

# Algoritmo de Detecção de Mudanças Iterativo para Pilhas de Imagens SAR UWB VHF Multitemporais

Pablo K. de Jesus, Ricardo D. Molin Jr., Marcello Costa, Dimas I. Alves, Manish Sharma, e Renato Machado

**Resumo**—Este artigo apresenta uma técnica de detecção de mudanças CD (*change detection*) para pilhas de imagens de radar de abertura sintética SAR (*synthetic aperture radar*) multitemporais. A pilha é composta por três imagens SAR e é usada como entrada de dados. Uma das imagens é usada como referência comum para formar dois pares com as outras duas imagens. Um dos pares é considerado para a detecção de alvos de interesse, enquanto o outro, para auxiliar na supressão de *clutter* do par de interesse. O método iterativo proposto explora o uso de um gráfico de controle para limitar a faixa de amplitudes associadas às mudanças de interesse, removendo a complexidade da filtragem CFAR (*constant false alarm rate*) considerada nos algoritmos clássicos de razão de verossimilhança LRT (*likelihood ratio test*). Para os testes experimentais, foram consideradas imagens SAR UWB VHF. Devido à estabilidade temporal, típicas desse tipo de imagem SAR, a supressão de *clutter* foi realizada com sucesso, favorecendo a redução da taxa de falso alarme (FAR) e mantendo uma alta probabilidade de detecção de alvos.

**Palavras-Chave**—Algoritmo de detecção de mudanças, pilhas de imagens, supressão de *clutter*.

**Abstract**—This paper presents a change detection (CD) technique for synthetic aperture radar (SAR) image stacks. The algorithm considers three SAR images as input. One image is a common reference for the other two. One image pair is used for detecting targets of interest, while the other assists in clutter suppression. The proposed method explores a control chart to limit the range of amplitudes possibly associate with changes of interest, removing the complexity of the constant false alarm rate (CFAR) filter considered in classical likelihood ratio test (LRT) algorithms. For the experimental tests, it was considered ultrawideband (UWB) very high frequency (VHF) SAR images. Due to their temporal stability, typical in this type of SAR image, clutter could be successfully suppressed, favoring reducing the false alarm rate and keeping a high probability of detection.

**Keywords**—Change detection algorithm, image stacks, clutter suppression.

## I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas vem ocorrendo um crescente interesse no monitoramento da superfície terrestre por sensoriamento remoto para as mais variadas aplicações, tais como, avaliação de desastres ambientais, detecção de navios, estudos urbanísticos e mapeamento e classificação de solos [1]–[5]. Os sistemas de radares de abertura sintética SAR (*Synthetic Aperture Radar*) são versáteis, podendo gerar imagens de

Pablo K. de Jesus, Ricardo D. Molin Jr., Marcello Costa, Manish Sharma e Renato Machado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 12228-900, São José dos Campos - SP, Brasil. E-mails: pablokunzz@gmail.com, rsddj@ieee.org, marcello.costa.br@ieee.org, manish@ita.br, rmachado@ita.br. Dimas I. Alves, Universidade Federal do Pampa, 97546-550, Alegrete - RS, Brasil, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-900, Florianópolis - SC, Brasil. E-mail: dimasalves@unipampa.edu.br.

alta resolução independente das condições atmosféricas, o que representa uma vantagem em relação aos sensores ópticos [6]–[7]. Em algumas aplicações, consideram-se aquisições de imagens SAR de uma mesma região de interesse em diferentes instantes de tempo e filtragem CFAR (*constant false alarm rate*) no processamento de seus algoritmos [1], [15].

Imagens SAR multitemporais são muito utilizadas em aplicações de detecção de mudanças CD (*change detection*), em que técnicas de processamento espaço-temporal são aplicadas, explorando características de estabilidade e de variação temporal das imagens. Particularmente, os radares que operam em faixas de frequência mais baixas, como a banda VHF (*very high frequency*), UWB (*ultra-wide band*) não sofrem influência significativa de ruído *speckle*, dado que apresentam um número reduzido de *scatterers* por célula de resolução [8], sendo adequadamente aplicáveis na detecção de mudanças.

Dentro do contexto de algoritmos de detecção de mudanças CDA (*change detection algorithm*), podemos citar os testes de razão de verossimilhança LRT (*likelihood ratio test*), que testam as hipóteses de presença de alvos de interesse e da presença de *clutter* estacionário. Os desempenhos sob o LRT, medidos sob a ROC (*receiver operating characteristic curve*), são melhorados à medida em que um modelo probabilístico mais preciso para separação dos sinais está disponível.

