadas no teste apresentado em (1).

B. Filtro CFAR

O filtro CFAR é aplicado na imagem que é obtida após a etapa do CDA. O filtro CFAR utilizado pode ser caracterizado por uma janela externa de tamanho 31×31 pixels que é utilizada para formar o conjunto de amostras de pixel para a estatística de *background*, e uma janela interna com valores nulos, de tamanho 17×17 pixels que é utilizada como janela de guarda ao redor do pixel de interesse (pixel no centro do filtro), conforme é apresentado na Fig. 2.

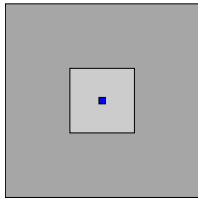


Fig. 2. Diagrama simplificado para o filtro CFAR utilizado.

Para o processo de filtragem utilizado, centraliza-se o filtro no pixel de teste e calcula-se a média (μ) e o desvio padrão (σ) da amostra de pixels. O novo valor de amplitude para o pixel centralizado é dado por:

$$\mathbf{I}_N[x, y] = \frac{\mathbf{I}_d[x, y] - \mu}{\sigma}, \quad (2)$$

em que $\mathbf{I}_d[x, y]$ é a amplitude do pixel em teste e $\mathbf{I}_N[x, y]$ representa sua nova amplitude após o processo de filtragem.

C. Análise de Detecção

A próxima etapa na detecção consiste na avaliação dos pixels da imagem através de um *threshold* (Th) pré-definido. Se um pixel for de amplitude maior que Th , esse pixel passa a assumir o valor um, caso contrário, o pixel passa a assumir valor zero, formando assim uma imagem binária. No último estágio, são realizadas duas operações morfológicas na imagem binária, sendo elas uma operação de erosão seguida de uma operação de dilatação. O intuito dessas operações é excluir a ocorrência de detecções com dimensões inferiores aos objetos de interesse de modo a diminuir a ocorrência de falsos alarmes. É importante salientar que utilizou-se apenas uma dilatação neste processo de forma a facilitar a análise

de diferentes elementos estruturantes e garantir que a forma dos objetos detectados seja mantida. De fato, a utilização de um maior número de operações morfológicas pode resultar em melhor desempenho para o sistema, porém essa avaliação não foi considerada neste artigo.

IV. OPERAÇÕES MORFOLÓGICAS

A morfologia matemática baseada na teoria de conjuntos tem como princípio básico extrair informações relativas a imagem como estrutura e forma através de um outro conjunto definido, chamado de elemento estruturante [18]. Neste contexto, as operações de dilatação e erosão são de fundamental importância para os processamentos morfológicos sendo responsáveis pela remoção de objetos isolados na imagem, bem como, por ressaltar a presença de objetos de interesse [19].

A. Elementos Estruturantes

Elementos estruturantes são definidos como conjuntos conhecidos em forma e tamanho, que interage diretamente com a imagem [20]. Este conjunto, no universo digital, é definido por uma matriz com zeros e uns que pode apresentar diferentes formas (geometrias) e tamanhos (dimensões da matriz). Neste trabalho são considerados alguns elementos de formatos clássicos, apresentados a seguir:

- **Diamante:** Elemento estruturante no formato de diamante. O elemento de ordem $N_d = 3$ é dado pela matriz H_1 :

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Para o E.E. diamante a ordem N_d diz respeito à distância entre o ponto central da matriz e os pontos extremos da matriz nos sentidos horizontal e vertical.

- **Quadrático:** Elemento estruturante no formato de quadrado. O elemento de ordem $N_q = 3$ é dado pela matriz H_2 :

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Para o E.E. quadrado a ordem N_q diz respeito à ordem da matriz.

- **Circular:** Elemento estruturante com um formato circular. O elemento de ordem $N_c = 3$ é dado pela matriz H_3 :

$$H_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Para o E.E. circular a ordem N_c diz respeito a distância entre o ponto central da matriz e os pontos extremos da matriz nos sentidos horizontal e vertical.

