

# 장면 균질성에 따른 방위 방향 방사 기준선 기반 ScanSAR Scalloping 보정 안정성 분석

## Stability Analysis of ScanSAR Descalloping Based on Azimuth Radiometric Baseline under Scene Homogeneity

김평주 · 정지환 · 민규보 · 이우경

Pyeong-ju Kim · Ji-Hwan Cheong · Gyu-bo Min · Woo-Kyung Lee

### 요약

ScanSAR 모드는 광역 관측이 가능한 장점이 있으나, 버스트 운용 특성상 방위 방향으로 주기적인 방사 변동인 스칼로핑(scalloping) 현상이 수반된다. 이를 보정하기 위해 방위 방향 평균 강도 분포에서 방사 기준선을 추정하는 접근이 사용되나, 해당 기법의 성능은 참조 영역의 통계적 방사 특성에 의존한다. 본 연구에서는 장면의 균질성이 스칼로핑 주기 및 변조 성분 추정 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 비균질 영역을 참조할 경우, 지형 간섭으로 인해 추정 오차가 발생하여 영상 강도가 왜곡되는 반면, 균질 영역에서는 안정적인 변조 성분 추정 및 효과적인 보정이 가능함을 확인하였다. 이는 방사 기준선 기반 스칼로핑 보정 시 통계적 균질 영역 선정이 선행되어야 함을 시사한다.

### Abstract

The ScanSAR mode offers wide swath coverage; however, it inherently entails scalloping, a periodic radiometric fluctuation in the azimuth direction due to burst mode operation. Although methods for estimating a radiometric baseline from the average azimuth intensity profile have been used for correction, their performance depends on the statistical properties of the reference scene. This study analyzes the impact of scene homogeneity on the performance of the scalloping period and modulation component estimation. The experimental results demonstrate that using heterogeneous reference regions causes estimation errors owing to terrain interference, leading to intensity distortion in the corrected image. Conversely, homogeneous regions allow for stable estimation of the modulation components and effective correction. These findings underscore the necessity of selecting statistically homogeneous regions for robust ScanSAR descloping.

Key words: Synthetic Aperture Radar, ScanSAR, Descalloping, Scene Homogeneity, Radiometric Stability

### I. 서론

ScanSAR 모드는 광역 관측 데이터 취득이 가능한 장

점을 가지나, 버스트(burst) 운용에 따른 안테나 이득 변동으로 인해 방위 방향으로 주기적인 방사 변동인 스칼로핑(scalloping) 현상이 필연적으로 발생한다. 이는 SAR

「본 연구는 2025년 기후에너지환경부 ‘수자원위성 지상운용체계 구축’ 사업(K-water, 과제번호: RS-2025-11-0400) 및 행정안전부의 ‘급경사지 안전관리를 위한 드론 기반 SAR 모니터링 시스템 개발’ 사업(과제번호: RS-2025-02633421)의 지원을 받아 수행되었습니다.»

한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received January 7, 2026 ; Revised February 6, 2026 ; Accepted March 9, 2026. (ID No. 20260107-17S)

· Corresponding Author: Woo-Kyung Lee (e-mail: wklee@kau.ac.kr)

(synthetic aperture radar) 영상의 방사 품질을 저하시켜 후속 분석 및 활용의 신뢰성을 제한하는 주요 요인으로 작용한다<sup>[1]</sup>. 이를 완화하는 방법으로 안테나 패턴을 모델링 및 추정하여 방위 방향 가중을 보상하는 기법이나, 스캘로핑 성분을 억제하는 주파수 영역 필터링 및 다중 해상도 기반 기법 등이 제안되었다. 그러나 전자의 경우 충분한 신호 대 잡음비(SNR)와 정확한 지향도 및 도플러 정보가 확보되어야 하며, 후자의 경우 영상의 텍스처 성분이 함께 제거될 수 있어 보정 성능의 안정성과 일관성 측면에서 제약이 존재한다<sup>[2],[3]</sup>.

최근에는 장편의 통계적 특성을 직접 제어하는 공간 도메인 기반 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 SRR(standard deviation to range value ratio) 지표를 활용한 장면 안정성 검증<sup>[4]</sup>, 적응형 블록화에 의한 국소적 균질성 확보<sup>[5]</sup>, 그리고 Retinex 이론이나 공간적 변화 특성을 반영한 고도화된 방사 기준선 모델<sup>[6],[7]</sup> 등이 제안되었다.

한편, 본 논문에서 주목한 방사 기준선 기반 보정 기법은 구현이 용이하고 계산 효율이 높아 대용량 SAR 영상 처리에 적합하지만, 방위 평균 강도 분포에 장면 고유의 특성이 혼입되므로 보정 성능이 참조 영역의 통계적 균질성에 크게 좌우된다는 한계를 지닌다. 또한 앞서 언급된 최신 연구들이 복잡한 전처리를 도입하는 과정은 이러한 균질성 확보가 보정 성능을 좌우하는 핵심임을 의미한다.