Recentemente, apresentou-se uma abordagem alternativa em [10] para se melhorar o desempenho do algoritmo CDA. O método proposto em [10] adota uma estratégia de pilhas (*stacks*) de imagens visando a melhor supressão de *clutter*. Como consequência, obteve-se ganhos significativos no desempenho de detecção e de redução de falsos alarmes. O método apresentado em [10] serviu de inspiração para diversas outras soluções para o problema da detecção de mudanças, como o método apresentado em [11].

O método proposto considera uma pilha de três imagens SAR como dado de entrada. Uma das imagens é usada como referência comum para formar dois pares com as outras duas imagens. Um dos pares é considerado para a detecção de alvos de interesse, enquanto o outro, para auxiliar na supressão de *clutter*. O método proposto faz uso de um gráfico de controle para a supressão de *clutter* e ênfase das mudanças potenciais de alvos com a aplicação de limiares iterativos sobre variação dos níveis das saídas das pilhas, eliminando a complexidade da filtragem CFAR considerada nos algoritmos clássicos de LRT.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção II, a base de dados considerada é apresentada. A Seção III descreve o método de detecção iterativo proposto. Na Seção IV, os resultados são apresentados e discutidos. Por fim, a Seção V apresenta algumas considerações finais.

## II. COLEÇÃO DE DADOS E DETECÇÃO DE MUDANÇAS

A coleção de dados utilizada nos algoritmos CDA considerados nesse artigo é composta por imagens capturadas pelo sistema SAR CARABAS-II<sup>1</sup>. A coleção representa um desafio para detecção de 25 veículos militares camuflados pela vegetação em uma região de floresta boreal no norte da Suécia [1], servindo para a realização de testes e validação de diversas soluções de algoritmos CDA apresentados na literatura nas últimas décadas. As 24 imagens são compostas por quatro posicionamentos distintos de alvos (veículos), conforme indicado na Fig. 1. Cada posicionamento, chamado *deployment*, é formado por seis imagens SAR, adquiridas com as seguintes geometrias de voo, a saber, duas com 135°, duas com 225° e duas com 230°. As imagens SAR consideradas neste estudo são incoerentes, ou seja, possuem apenas informação de magnitude [15].

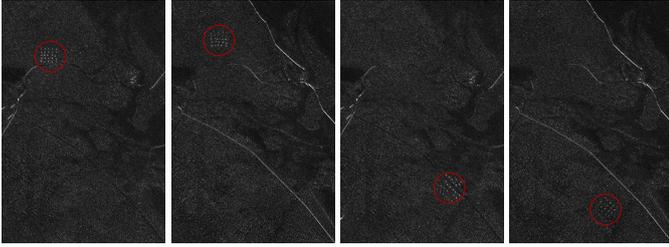


Fig. 1: Na campanha realizada em Vidsel, ao norte da Suécia, os 25 veículos foram posicionados em quatro locais diferentes (destacados nos círculos em vermelho). As quatro imagens SAR apresentadas aqui foram obtidas a partir de uma mesma direção de voo.

O desafio de detecção de mudanças para o banco de dados CARABAS-II considera a presença de veículos camuflados sob o dossel da floresta, em que mudanças de posicionamento dos veículos ocorrem entre duas cenas capturadas em diferentes instantes. Esse problema é tipicamente solucionado por meio de testes de hipóteses da teoria de detecção clássica, que apresenta um teste de razão de verossimilhança (LRT) binário, construído sobre uma hipótese nula  $\mathcal{H}_0$  e uma alternativa (hipótese verdadeira)  $\mathcal{H}_1$ . Dentro desse contexto, a hipótese nula caracteriza a ausência de mudanças, em que o sinal é composto pelo *clutter* ( $c$ ) mais ruído ( $n$ ), enquanto que, sob a hipótese  $\mathcal{H}_1$ , considera-se a mudança no posicionamento dos alvos entre as cenas, definidos como um sinal  $s$  somado às contribuições de *clutter* e ruído. O modelo de composição para o LRT é descrito pela combinação entre uma Imagem 1, de vigilância, e uma Imagem 2, de referência, genericamente representada pelo vetor de observações  $z = [z_1 \ z_2]^T$  na forma

