

A importância de dados polarimétricos para detecção de alvos artificiais no mar utilizando imagens SAR

Leonan Entringer Falqueto¹, Rafael Lemos Paes² e Angelo Passaro²

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – A detecção automática em imagens é essencial ao lidar com dados obtidos pelo SAR para vigilância de extensas áreas. Neste trabalho, procedeu-se a um estudo de caso em uma imagem com dois alvos de diferentes intensidades de retorno. Inicialmente, foi analisada cada banda *Single Pol*, apenas utilizando a informação de intensidade. Após, realizou-se uma decomposição polarimétrica, aproveitando toda a informação *full pol*, o que aumentou a possibilidade de detecção por ampliar a separação entre os alvos e o *background*, reafirmando a importância dos dados polarimétricos na detecção de alvos artificiais no mar.

Palavras-Chave – Sensoriamento Remoto SAR, polarimetria SAR, detecção de alvos.

I. INTRODUÇÃO

A vigilância de extensas áreas demanda sistemas que possibilitem ampla cobertura, rapidez na varredura e eficácia para coletar informação em meios ruidosos. Quando conduzida no cenário marítimo, meios de superfície e aéreos garantem flexibilidade, porém com pouca eficiência, necessitando então complemento por meios espaciais de sensoriamento remoto. Estes garantem uma cobertura rotineira de grandes áreas, como a Amazônia Azul. Com o devido processamento da massa de dados coletada, pode-se produzir estatísticas confiáveis das regiões de controle, informações preliminares para condução de operações específicas por meios aéreos e de superfície, além de um sistema de alarme para verificar, por exemplo, fontes de poluição marítima ou apoiar missões de busca e resgate [1], [2].

Especificamente, o sensoriamento remoto por micro-ondas apresenta características importantes para vigilância marítima, principalmente em áreas tão vastas, situadas em regiões tropicais, onde é comum a cobertura parcial ou total de nuvens. O *Synthetic Aperture Radar* (SAR) é pouco afetado pela meteorologia e possui sua disponibilidade aumentada em relação aos sensores óticos por operar também à noite [3].

Um dos problemas que deve ser considerado no processo de vigilância por imagens de sensores remotos orbitais é a necessidade de automatização. Por exemplo, a média de dados diária do Sentinel-1 (Satélites SAR do Projeto Copernicus da ESA – *European Space Agency*), obtida no mês de novembro de 2017, foi de 3,45 TiB. Além da grande quantidade de dados, o ser humano é limitado por sua acuidade visual para distinguir detalhes mínimos quando se fala em resoluções radiométricas superiores a 8 bits [4].

L.Falqueto, falquetolef@fab.mil.br; R.L.Paes, rafaelpaes@ieav.cta.br; A. Passaro, angelo@ieav.cta.br.

A polarimetria SAR é a ciência derivada da elipsometria que estuda a aquisição, o processamento e a análise do estado de polarização de um campo eletromagnético na faixa de comprimento das micro-ondas [5]. Por meio da polarimetria, é possível separar mecanismos de espalhamento que são sensíveis à forma, à orientação e às propriedades dielétricas dos espalhadores de uma cena imageada [6].

Sob a óptica da polarimetria, os sistemas SAR podem ser classificados de acordo com a polarização utilizada na emissão e recepção da onda eletromagnética. Os primeiros satélites SAR eram *single pol*, pois transmitiam e recebiam em uma única polarização: horizontal [HH] ou vertical [VV]. Atualmente, os satélites também possuem modos de operação *dual pol* coerente, que emitem em uma polarização do eixo ortogonal e recebem em ambas as direções ortogonais ([HH e HV] ou [VV e VH]); *dual pol* incoerente, transmitindo e recebendo nos canais copolares [HH e VV]; e *full pol* ou *quad pol*, que emitem e recebem em ambas as polarizações ortogonais, gravando os dados na matriz de Sinclair (matriz de espalhamento):

$$S = \begin{bmatrix} HH & HV \\ VH & HH \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ainda em emprego experimental e já com muitos estudos sobre o tema, há sistemas em órbita com a arquitetura *compact pol*, que pode ser do tipo híbrida/CTRL (transmissão circular e recepção nos canais horizontal e vertical) ou linear $\pi/4$ (transmissão linear na direção de 45 graus e recepção horizontal e vertical), tendo como exemplos de satélites o Alos PALSAR 2 (CTRL e linear $\pi/4$) e o RISAT (CTRL). Os sistemas *full pol* apresentam informação polarimétrica completa, com o *trade-off* de uma área menor de cobertura. Com certas restrições, os radares *dual pol* e *compact pol* também permitem o emprego de ferramentas polarimétricas, sendo que o último modo é muito promissor, quase que comparado a um sistema *full pol* quanto à informação final obtida [7]–[11].

