

CA-CFAR 및 K-means Clustering 알고리즘을 이용한 효율적인 수체 탐지 기법

이승찬^{*1}, 김세진^{*2}, 최인식^{**}

Efficient Water Body Detection Method using CA-CFAR and K-means Clustering Algorithm

Seungchan Lee^{*1}, Sejin Kim^{*2}, and In-Sik Choi^{**}

이 논문은 2025학년도 한남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

요 약

본 논문은 CA-CFAR(Cell Averaging-Constant False Alarm Rate) 기반 디노이즈 기법과 K-means Clustering 알고리즘을 융합한 수체 탐지 기법을 제안한다. 테스트 셀, 보호 셀, 기준 셀로 구성된 윈도우를 SAR 영상에 슬라이딩하여 잡음을 탐지 및 억제하고 K-means Clustering 알고리즘을 통해 수체로 추정되는 픽셀을 탐지한다. 시뮬레이션 결과 노이즈 영상 대비 디노이즈 영상의 ENL(Equivalent Number of Looks)은 1.3819에서 14.7591로 10배 이상 대폭 상승하였고 수체 및 침수 지역 탐지 성능의 경우 SSIM(Structural Similarity Index Measure) 역시 0.6412에서 0.8952로 크게 향상된 것을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes a water body detection method that integrates Cell Averaging-Constant False Alarm Rate (CA-CFAR) based denoising with the K-means clustering algorithm. Noise is first suppressed by sliding a window composed of a Cell Under Test (CUT), guard cells, and reference cells across SAR image, after which K-means clustering is utilized to identify water pixels. Simulation results demonstrate a more than ten times increase in the equivalent number of looks (ENL) for the denoised image, from 1.3819 to 14.7591. Furthermore, the Structural Similarity Index Measure (SSIM) for water body and flooded area detection significantly improved from 0.6412 to 0.8952.

Keywords

cell averaging-constant false alarm rate, K-means clustering, synthetic aperture radar, water body detection

* 한남대학교 전기전자공학과 학부과정

- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0004-8462-3375>

- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0001-6574-2000>

** 한남대학교 전기전자공학과학과 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8210-0843>

• Received: Apr. 02, 2026, Revised: May 06, 2026, Accepted: May 09, 2026

• Corresponding Author: In-Sik Choi

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Hannam University, 70
Hannam-ro, Daeduk-gu, Daejeon, 34430, Korea

Tel.: +82-42-629-8568, Email: recog@hnu.kr

I. 서 론

최근 기후 변화로 인해 국지성 집중호우와 홍수 발생 빈도가 급증함에 따라, 신속하고 정확한 피해 지역 파악 및 재난 대응 기술의 중요성이 대두되고 있다. 광역 홍수 모니터링에는 기상 조건이나 태양광 유무에 무관하게 지표면 관측이 가능한 합성개구레이더(SAR, Synthetic Aperture Radar) 영상이 널리 활용된다. SAR 영상에서 침수 영역을 추출하기 위해 K-means Clustering과 같은 비지도 학습 기법이 주로 사용되지만, 픽셀간 거리 기반의 군집화 알고리즘은 잡음에 민감하다는 한계가 있다[1]. 이러한 잡음은 육지를 침수 지역으로 오인하게 하여 피해 면적을 과대 추정하고 탐지 정확도를 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하고자, 본 논문에서는 CA-CFAR 기반의 슬라이딩 윈도우 기법을 적용해 잡음을 억제하고, 정제된 데이터를 바탕으로 K-means Clustering 알고리즘을 수행하는 수체 탐지 프레임워크를 제안한다. 제안하는 기법은 스페인 발렌시아(Valencia) 지역의 SAR 영상에 적용하여 시각적, 정량적인 성능 개선 효과를 검증하였다.

II. CA-CFAR 및 K-means Clustering 기반 수체 지역 탐지 기법

2.1 CA-CFAR 기반 잡음 억제 알고리즘

본 논문에서는 SAR 영상의 잡음을 효과적으로 억제하기 위해, 국소 영역의 신호 강도를 기반으로 적응형 임계값을 산출하는 CA-CFAR 기반 디노이즈 기법을 적용한다. CA-CFAR의 탐지 윈도우는 테스트 셀, 보호 셀, 그리고 기준 셀로 구성된다[2]. 보호 셀은 검사 셀의 신호가 참조 셀로 누설되어 임계값이 과도하게 높아지는 현상을 방지함으로써, 유의미한 신호가 잡음으로 오인되어 제거되는 것을 막아준다. 최종적으로 검사 셀의 픽셀값이 참조 셀의 평균을 통해 산출된 임계값보다 낮을 경우 이를 잡음으로 간주한다. 노이즈로 판별된 셀의 값은 기준 셀의 평균값으로 대체되며, 이러한 과정을 통해 지형의 전반적인 특징을 유지하면서도 노이즈를 효과적으로 제거한다.