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0 : z = \begin{bmatrix} c_1 + n_1 \\ c_2 + n_2 \end{bmatrix} & \text{(sem mudança)} \\ \mathcal{H}_1 : z = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + n_1 \\ c_2 + n_2 \end{bmatrix} & \text{(com mudança)} \end{cases} \quad (1)$$

A solução ótima para o teste é dada pelo critério de *Neyman-Pearson* (NP), que estabelece uma região  $\mathcal{R}_1$ , tal que, a

probabilidade de detecção ( $P_d$ ) seja maximizada, sujeita a uma probabilidade de falso alarme ( $P_{FA}$ ) fixa. Na configuração do LRT, isso implica na determinação de um limiar  $\gamma$  sob a verossimilhança das distribuições de probabilidades condicionais das observações  $z$  sujeitas às hipóteses  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$ . A aplicação do critério ao vetor de observações, definido por  $z = [z_1 \ z_2]^T$ , da composição (1), representa um modelo de mistura dos sinais complexos das imagens SAR, descritos pelo modelo Gaussiano circular na forma  $a = |a| \exp^{j\phi}$ , em que a fase  $\phi$  é aleatória e uniformemente distribuída entre 0 e  $2\pi$  e  $a$  é a magnitude do sinal [14]. A derivação do LRT, considerando a distribuição Gaussiana bi-variada, resulta em

$$\ln \Lambda(z) = \frac{\ln p(z|\mathcal{H}_1)}{\ln p(z|\mathcal{H}_0)} = \frac{|s^T C^{-1} z|^2}{s^T C^{-1} s} \underset{\mathcal{H}_1}{\overset{\mathcal{H}_0}{\lesseqgtr}} \gamma, \quad (2)$$

que, em termos de implementação, equivale a um filtro correlator seguido de detector de nível de magnitude. O limiar  $\gamma$  tem a propriedade CFAR estabelecida pelo critério NP e que depende somente das caracterizações sob a hipótese  $\mathcal{H}_0$ , através da  $P_{FA}$ . Em considerações práticas, sob variação das observações, essa propriedade é mantida com uma filtragem CFAR, que realiza a adaptação de  $\gamma$ . A matriz de covariância  $C$  é definida sob o modelo Gaussiano bi-variado, como sendo

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho\sigma_1\sigma_2 \\ \rho\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

que, sob a forma de parâmetro desconhecido, é determinada pela estimação de máxima verossimilhança (MLE) sob as observações  $z$ , através de  $\hat{C} = \frac{1}{N} z z^T$ .

O resultado do teste de detecção de mudança em (2), em um contexto prático, é incluído como um dos estágios de um algoritmo de detecção de mudança, através da operação de correlação entre as amostras de pixels entre o par de imagens de vigilância e referência. O roteiro típico de todos os passos do algoritmo é descrito na Fig. 2. O teste (2) sob o modelo de *clutter* Gaussiano é uma dentre diversas abordagens que têm sido apresentadas sobre o algoritmo CDA [8], [9].

## III. SUPRESSÃO DE CLUTTER USANDO PILHAS DE IMAGENS

O uso de pilhas de imagens para a detecção de mudanças é apresentada em [10] para uma supressão de *clutter* e de ruído aditivo mais efetiva. Fazendo uma diferente combinação de imagens na entrada do algoritmo CDA, essa abordagem traz informações extras de mudanças, associadas a desflorestamento, movimentação de objetos, atividades ilegais ou outras atividades que exigem monitoramento, que são usadas como entradas para a análise mais completa sob a hipótese de mudanças, melhorando a capacidade de detecção do teste (2) e supressão de *clutter*.

Na abordagem aqui apresentada, são utilizadas três imagens SAR como entrada de dados, sendo uma delas utilizada como imagem referência  $Z_1$  e as outras duas como imagens de interesse, uma utilizada para identificação de mudanças de interesse (alvos)  $Z_3$  e outra para caracterização de (*clutter*)  $Z_2$ . As imagens consideradas como entrada de dados foram

<sup>1</sup>As imagens SAR estão disponibilizadas em [9]