A literatura sobre detecção de objetos metálicos no oceano utilizando o SAR é muito rica, sendo aqui elencados alguns exemplos. Em [12]–[14] são apresentadas técnicas *Constant False Alarm Rate* para detecção automática de objetos artificiais no mar para imagens *single pol*. Em [15], [16] são explorados os parâmetros polarimétricos *Degree of Polarization* (DoP), *Copolarization Ratio* (coRat), *Copolarization Product* (coProd), *Degree of Depolarization* (DoD) e o filtro *Polarimetric Notch Filter* (PNF) em imagens *dual pol*. Já em [17], são apresentados os resultados de

diferenças na reflexão simétrica, utilizadas em imagens *full pol*. Nessa arquitetura, também é possível aplicar decomposições polarimétricas apresentadas em [5], [6], [18]–[21]. Por fim, [7], [8], [11] são estudos sobre o emprego de imagens *compact pol* para detecção de alvos metálicos no mar.

Neste trabalho, pretende-se apresentar, por meio de um estudo de caso, como a polarimetria permite a extração de atributos das imagens que podem aumentar a relação entre informação/ruído e incrementar a detecção de objetos artificiais no mar, além de proporcionar ferramentas de análise automática. Foi analisada uma imagem *full pol* do ALOS PALSAR e estudado esse dado banda a banda, como se *single pol* fosse, para verificar dois alvos conhecidos. E na sequência, utilizou-se a Decomposição de Freeman-Durden [19] para extrair os mecanismos de espalhamento presentes na cena, demonstrando como a polarimetria pode facilitar a detecção dos alvos na imagem.

Na seção II são apresentadas as informações sobre a imagem utilizada e a obtenção da verdade de campo. Na seção III, explana-se sucintamente sobre a fundamentação e descreve-se a metodologia empregada. Em sequência os resultados são discutidos na seção IV. Por fim, apresenta-se uma conclusão sobre o trabalho na seção V.

II. IMAGEM E VERDADE DE CAMPO

A. Imagem SAR:

Foi utilizada uma imagem SAR do satélite ALOS PALSAR que opera na banda L (1,27 GHz). A imagem ALPSRP173876680, modo PLR (*full pol*) com nível de processamento L-1.1 (*Single Look Complex* em geometria *slant range*), foi produzida em 30/04/2009, às 01:59UTC (horário noturno). A resolução espacial em *range* é de 9,36m e em *azimute* é de 3,82m.

Foi realizado um recorte compreendendo a região onde conhecia-se a verdade de campo: linhas 0 a 799 e colunas 7950 a 8449 (800 x 550 *pixels*). Com órbita ascendente à direita, o recorte apresenta ângulo de incidência no *near range* de 25,05° e no *far range* de 26,36°. A imagem foi obtida no *site* da ASF (*Alaska Satellite Facility*)[22].

B. Verdade de campo:

A Fig. 1 mostra os alvos presentes na cena. A posição 25.267°S/045.253°W em graus decimais e a foto da plataforma petrolífera Merluza foram obtidas na página *web* de divulgação das operações da Petrobras na Bacia de Santos. A foto à direita da Fig. 1 é apenas uma representação do tipo de navio que provavelmente seria o da cena, pois não há identificação por AIS ou reconhecimento aéreo da região.



Fig. 1. Alvos presentes na cena. À esquerda, imagem real da plataforma Merluza. À direita, foto representativa do segundo alvo. Fonte: adaptado de www.comunicabaciadesantos.com.br

Foi suposto que seria um navio de apoio pela experiência operacional dos autores com patrulhamento marítimo e vigilância por radar. É comum a presença desse tipo de

embarcação próximo às plataformas, além do retorno radar que também é muito característico[23].

III. FUNDAMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Para imagens *Single Look Complex*, mesmo a informação de amplitude e fase sendo registradas, a detecção de alvos é realizada por meio da amplitude/intensidade do sinal. Os métodos CFAR, nos quais são utilizadas janelas convolutivas para analisar a distribuição dos *pixels* e determinar um *threshold* automático podem sofrer com falsos alarmes ou não detectar alvos devido principalmente ao efeito *speckle*, característico de imagens radar [14].