2.2 K-means Clustering 알고리즘

본 논문에서는 CA-CFAR를 통해 잡음이 억제된 SAR 영상에 K-means Clustering 알고리즘을 적용하여 수체를 식별했으며, 군집화를 위해 대상 지역의 지표면 특성을 고려하여 전체 픽셀을 $K = 4$ 개의 군집(육지, 수체, 건물, 식생)으로 분류하였다. 이 알고리즘은 각 픽셀과 해당 군집 중심점(Centroid) 간의 거리가 최소가 될 때까지 중심점을 반복적으로 업데이트한다. 앞선 전처리 과정을 통해 디노이즈된 상태에서 군집화가 진행되며, 최종적으로 4개의 그룹 중 SAR 영상 특성상 가장 어두운 분포를 갖는 군집을 수체로 식별하고 나머지 부분은 육지로 구분해 낸다.

III. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션은 스페인 발렌시아(Valencia) 지역을 관측한 SAR 영상을 기반으로 수행되었다. 해당 데이터는 2024년 10월 25일과 31일 Sentinel-1 위성을 통해 촬영된 영상이다. 노이즈 환경을 모사하기 위해 다운받은 그림 1(a)와 같은 원본 영상에 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)가 10dB인 잡음을 추가한 그림 1(b)를 얻은 후에 제안하는 알고리즘을 적용하였다.

본 시뮬레이션은 두 단계로 진행되었으며 첫 번째 단계에서 SNR 10dB의 백색 가우시안 잡음을 첨가한 SAR 영상에 CA-CFAR 알고리즘을 적용하여 잡음을 억제한 그림 1(c) 영상을 얻는다. 두 번째 단계에서는 잡음이 제거된 이미지에 K-means clustering을 적용하여 수체를 육지와 분리한다. CA-CFAR 기반 잡음 억제 알고리즘 성능을 평가하기 위해 최대 신호 대 잡음 비율(PSNR, Peak Signal to Noise Ratio), ENL(Equivalent Number of Looks) 성능 지표를 사용하였다. PSNR은 원본 영상과 전처리 영상의 픽셀의 평균 제곱 오차(MSE, Mean Squared Error)를 비교했을 때 픽셀의 손실이나 왜곡 정도를 정량적으로 평가한다. MSE는 식 (1)과 같이 정의된다.

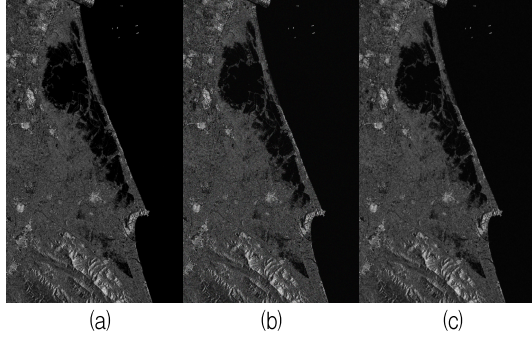


그림 1. 전처리 단계별 SAR 영상 비교 (a) 원본 영상, (b) 백색 가우시안 잡음이 추가된 SAR 영상(SNR=10dB), (c) CA-CFAR 적용후 잡음억제 영상

Fig. 1. Comparison of SAR images by preprocessing stage (a) Original SAR image, (b) SAR image with SNR 10dB, (c) Denoised SAR image using CA-CFAR

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (1)$$

여기서 $I(i, j)$ 는 원본 영상, $K(i, j)$ 는 비교 대상 영상을 의미하며, $M \times N$ 크기의 픽셀을 가지고 있다. 이를 바탕으로 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio) 값은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (2)$$

이때 MAX_I 는 영상의 픽셀이 가질 수 있는 최댓값을 의미한다. ENL은 SAR 영상 전처리 과정에서 디노이징(Denoising) 정도를 정량화하기 위해 널리 사용되는 평가지표이다. 계산을 위해 잔잔한 물이나 활주로와 같은 산란 특성이 균일한 관심 영역을 설정하여 해당 영역에 속한 픽셀들의 평균(μ)과 표준편차(σ)를 바탕으로 식 (3)과 같이 계산한다[3].

$$ENL = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

논문에서 적용한 CA-CFAR 기반 잡음 제거 과정에서 잡음 픽셀이 기준 셀의 평균으로 덧쳐어지면서 경계가 다소 흐려졌으며 그 결과, 표 1에서 나타난 바와 같이 잡음이 억제된 영상의 PSNR이

23.66dB로, 잡음 영상의 25.74dB 비해 2.08dB 감소한 수치를 보인다. 그러나 잡음 억제 성능을 나타내는 지표인 ENL은 1.3819에서 14.7591로 10배 이상 대폭 상승하여 성공적으로 잡음이 억제된 것을 확인하였다.