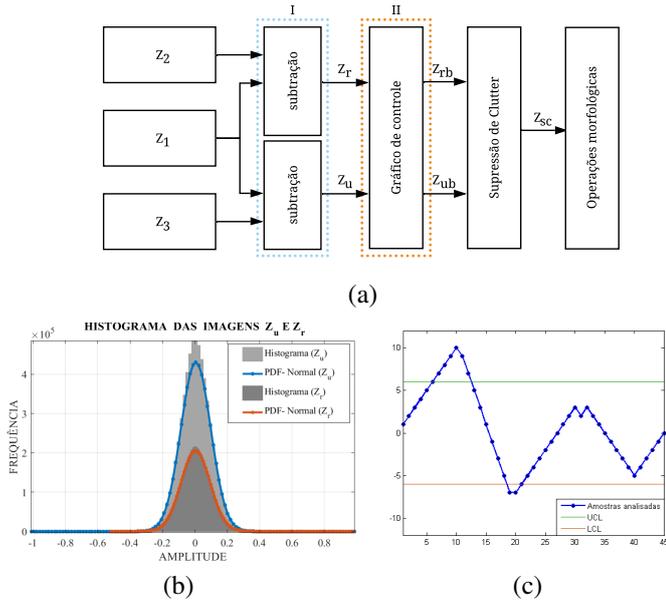


Fig. 3: Esquema de processamento para detecção de mudanças em (a) para imagens SAR incoerentes com resolução de comprimento de onda baseado em pilha de imagens. Em (b) tem-se a comparação entre as diferenças  $Z_u$  e  $Z_r$  resultantes da Etapa I em (a). Em (c), ilustra-se a aplicação de gráfico de controle para o problema de detecção de mudanças, em que *outliers*, i.e., amostras com valores maiores que o UCL ou menores que o LCL, são identificados.

Ao final, em  $Z_{sc}$  são aplicadas as operações morfológicas para discriminação dos alvos. As operações morfológicas utilizadas são as mesmas consideradas no algoritmo CDA da Fig. 2.

## V. RESULTADOS

Para os testes, foram utilizadas as 24 imagens da coleção de dados CARABAS II, descrita na Seção II. Na avaliação de desempenho, duas métricas são consideradas, a saber, a probabilidade de detecção,  $P_d$ , calculada como a razão entre o número de alvos detectados e o número total de alvos existente; e a taxa de falso alarme, FAR, determinada pelo número de falsos alarmes por  $\text{km}^2$ . Toda a análise foi feita em simulação computacional no *Software* Matlab 2018b. O computador utilizado para rodar os algoritmos possui o sistema operacional Windows 10 PRO, processador Intel i7-3970X e 32 GB de memória RAM. Os resultados obtidos com o algoritmo proposto foram comparados com os resultados apresentados em [10], que aplica um teste de verossimilhança, assumindo uma distribuição Gaussiana bivariada para a imagem diferença. Os pares de imagens que compõem as pilhas são apresentados nas três primeiras colunas da TABELA I, onde no teste entre as iluminações 1 e 3, consideram-se que há mudanças que podem estar associadas a alvos; e o teste entre as iluminações 1 e 2 é utilizado para reduzir a contribuição das estruturas alongadas (*clutter*) que, geralmente, são considerados fontes de falsos alarmes. Os resultados apresentados na TABELA I descrevem a probabilidade de detecção de aproximadamente 96% e uma FAR de 0,2 falsos alarmes por  $\text{km}^2$ , apresentando

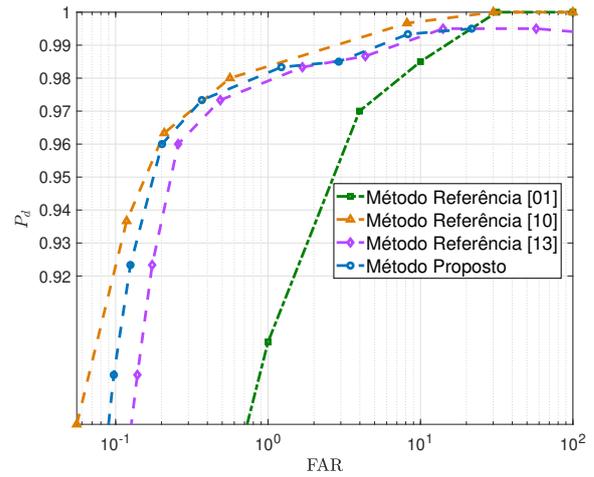


Fig. 4: Comparação entre a curva ROC obtida pelo método proposto e as melhores curvas ROC extraídas de [13] e [10]. Além disso, acrescentou-se a curva ROC de [1] considerado como resultado de *baseline*.

resultados semelhantes aos obtidos em [10], que para a mesma disposição, sob um único limiar  $\gamma = 10^4$  do teste LRT, é capaz de detectar 577 alvos do total de 600 alvos conhecidos das missões. No entanto, o método iterativo proposto possui complexidade reduzida em comparação ao correlador e ao filtro CFAR do teste LRT.