A matriz de espalhamento descrita em (1) pode ser entendida como a soma de diversos mecanismos de espalhamento de objetos canônicos (2):

$$[S] = \sum_{i=1}^k c_i [S]_i \quad (2)$$

onde $[S]_i$ representa os mecanismos de espalhamento de objetos canônicos (*single bounce*, *double bounce*, *multiple bounce*) e c_i é o peso de cada mecanismo. O *surface/odd/single bounce* está relacionado com o espalhamento de uma esfera ou de um triedro; o *double/even bounce* com o espalhamento do diedro e o *volumetric/multiple bounce* com o espalhamento provocado por um diplano rotacionado em 45 graus [21].

O oceano apresenta um retroespalhamento intensificado pelo efeito de Bragg, gerado por ondas capilares e pequenas, e caracterizado normalmente por mecanismos *surface bounce*. Alvos artificiais, normalmente metálicos, apresentam retroespalhamento intenso e mecanismos de espalhamento complexo composto normalmente por mecanismos *double bounce* e *volumetric bounce*. Tanto a forma, quanto a orientação desses objetos em relação à geometria de aquisição da imagem pode influenciar o retroespalhamento [15].

Existem vários métodos para decompor os mecanismos de espalhamento da onda eletromagnética após interagir com um objeto, tais como a de Pauli e de Cloude-Pottier [18], [21]. Nesse trabalho, optou-se pela decomposição incoerente de Freeman-Durden, descrita em detalhes em [19], pois é um método que ilustra bem os três mecanismos canônicos, facilitando a interpretação, e atende ao objetivo do trabalho: ilustrar como a polarimetria permite a extração de atributos das imagens para detectar alvos artificiais no mar, utilizando também a informação de fase para aumentar a relação entre informação/ruído.

Utilizou-se o software SNAP (ESA) para processar as imagens. Calibrou-se radiometricamente a imagem conforme [24], [25]. Foi utilizado o filtro de média com janela 3x3 *pixels* para diminuir o efeito *speckle*, característico de imagens SAR, e procedeu-se à análise de cada imagem Intensidade: HH, HV, VH e VV.

Em seguida, realizou-se a Decomposição de Freeman-Durden (com janela de 5x5) sobre a imagem calibrada e criou-se uma banda com a soma das decomposições *double* e *volumetric bounce* (banda *Double+Vol*). Analisou-se os quatro produtos resultantes.

A análise estatística foi por meio da média (μ) e do desvio-padrão (σ) dos alvos (informação) em relação ao *background* oceânico, entendido como o ruído. A Fig. 2 mostra a posição dos alvos e as janelas utilizadas para calcular as médias e desvios-padrões do retroespalhamento de cada alvo (3x10 *pixels*) e do mar (100x100 *pixels*).

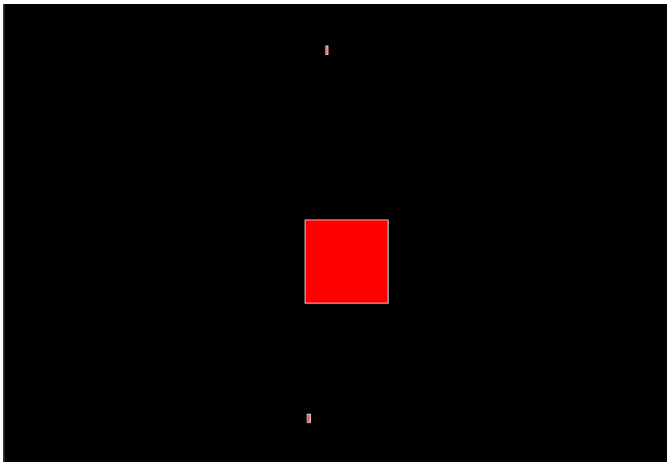


Fig. 2. Posicionamento das janelas para os cálculos de média e desvio padrão. Janela acima (3 x 10): navio de apoio. Janela central (100 x 100): oceano. Janela inferior (3 x 10): plataforma Merluza.

Por fim escolheu-se um limiar global, baseado no valor máximo obtido na amostra do *background* oceânico (janela central da Fig. 2), que corresponde a aproximadamente 3σ . Com esse limiar, foi criada uma máscara de detecção para a banda HV e para a banda *Double+Vol*.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 3 apresenta as imagens intensidade em decibel (dB) respectivamente das polarizações HH, HV, VH e VV.