- **Cruz:** Elemento estruturante no formato de cruz. O elemento de ordem $N_x = 3$ é dado pela matriz H_4 :

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Para o E.E. cruz a ordem N_x diz respeito a distância entre o ponto central da matriz e os pontos extremos da matriz nos sentidos diagonal.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para fins de avaliação dos elementos estruturantes considerados nas operações morfológicas, consideram-se para referências de desempenho os resultados apresentados em [11]. As simulações foram realizadas considerando elementos estruturantes com dimensões 3×3 , 5×5 e 7×7 . As Tabelas I-IV apresentam o desempenho do algoritmo em termos de taxa de falsos alarmes (FAR), o qual é definido pela razão entre os falsos positivos e área dada em km^2 , e probabilidade de detecção de alvos (P_d), que é definida pela razão entre o número de alvos detectados e o número total de alvos. Para este estudo foram considerados os mesmos 24 casos avaliados em [11], totalizando 600 alvos de interesse e uma área de 144 km^2 , levando em conta os elementos estruturantes quadrático, diamante, circular e em cruz, respectivamente. A fim de destacar o desempenho e facilitar a comparação de resultados das Tabelas I-IV, alguns de seus elementos foram destacados em negrito. O critério de comparação adotado foram os valores obtidos para cada um dos elementos estruturantes com menor taxa de falsos alarmes para uma probabilidade de detecção maior ou igual a 97%.

TABELA I
PARÂMETROS FAR e P_d OBTIDOS PARA O E.E. QUADRÁTICO COM VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE LIMIAR.

Th	3×3		5×5		7×7	
	FAR	P_d	FAR	P_d	FAR	P_d
5.00	12.0347	0.9950	0.0694	0.9217	0.0000	0.2750
5.25	8.1458	0.9917	0.0556	0.9033	0.0000	0.2350
5.50	5.5069	0.9883	0.0278	0.8800	0.0000	0.2000
5.75	3.8611	0.9833	0.0208	0.8433	0.0000	0.1717
6.00	2.5694	0.9833	0.0069	0.8067	0.0000	0.1533
6.25	1.7014	0.9800	0.0069	0.7817	0.0000	0.1183
6.50	1.1319	0.9767	0.0069	0.7567	0.0000	0.0883
6.75	0.8264	0.9750	0.0069	0.7183	0.0000	0.0667
7.00	0.5486	0.9667	0.0000	0.6867	0.0000	0.0500

TABELA II
PARÂMETROS FAR e P_d OBTIDOS PARA O E.E. DIAMANTE COM VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE LIMIAR.

Th	3×3		5×5		7×7	
	FAR	P_d	FAR	P_d	FAR	P_d
5.00	28.0000	0.9967	2.3194	0.9900	0.0278	0.9150
5.25	19.5278	0.9950	1.4444	0.9850	0.0139	0.8933
5.50	13.9236	0.9950	0.9444	0.9800	0.0139	0.8633
5.75	9.7639	0.9933	0.5625	0.9767	0.0069	0.8267
6.00	6.9514	0.9917	0.3889	0.9750	0.0069	0.7983
6.25	4.8958	0.9883	0.2361	0.9633	0.0069	0.7533
6.50	3.4375	0.9867	0.1736	0.9583	0.0069	0.7083
6.75	2.4861	0.9833	0.1181	0.9467	0.0000	0.6733
7.00	1.8403	0.9800	0.0764	0.9333	0.0000	0.6350

TABELA III
PARÂMETROS FAR e P_d OBTIDOS PARA O E.E. CIRCULAR COM VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE LIMIAR.

Th	3×3		5×5		7×7	
	FAR	P_d	FAR	P_d	FAR	P_d
5.00	28.0000	0.9967	2.3194	0.9883	0.0972	0.9150
5.25	19.5280	0.9950	1.4444	0.9850	0.0486	0.9050
5.50	13.9240	0.9950	0.9444	0.9800	0.0347	0.8783
5.75	9.7640	0.9933	0.5625	0.9767	0.0278	0.8417
6.00	6.9510	0.9917	0.3889	0.9750	0.0069	0.8067
6.25	4.8960	0.9883	0.2361	0.9633	0.0069	0.7817
6.50	3.4380	0.9867	0.1736	0.9583	0.0069	0.7567
6.75	2.4860	0.9833	0.1181	0.9467	0.0069	0.7183
7.00	1.8400	0.9800	0.0764	0.9333	0.0000	0.6867

TABELA IV
PARÂMETROS FAR e P_d OBTIDOS PARA O E.E. CRUZ COM VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE LIMIAR.