Em relação ao tempo de processamento e complexidade computacional, o método apresentado em [10] demanda, aproximadamente, 42 minutos no processo de detecção de mudanças, em que a etapa CFAR consome 72% desse total e possui uma complexidade  $O(N \times S^2)$ , em que  $N$  é o número de pixels das imagens ( $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ ) e  $S$ , o número de pixels avaliados pelo CFAR. No método proposto e no método apresentado em [13], a etapa CFAR é substituída pelo gráfico de controle e o tempo de processamento é reduzido para, aproximadamente, 4 e 3 minutos, respectivamente. Essa diferença de tempo é decorrente do processamento do segundo par de imagens requerido pelo método proposto. Em relação a complexidade computacional, o cálculo utilizado é em pixel a pixel, assim como em [13]; os dois casos possuem complexidade  $O(N)$ .

Adicionalmente, comparou-se o desempenho de  $P_d \times \text{FAR}$  do método proposto, utilizando pilha de imagens SAR, com o método de gráfico de controle de [13], considerando pares de imagens SAR. Simulações sob diferentes limiares  $\lambda = [2.5, 2.75, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 6]$  foram realizadas. Em termos gerais, o método proposto apresenta um desempenho melhor do que o método apresentado em [13]. Já em relação a comparação com o método apresentado em [10], podemos dizer que no joelho da curva ROC (melhor ponto em termos operacionais) os desempenhos de  $P_d \times \text{FAR}$  são equivalentes. Esse ponto da curva foi obtido para  $\lambda = 6$ . A Fig. 4 apresenta a comparação de desempenho obtida com o método proposto e com os métodos apresentados em [10] e [13]. A curva ROC de [5] é apresentada apenas por ser considerada um *baseline* para algoritmos de CD para o banco de dados CARABAS-II.

TABELA I: Resultados obtidos com o método proposto.

Imagem associada com a iluminação 3		Imagem associada com a iluminação 1		Imagem associada com a iluminação 2		Alvos conhecidos	Alvos detectados	$P_d$	Área(km <sup>-2</sup> )	Falsos alarmes	FAR(km <sup>-2</sup> )
Missão	Passagem	Missão	Passagem	Missão	Passagem						
2	1	3	1	3	3	25	25	1,00	6	0	0,00
3	1	4	1	4	3	25	24	0,96	6	8	1,33
4	1	5	1	5	3	25	25	1,00	6	0	0,00
5	1	2	1	2	3	25	22	0,88	6	3	0,50
2	2	4	2	4	4	25	25	1,00	6	0	0,00
3	2	5	2	5	4	25	25	1,00	6	0	0,00
4	2	2	2	2	4	25	25	1,00	6	2	0,33
5	2	3	2	3	4	25	22	0,88	6	0	0,00
2	3	5	3	5	1	25	25	1,00	6	3	0,50
3	3	2	3	2	1	25	24	0,96	6	0	0,00
4	3	3	3	3	1	25	25	1,00	6	2	0,33
5	3	4	3	4	1	25	23	0,92	6	0	0,00
2	4	3	4	3	2	25	25	1,00	6	1	0,17
3	4	4	4	4	2	25	25	1,00	6	0	0,00
4	4	5	4	5	2	25	25	1,00	6	1	0,17
5	4	2	4	2	2	25	23	0,92	6	1	0,17
2	5	4	5	4	6	25	25	1,00	6	0	0,00
3	5	5	5	5	6	25	16	0,64	6	8	1,33
4	5	2	5	2	6	25	25	1,00	6	0	0,00
5	5	3	5	3	6	25	24	0,96	6	0	0,00
2	6	5	6	5	5	25	25	1,00	6	0	0,00
3	6	2	6	2	5	25	24	0,96	6	0	0,00
4	6	3	6	3	5	25	25	1,00	6	0	0,00
5	6	4	6	4	5	25	24	0,96	6	0	0,00
Total						600	576	0,96	144	29	0,20

