

Sentinel-1 기반의 고해상도 SAR 영상 생성을 위한 초해상화 프레임워크

이정훈, 김민식, 박지홍, *김재현

아주대학교 AI융합네트워크학과, *아주대학교 전자공학과

{geniuslee20, qq01025, jihong1215, *jkim}@ajou.ac.kr

A Super-Resolution Framework for High-Resolution SAR Image Generation from Sentinel-1 to COSMO-SkyMed

Jung-Hoon Lee, Min-sik Kim, Ji-hong Park, and *Jae-Hyun Kim

Department of AI Convergence Network, Ajou University,

*Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

요약

본 논문은 Sentinel-1 SAR 영상을 입력으로 하여 COSMO-SkyMed 수준의 고해상도 SAR 영상을 생성하는 딥러닝 기반 초해상화 프레임워크를 제안한다. Pix2pixHD 구조를 기반으로 생성자와 판별자를 다중 스케일로 설계하고, 주파수 및 산란 특성 차이를 보정하기 위한 정렬 계층과 스펙클 보존 기법을 도입하였다. 실험 결과, 제안 모델은 SSIM 및 PSNR 측면에서 기존 기법 대비 우수한 성능을 나타냈으며, 도시 분석 및 해양 객체 탐지 등 다양한 분야에서의 활용 가능성을 보일 것으로 예상된다.

I. 서론

위성 기반 원격탐사는 지구 표면 및 대기 상태를 관측하고 분석하는 데 필수적인 기술로, 광학 및 레이더 센서를 활용하여 환경 모니터링, 재난 대응, 농업, 도시 계획, 군사 감시 등 다양한 분야에 적용되고 있다 [1]. 이중 합성개구레이다(Synthetic Aperture Radar, SAR)는 기상 조건이나 시간과 무관하게 관측이 가능하다는 점에서 특히 주목받으며, 저가시정 환경에서도 고해상도 영상을 제공하여 해양 오염 탐지, 빙하 감시, 도시 인프라 분석 등에 유용하다 [2]. 그러나 SAR 위성마다 사용 주파수, 공간 해상도, 관측각 등이 상이하여 여러 플랫폼의 데이터를 통합 분석하는 데는 여전히 기술적 어려움이 존재한다. 예를 들어, Sentinel-1은 C밴드를 사용해 20m급 중해상도 영상으로 넓은 지역을 빈번히 촬영할 수 있으나, 세부 객체 식별에는 한계가 있다. 반면 COSMO-SkyMed는 X밴드를 사용하여 1~3m급 고해상도를 제공하지만, 관측 빈도는 낮은 편이다. 이처럼 위성 간 주파수 차이로 인해 동일 지형이라도 반사 특성에 차이가 발생하며, 단순한 픽셀 비교나 업샘플링만으로는 정합이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 딥러닝 기반 영상 초해상화 기술이 주목받고 있으며,

특히 GAN 기반 모델이 SAR 영상 복원에서 우수한 성능을 보이고 있다 [3]. 본 연구에서는 Sentinel-1 데이터를 입력으로 하여 COSMO-SkyMed 수준의 고해상도 SAR 영상을 생성하는 딥러닝 프레임워크를 제안한다.

II. 본론

본 연구에서 제안하는 초해상화 프레임워크는 Sentinel-1 SAR 영상을 입력으로 COSMO-SkyMed 수준의 고해상도 영상을 생성하는 구조이다. 전체 파이프라인은 궤도 및 관측각 차이를 보정하는 정렬 정합으로 시작되며, 이후 대용량 SAR 영상은 학습할 수 있는 크기의 패치 단위로 분할된다. 생성자(generator)는 그림 1과 같이 Pix2pixHD 구조를 기반으로 하며, 전역적 패턴을 학습하는 저해상도 경로와 세부 디테일을 복원하는 고해상도 경로로 구성된다. 초기 단계에서는 C-band 이미지에서 X-band 특성에 가까운 구조 정보를 추출하고, 잔차 블록(residual block)을 활용하여 주파수 차이를 줄인다. 또한, C-band와 X-band 간 산란 특성 차이를 완화하기 위해, 도메인 정렬 계층을 도입하였으며, 이는 주파수 간 정보 불일치를 보정하는 역할을 한다.