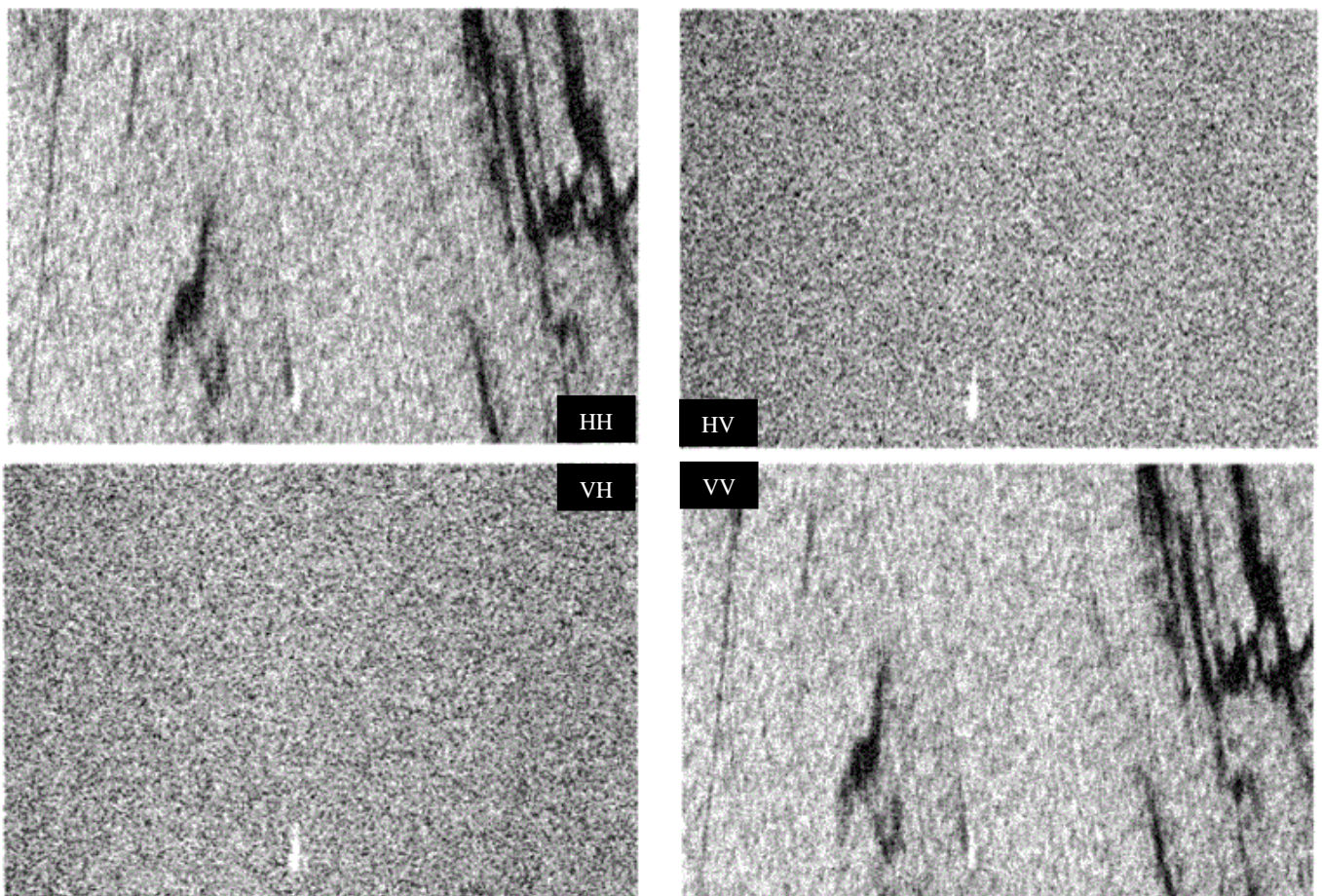


Fig.3. Imagens intensidade de cada canal *single pol* em dB, após utilização do filtro de média 3x3. Nota-se a dificuldade para distinguir o navio de apoio na posição superior da imagem, mesmo em canais *cross-polarizados*.

A Fig. 4 apresenta o resultado da Decomposição de Freeman-Durden com intensidade em dB para os espalhamentos *surface*, *double* e *volumetric bounce* e para a banda *Double+Vol*.