Th	3×3		5×5		7×7	
	FAR	P_d	FAR	P_d	FAR	P_d
5.00	11.7500	0.9917	0.1181	0.9167	0.0000	0.2800
5.25	7.9931	0.9900	0.0486	0.9083	0.0000	0.2433
5.50	5.3611	0.9883	0.0278	0.8850	0.0000	0.2100
5.75	3.7569	0.9833	0.0278	0.8483	0.0000	0.1767
6.00	2.4792	0.9833	0.0000	0.8150	0.0000	0.1567
6.25	1.6458	0.9800	0.0000	0.7867	0.0000	0.1217
6.50	1.0903	0.9767	0.0000	0.7667	0.0000	0.0883
6.75	0.7847	0.9750	0.0000	0.7267	0.0000	0.6783
7.00	0.5278	0.9700	0.0000	0.6900	0.0000	0.0517

Pode-se observar através dos resultados apresentados nas Tabelas I-IV que o melhor desempenho é obtido quando o elemento estruturante diamante é utilizado, visto que em [11] obteve-se uma P_d de 0.97 e FAR de $0.67/km^2$. Este resultado está relacionado com a forma em que os alvos foram dispostos e suas dimensões, conforme apresentado em [11]. Nota-se que os alvos foram posicionados com uma inclinação (no plano horizontal) em relação ao ângulo de passagem do voo. Além disso, nota-se que os alvos, em geral, possuem formato retangular e dimensões que são mais próximas do tamanho da janela de 5×5 do que em relação aos outros tamanhos avaliados. Isso apenas corrobora a hipótese de que a escolha do formato e do tamanho dos elementos estruturantes, quando casados com o posicionamento e geometria dos alvos de interesse, podem afetar positivamente o desempenho do CDA.

A fim de analisar os possíveis pontos de operação para o melhor elemento estruturante encontrado é apresentada a

curva ROC (*Receiver Operating Characteristic Curve*), que é basicamente a curva $P_d \times \text{FAR}$, variando-se Th . Na Fig. 3, o ponto P destaca a relação de desempenho $P_d \times \text{FAR}$ para o E. E. diamante e $\text{Th} = 6$, o mesmo valor de *threshold* utilizado em [11]. Cabe ressaltar que apesar da utilização de uma operação morfológica a menos, os resultados foram melhores tanto em termos de P_d , quanto em termos de FAR.