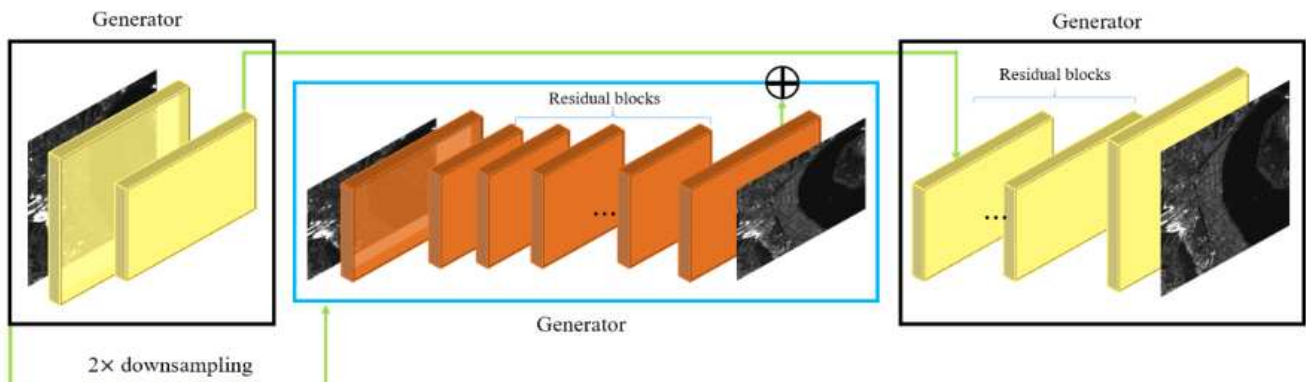


그림 1. Pix2pixHD 모델의 Generator

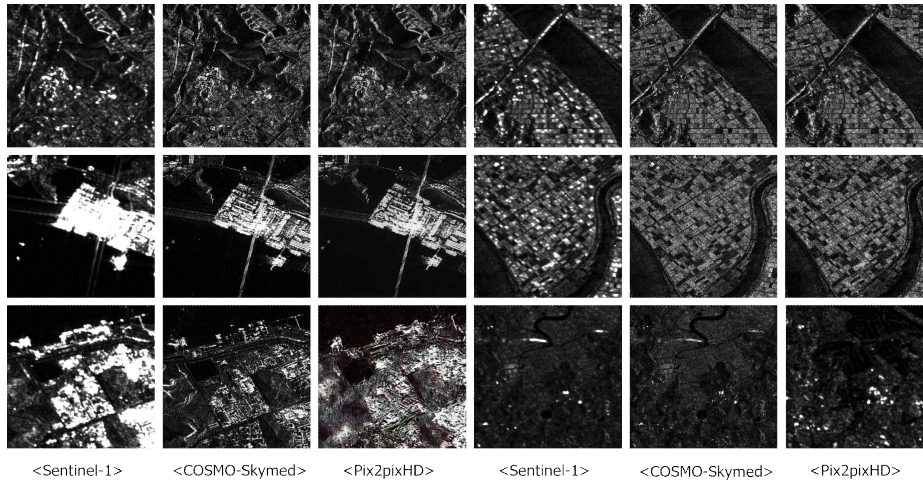


그림 2. Sentinel-1, COSMO-SkyMed와 Pix2pixHD로 생성된 고해상도 SAR 영상

표 1. 딥러닝 모델에 따른 생성된 이미지의 지표

	SSIM	PSNR
GAN	0.5224	16.81
CGAN	0.6807	25.11
CycleGAN	0.8228	23.57
Pix2PixHD	0.8822	25.63