A Tabela 1 traz a média e o desvio-padrão, ambos em dB, de cada janela apresentada na Fig. 2 aplicada em todas as bandas SLC e naquelas produzidas pela Decomposição de Freeman para verificar o comportamento geral dos alvos. Vale ressaltar que a distribuição dos pixels em imagens SAR não apresenta uma distribuição Gaussiana.

TABELA I. MÉDIA (μ) E DESVIO-PADRÃO (σ) DOS ALVOS E DO MAR PARA CADA BANDA E PARA A SOMA DAS BANDAS *DOUBLE* E *VOLUMETRIC BOUNCE*

Banda	Mar (dB)	Navio de Apoio (dB)	Plataforma (dB)
HH - μ	-15,9791	-10,7592	-2,9353
HH - σ	2,6246	3,0947	3,1633
HV - μ	-28,5931	-20,6345	-10,9897
HV - σ	2,1807	3,7488	4,4238
VH - μ	-27,6133	-20,1512	-11,2428
VH - σ	2,1030	3,7488	4,1548
VV - μ	-13,3343	-12,5690	-4,7190
VV - σ	2,6212	2,9014	4,6706
<i>Superficial B.</i> - μ	-10,0957	-11,6451	-14,9897
<i>Superficial B.</i> - σ	1,6498	3,4649	7,7832
<i>Double B.</i> - μ	-22,917	-20,0800	-1,9580
<i>Double B.</i> - σ	0,0000	1,6460	1,5819
<i>Volumetric B.</i> - μ	-19,1456	-10,1470	-0,5882
<i>Volumetric B.</i> - σ	0,9692	1,0371	1,3515
<i>Double + Vol</i> - μ	-41,3373	-30,2269	-2,5461
<i>Double + Vol</i> - σ	0,9692	1,0585	2,6295