표 1. CA-CFAR 적용 전후의 PSNR/ENL 비교

Table 1. PSNR/ENL comparison before and after applying CA-CFAR

Parameter	Noisy image	Denoised image
PSNR	25.74dB	23.66dB
ENL	1.3819	14.7591

하지만 디노이징 과정에서 수반되는 경계의 손실은 픽셀 단위의 정밀한 탐지를 방해하므로 향후 연구에서는 경계 보존을 위한 추가적인 전처리 과정이 필요할 것으로 보인다. 전처리된 영상에서 수체 영역과 육지 간의 분리 성능을 평가하기 위해 구조적 유사도 지수(SSIM, Structural Similarity Index Measure)를 평가지수로 사용하였다. SSIM은 원본 영상과 전처리 영상의 구조적인 형태가 얼마나 보존되었는지를 분석하는 평가지수이며 픽셀의 밝기(I , Luminance), 대비(c , Contrast), 그리고 구조적 유사도(s , Structure)를 종합적으로 고려하여 평가한다[4].

$$SSIM(x, y) = [I(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (4)$$

식 (4)에서 α , β , γ 는 각 측정 요소가 최종적인 값에 미치는 영향을 조절하는 가중치 매개변수를 의미하며 모두 '1'로 설정하였다.

표 2. 잡음 제거 전후의 SAR 영상의 SSIM 비교

Table 2. SSIM comparison of SAR image before and after denoising

Parameter	Noisy image	Denoised image
SSIM	0.6412	0.8952

표 2는 잡음 제거 전후의 수체 탐지 성능을 정량적으로 비교한 결과이다. 잡음이 포함된 영상에서의 SSIM은 0.6412이며 잡음이 제거된 영상은 0.8952로 크게 향상되었으며 그림 2과 같이 Ground Truth에

해당되는 (a)와 비교했을 때 (b)의 잡음 섞인 영상보다 (c)의 제안 기법을 적용한 영상이 침수 지역(흰색 영역)을 더욱 정밀하게 복원하고 있음을 시각적으로 확인할 수 있다.

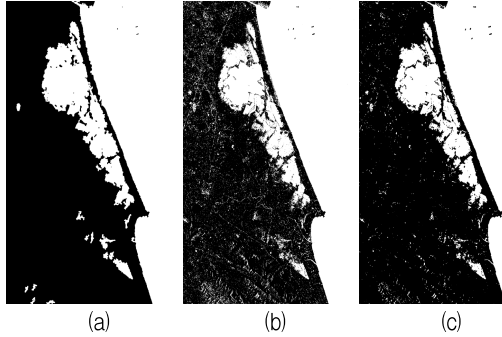


그림 2. 전처리 단계별 침수 지역(흰색 영역) 탐지 결과 비교 (a) 원본 영상, (b) 백색 가우시안 잡음이 추가된 SAR 영상(SNR 10dB), (c) CA-CFAR 알고리즘 적용 후

Fig. 2. Comparison of water body detection by preprocessing stage (a) For original SAR image(ground truth), (b) For noisy image with SNR=10dB, (c) For denoised image using CA-CFAR

IV. 결 론

본 논문에서는 CA-CFAR 기반의 디노이즈 기법과 K-means Clustering을 결합한 수체 탐지 프레임워크를 제안하여, 기존 군집화 방식의 잡음 민감성 문제를 보완하였다. 스페인 발렌시아 지역의 SAR 영상을 활용한 시뮬레이션 결과, 잡음 억제 성능 지표인 ENL은 1.3819에서 14.7591로 10배 이상 대폭 상승하였으며, 수체 및 침수 지역 탐지 성능을 나타내는 SSIM 지수 또한 0.6412에서 0.8952로 크게 향상되어 제안 기법의 정밀성을 입증하였다. 향후 연구에서는 경계 보존을 위한 후처리 알고리즘을 추가로 도입하여 탐지 정확도를 한층 더 높이고, 스펙클 노이즈(Speckle noise)[5]도 추가하여 좀 더 심도 있는 실험을 수행할 계획이다.

Acknowledgement

본 논문은 2026년도 ICobar-SMART Joint Conference에서 발표한 논문(Water Body Detection in SAR Images Using CA-CFAR Based Denoising and

K-means Clustering[6])를 확장한 것임.

References

- [1] S. Im, J. Li, and B. Moseley, "Fast noise removal for k-means clustering", Proc. of the 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS), Online, Vol. 108, pp. 1027-1036, Aug. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.02433>.
- [2] S.-H. Seol, "A study on the classification of warhead and decoy using convolutional neural networks", M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Hannam Univ., Daejeon, South Korea, 2019.
- [3] F. Argenti, A. Lapini, T. Bianchi, and L. Alparone, "A tutorial on speckle reduction in synthetic aperture radar images", IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, Vol. 1, No. 3, pp. 6-35, Sep. 2013. <https://doi.org/10.1109/mgrs.2013.2277512>.
- [4] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 13, No. 4, pp. 600-612, Apr. 2004. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1087.2012.02283>.
- [5] F. Qiu, J. Berglund, J. Jensen, P. Thakkar, and D. Ren, "Speckle noise reduction in SAR imagery using a local adaptive median filter", GIScience & Remote Sensing, Vol. 41, No. 3, pp. 244-266, May 2013. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.41.3.244>.
- [6] S. Lee, S. Kim, I. Lee, S. Oh, and I. Choi, "Water Body Detection in SAR Images Using CA-CFAR Based Denoising and K-means Clustering", Proc. of the 2026 International Conference on SMART, Jakarta, Indonesia, pp. 58-61, Feb. 2026.