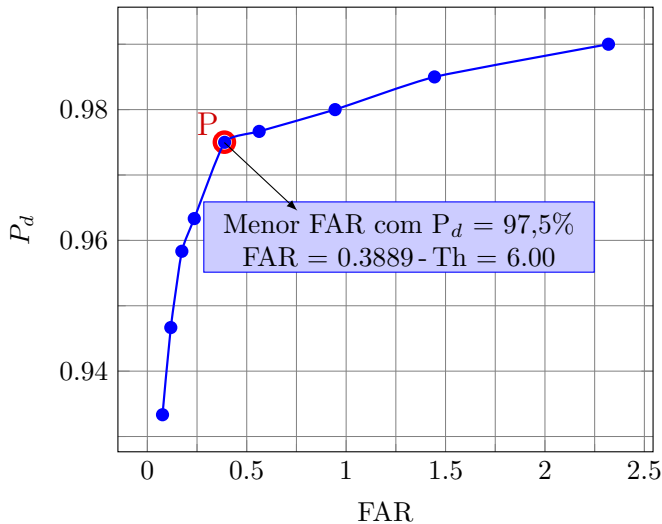


Fig. 3. Curva ROC – E.E. Diamante de dimensão 5x5.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou um estudo sobre a influência de diferentes elementos estruturantes nas operações morfológicas em algoritmos de detecção de mudanças aplicados em imagens SAR VHF UWB. Para a avaliação, considerou-se o algoritmo de detecção de alvos proposto pela FOI apresentado em [11]. O estudo avaliou a utilização de elementos estruturantes com diferentes geometrias e tamanhos, bem como diferentes limiares de detecção. Os resultados mostraram que a geometria e o tamanho escolhido dos elementos estruturantes influenciam significativamente, no desempenho do algoritmo de detecção. Os resultados também corroboram com a ideia de que o elemento estruturante que melhora o desempenho do algoritmo de detecção de alvos pode estar associado com a disposição em que o alvo se encontra em relação a direção de voo do sistema SAR, o que interfere diretamente nas características de reflexão do alvo. Estudos futuros poderão determinar, para outras imagens SAR, quais elementos estruturantes resultam em melhores resultados, dados diferentes tamanhos e formatos de alvos nas imagens de interesse. Por fim, estuda-se a possibilidade de trabalhar com algoritmos adaptativos, permitindo a seleção de elementos estruturantes para detecção de diferentes alvos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio financeiro do Centro de Pesquisa e Inovação Sueco-Brasileiro (CISB) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] C. A. Wiley, "Pulsed doppler radar methods and apparatus," jul 1965, US Patent 3,196,436.
- [2] 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, no. 1, pp. 6–43, 2013.
- [3] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, "Principles of modern radar volume I - basic principles," 2010.
- [4] M. Brasil, "Livro branco de defesa nacional," 2012.
- [5] H. Hellsten, L. M. H. Ulander, A. Gustavsson, and B. Larsson, "Development of VHF CARABAS II SAR," in *Radar Sensor Technology*, vol. 2747, 1996, pp. 48–61.
- [6] W. L. Melvin and J. A. Scheer, *Principles of modern radar - III radar applications*. SciTech Publishing, 2014.
- [7] A. Gustavsson, L. M. H. Ulander, B. Flood, P.-O. Frolind, H. Hellsten, T. Jonsson, B. Larsson, and G. Stenstrom, "Development and operation of an airborne VHF SAR system-lessons learned," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 1, 1998, pp. 458–462.
- [8] 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," in *Aerial Surveillance Sensing Including Obscured and Underground Object Detection*, vol. 2217, 1994, pp. 16–26.
- [9] L. M. H. Ulander, P.-O. Frolind, A. Gustavsson, H. Hellsten, T. Jonsson, B. Larsson, and G. Stenstrom, "Performance of the CARABAS-II VHF-band synthetic aperture radar," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 1, 2001, pp. 129–131.
- [10] L. M. H. Ulander, M. Lundberg, W. Pierson, and A. Gustavsson, "Change detection for low-frequency SAR ground surveillance," *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, no. 6, pp. 413–420, 2005.
- [11] 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, 2006, p. 62370K.
- [12] L. M. H. Ulander, B. Flood, P.-O. Frörlind, A. Gustavsson, T. Jonsson, B. Larsson, M. Lundberg, D. Murdin, and G. Stenström, "Change detection of vehicle-sized targets in forest concealment using VHF and UHF-band SAR," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 26, no. 7, pp. 30–36, 2011.
- [13] G. Moser and S. B. Serpico, "Generalized minimum-error thresholding for unsupervised change detection from SAR amplitude imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 10, pp. 2972–2982, 2006.
- [14] Air. sensor data management system. [Online]. Available: <https://www.sdms.afrl.af.mil/>
- [15] L. M. H. Ulander, H. Hellsten, and G. Stenstrom, "Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 760–776, 2003.
- [16] L. M. H. Ulander, P. Frörlind, and T. Martin, "Processing and calibration of ultra-wideband SAR data from CARABAS-II," in *SAR Workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites*, vol. 450, 2000, p. 273.
- [17] F. Walter, J. Fransson, and P.-O. Frolind, "Fully automatic geo-coding of CARABAS-II VHF SAR images," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 1, 1999, pp. 569–573.
- [18] O. Marques Filho and H. V. Neto, *Processamento digital de imagens*. Brasport, 1999.
- [19] J. C. Russ, *The image processing handbook*. CRC press, 2016.
- [20] J. Facon, "A morfologia matemática e suas aplicações em processamento de imagens," in *VII Workshop de Visão Computacional-WVC*, vol. 13, 2011.