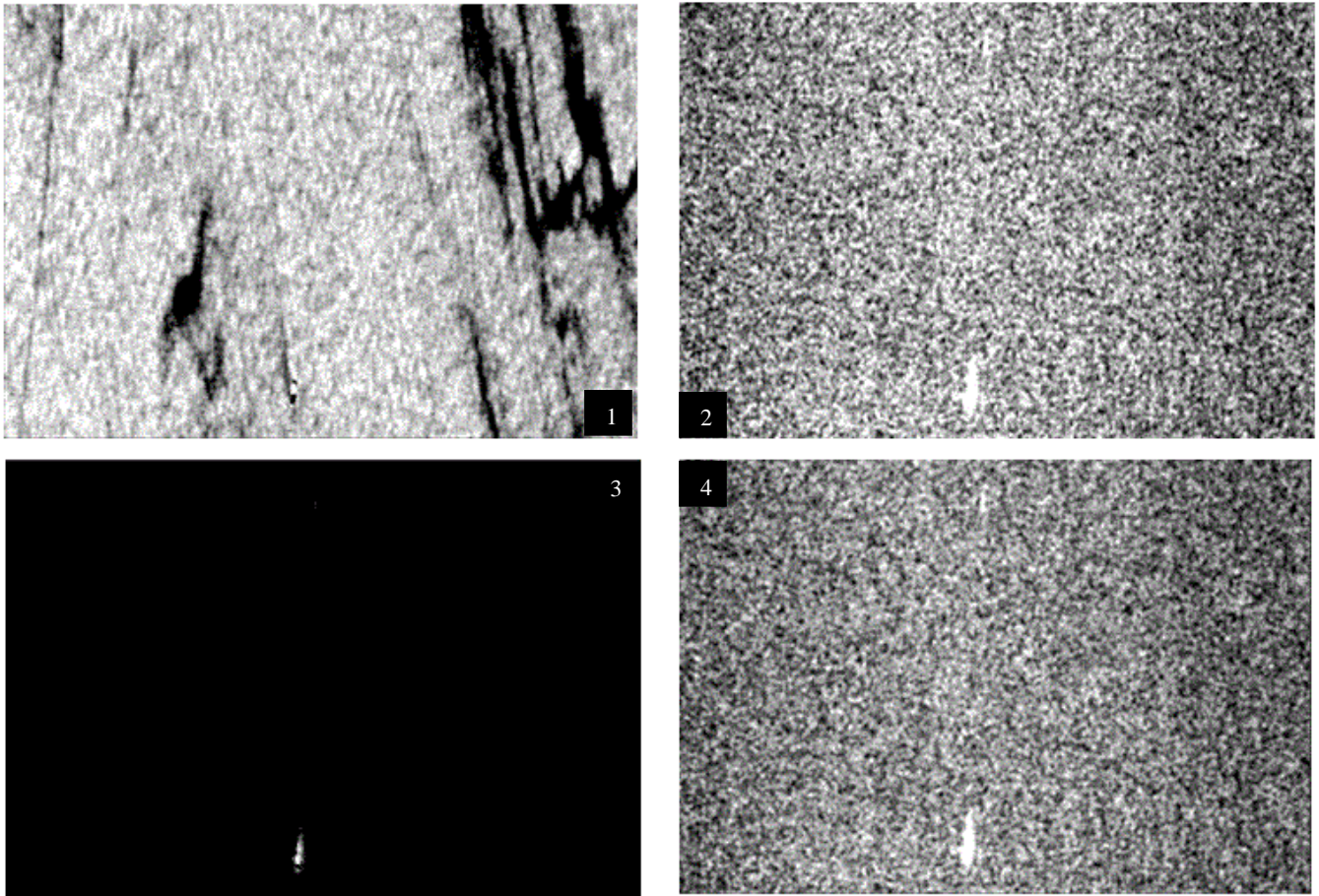


Fig. 4. Bandas *superficial bounce* (1), *double bounce* (2) e *volumetric bounce* (3) geradas pela decomposição polarimétrica de Freeman-Durden e a banda resultado da soma entre *double* e *volumetric bounce* (4).

Analisando apenas visualmente as imagens SLC, verifica-se como os canais *cross*-polarizados apresentam um contraste maior entre o oceano e a plataforma Merluza, porém o navio de apoio quase não é distinguido do plano de fundo.

Ao verificar a diferença entre médias dos alvos e o mar, percebe-se que o canal HV apresentou a maior diferença: 7,96 dB para o navio de apoio e 17,60 dB para a plataforma. A menor diferença ficou a imagem VV, com 0,77 dB para o navio de apoio e 8,62 dB para a plataforma Merluza. Isso é esperado, pois o efeito de Bragg é mais percebido na polarização vertical e em canais co-polarizados, afinal ele é ocasionado pela verticalidade das ondas que reforçam, por interferência positiva, o sinal radar retroespalhado. Portanto, objetos menores, com intensidade menor, são confundidos com o meio.

Comparando o desvio-padrão, nota-se que os alvos tendem a aumentá-lo, tornando o retroespalhamento mais aleatório que no mar. Entre as polarizações, não há diferença significativa. Poderia pensar-se em tamanho de amostras, porém os dois alvos possuem mesmo número de pixel. Portanto, esse aumento do desvio-padrão representa o aumento do efeito *speckle*. Como o *speckle* é um ruído multiplicativo, ele tende a aumentar a variação com o aumento da intensidade do retroespalhamento.

Para as imagens derivadas da decomposição polarimétrica, nota-se primeiramente que o mar apresenta mecanismos de espalhamento superficial e volumétrico. Pelas médias, verifica-se que o primeiro mecanismo tem destaque em relação ao segundo. Pode-se assumir como praticamente nula a presença de *double bounce* para o mar.

Provavelmente a combinação casco e estruturas com mar seriam responsáveis pelo *double bounce*, que poderia, por si só, ser considerado um filtro para objetos artificiais no mar.

Nota-se, porém, que a diferença entre o navio de apoio e o mar é de 2,84 dB, com um desvio-padrão considerável para o navio (1,67dB). Alvos pequenos poderiam não ser detectados por ferramentas de detecção automática com essa diferença.

O *volumetric bounce*, relacionado com múltiplas reflexões entre as ondas do mar e principalmente com as estruturas complexas das embarcações e plataformas, apresenta uma diferença maior de médias entre alvos e o mar, com desvios-padrões mais baixos: 8,99 dB para o navio de apoio e 18,56 dB para a plataforma.

Considerando que o *double bounce* estaria estritamente relacionado com alvos artificiais e o *volumetric bounce* apresentou o maior distanciamento das médias entre mar e alvos, com baixo desvio-padrão, somou-se as duas bandas para facilitar o emprego de algoritmos para detecção automática. Como resultado, obteve-se diferenças maiores de médias: 11,11 dB para o navio de apoio e 38,79 dB para a plataforma. E os desvios-padrões mantiveram-se mais baixos que nas imagens SLC.

Na Fig. 4, observa-se o comportamento contrastante entre *superficial bounce* e *double bounce*, o que facilita a detecção de objetos no mar. A intensidade na banda *volumetric bounce* também é razoavelmente maior para os objetos em relação ao *background* oceânico. A soma das bandas *volumetric* e *double bounce* é uma tentativa de aumentar a diferença entre o retroespalhamento do mar e dos alvos.