판별자(discriminator)는 단일 PatchGAN이 아닌 다중 해상도 기반 구조로 설계되어, 고해상도에서는 세밀한 디테일을, 저해상도에서는 전반적인 구조를 평가함으로써 영상 품질의 정합성과 사실성을 동시에 확보한다. 또한, 스펙클 통계와 진폭 분산 정보를 활용하여 실제 SAR 영상의 질감을 효과적으로 보존하였다. 학습 과정에서는 먼저 복원 손실만을 사용하여 생성자를 사전 학습한 후, 점진적으로 적대적 손실(adversarial loss)을 도입하여 안정적인 수렴을 유도하였다. 학습 최적화에는 Adam 옵티마이저를 사용하였다. 생성된 패치들은 경계 부분의 불연속을 방지하기 위해 중첩 및 가중 평균 방식을 통해 결합하며, 필요시 약간의 스펙클을 재삽입하여 SAR 영상 고유의 질감을 유지한다. 최종 결과는 지오코딩을 통해 원래의 공간좌표계로 복원된다.

III. 결과

제안한 딥러닝 프레임워크의 성능 검증을 위해 다양한 기준 딥러닝 기반 초해상화 모델과 비교 실험을 수행하였다. 정량적 성능 평가는 구조적 유사도 지수(SSIM) 및 최대 신호 대 잡음비(PSNR)를 활용하였다 [4]. 그림 2에서는 입력 데이터로 사용된 Sentinel-1 영상, 실제 COSMO-SkyMed 영상, 그리고 본 연구에서 생성한 영상 간의 시각적 비교를 나타내었다. 실험 결과, 제안한 모델은 COSMO-SkyMed의 고해상도 특성과 유사한 출력을 생성하였으며, 특히 건물 윤곽, 도로 구조 등 고주파 성분이 잘 복원되었음을 확인할 수 있다. 그러나 도심 지역처럼 밝기 대비가 극단적으로 높은 영역에서는 출력 품질의 편차가 일부 발생하였다. 이는 극단적인 픽셀 분포로 인해 학습 과정에서 과적합 혹은 일반화 실패가 발생했을 가능성이 있다. 표 1에서는 다양한 모델 간 SSIM과 PSNR 수치를 비교하였으며, 제안한 모델이 두 지표 모두 가장 높은 성능을 기록하였다. SSIM과 PSNR 수치가 높을수록 고해상도 출력이 원본에 가깝다는 것을 의미하므로, 제안한 모델이 가장 우수한 영상 재현 성능을 보여주었음을 입증한다.

IV. 결론

본 논문에서는 Pix2pixHD 기반의 GAN 모델을 개선하여 Sentinel-1

SAR 영상으로부터 COSMO-SkyMed 수준의 고해상도 이미지를 생성하는 초해상화 프레임워크를 제안하였다. 생성자 및 판별자 구조를 SAR 영상 특성에 맞게 조정함으로써 보다 정확한 학습이 가능하였으며, 실험 결과에서도 시각적 및 정량적 성능이 모두 향상되었음을 확인하였다. 향후 연구에서는 Transformer 기반의 구조나 도메인 적응 기법을 추가로 도입하여 더욱 정밀하고 일반화된 모델을 개발할 계획이다. 또한, 다양한 지역 및 시간대의 데이터를 활용해 수위 추정, 해상 객체 탐지, 재난 감지 등 다양한 응용 분야로 확장 가능성을 검토할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00359330).

참 고 문 헌

- [1] A. Tsokas, M. Rysz, P. M. Pardalos, and K. Dipple, "Sar data applications in earth observation: An overview," *Expert Systems with Applications*, vol. 205, p. 117342, 2022.
- [2] X. Zhou, N.-B. Chang, and S. Li, "Applications of sar interferometry in earth and environmental science research," *Sensors*, vol. 9, no. 3, pp. 1876 - 1912, 2009.
- [3] X. Wang, L. Xie, C. Dong, and Y. Shan, "Real-esrgan: Training real-world blind super-resolution with pure synthetic data," in *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 2021, pp. 1905 - 1914.
- [4] U. Sara, M. Akter, and M. S. Uddin, "Image quality assessment through fsm, ssim, mse and psnr—a comparative study," *Journal of Computer and Communications*, vol. 7, no. 3, pp. 8 - 18, 2019.