VI. CONCLUSÕES

Nesse artigo, propôs-se um método de detecção de mudanças iterativo baseado em gráfico de controle para pilhas de imagens SAR multitemporais. Basicamente, o método substitui a abordagem LRT por um gráfico de controle, enfatizando na supressão de *clutter*. A abordagem adotada evita a complexidade do correlator e da filtragem CFAR aplicados no algoritmo usado como referência nesse estudo. O gráfico de controle explora a estatística Gaussiana que caracteriza as imagens diferença, permitindo a obtenção de um bom compromisso entre desempenho e complexidade. Como resultados, uma comparação direta com a abordagem de pilhas apresentado em [10], que aplica uma adequada derivação do LRT sob a mesma coleção de dados, foram obtidos, em tempo dez vezes menor, desempenhos de FAR semelhantes (0,20/km<sup>2</sup> versus 0,19/km<sup>2</sup>) para uma mesma probabilidade de detecção (96%). Por fim, pôde-se reduzir a taxa de falso alarme apresentada em [13] de 0,2569/km<sup>2</sup> para 0,2014/km<sup>2</sup>, dada uma probabilidade de detecção fixada em 96%, com um pequeno acréscimo de tempo computacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES – código 001 (Pró-Defesa IV) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

[1] M. Lundberg, L. M. H. Ulander, W. E. Pierson, and A. Gustavsson, “A challenge problem for detection of targets in foliage,” *Proceedings of SPIE*, 2006.

[2] Mariví Tello, Carlos López-Martínez, and Jordi J Mallorqui, “A novel algorithm for ship detection in SAR imagery based on the wavelet transform,” *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, vol. 2, no. 2, pp. 201–205, 2005.

[3] Simon Plank, “Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR — a comprehensive review and outlook to sentinel-1,” *Remote Sensing*, vol. 6, no. 6, pp. 4870–4906, 2014.

[4] Marcos Rafael Nanni, José Alexandre Melo Demattê, Marcelo Luiz Chicati, Peterson Ricardo Fiorio, Everson César, and Roney Berti de Oliveira, “Soil surface spectral data from landsat imagery for soil class discrimination,” *Acta Scientiarum. Agronomy*, vol. 34, no. 1, pp. 103–112, 2012.

[5] Fabio Baselice, Giampaolo Ferraioli, and Vito Pascazio, “Markovian change detection of urban areas using very high resolution complex SAR images,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, pp. 995 – 999, 2014.

[6] Yan Wang, Lan Du, e Hui Dai, “Unsupervised SAR image change detection based on sift keypoints and region information,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 13, no. 7, pp. 931–935, 2016.

[7] C. Oliver and S. Quegan, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*, SciTech Publishing, 1 edition, 2004.

[8] R. Machado, V. T. Vu, M. I. Pettersson, P. Dammert, and H. Hellsten, “The stability of UWB low-frequency SAR images,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 13, no. 8, pp. 1114–1118, 2016.

[9] “The sensor data management system,” <https://www.sdms.af.mil/>, 2018, Dec., U.S. Air Force Research Laboratory.

[10] Viet Thuy Vu, “Wavelength-resolution SAR incoherent change detection based on image stack,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, pp. 1012 – 1016, 2017.

[11] Bruna G. Palm, Dimas I. Alves, Viet T. Vu, Mats I. Pettersson, Fabio M. Bayer, Renato J Cintra, Renato Machado, Patrik Dammert, and Hans Hellsten, “Autoregressive model for multi-pass SAR change detection based on image stacks,” *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV*. International Society for Optics and Photonics, 2018, vol. 10789, p. 1078916.

[12] Douglas C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, Number 4. John Wiley & Sons, Inc., 6 edition, 2009.

[13] Ricardo D. Molin Jr, Ana C. F. Fabrin, Pedro Sperotto, Dimas I. Alves, Fábio M. Bayer, Renato Machado, Mats I Pettersson, Hans Hellsten, Patrik Dammert, and Lars Ulander, “Iterative change detection algorithm for low-frequency UWB SAR,” *XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrt 2016)*, Santarém, Brasil, 2016, pp. 654–658.

[14] L. M. H. Ulander, H. Hellsten, and G. Stenström, “Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 760–776, 2003.

[15] Lars M. Ulander, William E. Pierson, Mikael Lundberg, Peter Follo, Per-Olov Frolind, and Anders Gustavsson, “Performance of VHF-band SAR change detection for wide-area surveillance of concealed ground targets,” *SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 5427, pp. 259–270, 2004.