A Fig. 5 traz o resultado de duas máscaras produzidas com um limiar escolhido com base nas amostras do mar para as bandas HV e *Double+Vol*, de forma a separar ao máximo o retroespalhamento do mar. Para ambos os casos, foi escolhido o valor máximo da amostra: -21,7935 dB e -38,2643 dB respectivamente. Esse valor, representa aproximadamente $3,1\sigma$ da amostra do mar em ambas as imagens.

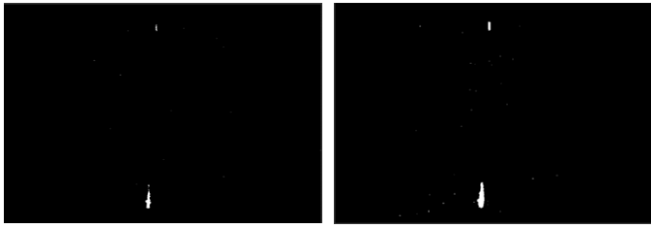


Fig. 5. Máscaras de detecção. Esquerda: banda HV e limiar em $-21,7935$ dB ($3,12\sigma$). Direita: banda *Double+Vol* e limiar em $-38,2643$ dB ($3,17\sigma$).

Percebe-se que a distância desse limiar para o valor médio do alvo menos intenso representa um intervalo de $0,53\sigma$ da amostra do mar na banda HV, enquanto na *Double+Vol* são $8,29\sigma$. Portanto, a banda SLC com melhor contraste apresenta um ruído mais amplo que aquela derivada da decomposição polarimétrica, podendo afetar a detecção de alvos com baixa intensidade. Por meio da banda *Double+Vol*, poderia-se utilizar limiares mais altos, de até 11σ e ainda continuaria-se detectando o alvo de menor intensidade, além de eliminar os ruídos presentes na máscara. Inclusive, nas máscaras apresentadas, os alvos apresentam uma área menor em pixels para os dois alvos segmentados na Banda HV em relação à *Double+Vol*.

V. CONCLUSÃO

Ao analisar as amostras de dois alvos conhecidos, um de baixa intensidade e outro de maior intensidade da onda retroespalhada, confirmou-se primeiramente o que traz a literatura: canais *cross-polarizados* são mais adequados para detecção de objetos artificiais no mar. Valendo-se da polarimetria e aproveitando toda a informação disponível em uma imagem *full pol*, realizou-se a decomposição polarimétrica de Freeman-Durden. Utilizando-se a soma do *double bounce* com o *volumetric bounce*, foi possível aumentar a separação entre o *background* do oceano, definido como ruído, e os alvos, a informação que se objetivava encontrar.

Como trabalhos futuros, poder-se-ia utilizar imagens com mais verdades de campo e, de preferência, com alvos desafiadores (de menor intensidade) para testar o grau de acurácia utilizando a polarimetria para complementar os dados em amplitude.

Como o objetivo era demonstrar a importância de dados polarimétricos para detecção de alvos artificiais no mar utilizando imagens SAR por meio de um estudo de caso, os resultados obtidos foram suficientes e permitiram uma discussão satisfatória sobre o tema. A polarimetria pode aumentar o poder de algoritmos automáticos para detecção de objetos artificiais no mar.

REFERÊNCIAS

- [1] L. E. Falqueto, A. N. Costa, D. Geraldo, and R. L. Paes, "Persistência da aplicabilidade de informações de imagens SAR orbitais em missões aéreas de vigilância e reconhecimento: uma análise por meio de simulação Monte Carlo," in *XIX Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (XIX SIGE)*, 2017, pp. 76–79.
- [2] A. N. Costa, R. L. Paes, M. Zawadzki, and D. Geraldo, "Scenario analysis as a decision-support tool: a maritime patrol case of study," *XVII Simpósio Apl. Operacionais em Áreas Def. (XVII SIGE)*, pp. 111–114, 2015.
- [3] W. R. Paradella, J. C. Mura, F. F. Gama, A. R. dos Santos, and G. G. da Silva, "Radars Imageadores (SAR) orbitais: tendências em sistemas e aplicações," *An. XVII Simpósio Bras. Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Bras. 25 a 29 abril 2015*, no. 1, pp. 2506–2513, 2015.
- [4] A. G. Castriotta and R. Knowelden, "COPE-SERCO-RP-17-0186: Sentinel Data Access 2017 Annual Report," Frascati, 2018.
- [5] W. Boerner, "Basics of Radar Polarimetry Introduction: A Review of Polarimetry," *Sens. Imaging*, pp. 21–22.
- [6] A. Moreira, P. Prats-iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar," *Geoscience and Remote Sensing Magazine, IEEE*, no. 1, pp. 6–43, 2013.
- [7] A. Buono, F. Nunziata, and M. Migliaccio, "Analysis of Full and Compact Polarimetric SAR Features over the Sea Surface," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 13, no. 10, pp. 1527–1531, 2016.
- [8] R. Shirvany, M. Chabert, and J.-Y. Y. Tourneret, "Ship and oil-spill detection using the degree of polarization in linear and hybrid/compact dual-pol SAR," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 5, no. 3, pp. 885–892, Jun. 2012.
- [9] W. Zhang, Y. Ji, L. Wang, W. Li, and L. Yu, "The classification results interpretation for compact SAR data based on partial polarization decomposition," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. 2016–Novem, no. 2, pp. 4706–4709, 2016.
- [10] G. E. Atteia and M. J. Collins, "On the use of compact polarimetry SAR for ship detection," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 80, no. JUNE 2013, pp. 1–9, 2013.
- [11] B. Zhang, X. Li, W. Perrie, and O. Garcia-Pineda, "Compact Polarimetric Synthetic Aperture Radar for Marine Oil Platform and Slick Detection," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 55, no. 3, pp. 1407–1423, Mar. 2017.
- [12] C. Wang, M. Liao, and X. Li, "Ship detection in SAR image based on the Alpha-stable distribution," *Sensors*, vol. 8, no. 8, pp. 4948–4960, 2008.
- [13] A. Lupidi, D. Staglianò, M. Martorella, and F. Berizzi, "Fast detection of oil spills and ships using SAR images," *Remote Sens.*, vol. 9, no. 3, pp. 1–17, 2017.
- [14] R. L. Paes, J. A. Lorenzetti, and D. F. M. Gherardi, "Ship detection using TerraSAR-X images in the Campos Basin (Brazil)," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 7, no. 3, pp. 545–548, 2010.
- [15] A. Marino and D. Velotto, "Dual-Polarimetric TS-X / TD-X Satellite Imagery: A Case Study in the Gulf of Mexico," vol. 10, no. 10, pp. 4376–4386, 2017.
- [16] R. Shirvany, M. Chabert, and J.-Y. Tourneret, "Comparison of ship detection performance based on the degree of polarization in hybrid/compact and linear dual-pol SAR imagery," *2011 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, pp. 3550–3553, 2011.
- [17] M. Migliaccio, F. Nunziata, A. Montuori, X. Li, and W. G. Pichel, "A multifrequency polarimetric sar processing chain to observe oil fields in the Gulf of Mexico," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 12 PART 1, pp. 4729–4737, 2011.
- [18] S. R. Cloude and E. Pettier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 2, pp. 498–518, 1996.
- [19] A. Freeman and S. L. L. Durden, "A three-component scattering model for polarimetric SAR data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 3, pp. 963–973, 1998.
- [20] D. Massonnet and J.-C. Souyris, *Imaging with Synthetic Aperture Radar*. 2008.
- [21] Earthnet, "Polarimetric Decompositions," *Earthnet Polarim. Tutor.*, p. 1–28file:///home/onfi/Documents/Biblio%20Cotriguac, 2011.
- [22] UAF/ASF, "Dataset: © JAXA/METI ALOS PALSAR L1.1 2010. Accessed through ASF DAAC 24 June 2018." [Online]. Available: <https://www.asf.alaska.edu/>. [Accessed: 24-Jun-2018].
- [23] PETROBRAS, "Plataforma Merluza - Comunicação Bacia de Santos," 2018. [Online]. Available: <https://www.comunicabaciadesantos.com.br/empreendimento/merluza>. [Accessed: 24-Jun-2018].
- [24] M. Shimada, O. Isoguchi, T. Tadono, and K. Isono, "PALSAR radiometric and geometric calibration," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 12, pp. 3915–3932, 2009.
- [25] M. Lavelle and T. Wright, "Absolute Radiometric and Polarimetric Calibration of ALOS PALSAR Products Generated within ADEN," vol. 3, no. 1, pp. 1–18, 2009.