이에 본 논문에서는 해양, 도서, 연안, 산림 및 도심지가 혼재된 장면에서, 통계적 균질성이 스캘로핑 주기 추정 및 방사 기준선 기반 보정 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다. 특히 균질 및 비균질 영역에서 산출된 방사 기준선과 보정 후 지형 텍스처의 영향을 배제한 순수 잔여 오차를 산출하여 방위 평균 강도 프로파일의 오차를 비교·검증함으로써, 고품질 ScanSAR 영상 생성을 위해 선행되어야 할 참조 영역 선정의 중요성을 실증적으로 제시하고자 한다.

## II. 본 론

### 2-1 ScanSAR 스캘로핑 발생 요인 및 신호 모델

ScanSAR 영상에서 관측되는 스캘로핑은 다중 빔 스캔

및 버스트 기반 운용에 따른 안테나 빔의 전환이 주기적 변화에 기인한다. 이러한 물리적 운용 특성으로 인해 방위 방향으로 안테나 방사 이득의 변화가 반복적으로 발생하여 스캘로핑 변조 성분은 방위 방향으로 지배적으로 관측된다. 스캘로핑이 포함된 ScanSAR 관측 신호  $S_c(y, x)$ 는 스캘로핑이 없는 이상적인 신호  $S_0(y, x)$ 에 방위 방향 방사 이득 변조  $G_a(y)$ 가 곱해진 형태로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_c(y, x) \approx S_0(y, x) \times G_a(y) \quad (1)$$

여기서  $y$ 와  $x$ 는 각각 방위 및 거리 방향 인덱스를 나타낸다.

### 2-2 방위 방향 방사 기준선 기반 스캘로핑 보정 접근

스캘로핑 보정의 목적은 관측 신호에 포함된 방위 방향 주기 이득 변조 성분  $G_a(y)$ 를 완화하는 것이다. 방사 기준선 기반 접근은 방위 방향 평균 강도 분포로부터 추정된 방사 기준선을 변조 성분의 해석 및 보정을 위한 참조로 활용한다.

관측된 ScanSAR 영상에 대해서 거리 방향 빈(range bin) 수  $N_x$ 에 대한 산술 평균을 취하면, 방위 방향 평균 강도 분포  $\bar{I}(y)$ 는 식 (2)와 같이 정의된다. 이는 장면 고유의 방사 특성과 스캘로핑에 의한 주기적 변조 성분이 함께 반영되어 있다.

$$\begin{aligned} \bar{I}(y) &= \frac{1}{N_x} \sum_{x=1}^{N_x} |S_c(y, x)|^2 \\ &\approx |G_a(y)|^2 \times E\{|S_0(y, x)|^2\} \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 관측 구조하에서 방사 변화 추세를 나타내는 기준선  $I_b(y)$ 는 식 (3)과 같이 스캘로핑 주기  $T_s$ 에 대응하는 방위 방향 저역 통과 연산을 적용하여 근사적으로 추정한다. 이 과정에서 방위 방향으로 반복되는 주기적 변조 성분이 억제되어 장면의 완만한 방사 변화 추세가 강조된다.

$$I_b(y) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=y-\lceil T_s/2 \rceil}^{y+\lfloor T_s/2 \rfloor} \bar{I}(k) \quad (3)$$

기준선 대비 관측 강도는 식 (4)와 같이 표현되며, 이는

방위 방향 스켈로핑 변조 성분의 추정치로 해석할 수 있다.

$$G_a(y) = \frac{\bar{I}(y)}{I_b(y)} \tag{4}$$

추정된 변조 성분을 이용하여 관측 영상에 대한 역보정을 수행함으로써 스켈로핑 성분을 제거한다. 다만, 방사 기준선은 장면 방사 성분을 완전히 분리한 결과가 아니라 평균화 기반 근사값이므로, 기준선 및 변조 성분의 추정 정확도는 기준선 산출에 사용된 참조 영역의 통계적 균질성에 크게 의존한다.

### III. 실험 및 결과

#### 3-1 실험 설정 및 장면 균질 참조 영역 선정

본 실험에서는 그림 1(a)와 같이 스켈로핑 왜곡이 포함되지 않은 실제 관측된 표준 모드 SAR 영상을 기준 영상으로 사용하였다. 해당 영상에 주기 150 샘플, 깊이 3 dB의 방위 방향 이득 변조를 인가하여 그림 1(b)와 같이 스켈로핑 모사 영상을 생성하였다. 이후 변동계수(CV,

coefficient of variation) 값이 낮을수록 통계적으로 균질함을 의미하는 점에 착안하여, 그림 1(c)의 CV 분포에 따라 균질(청록색) 및 비균질(적색) 참조 영역으로 선정하여 그림 1(b)에 표시하였다.

#### 3-2 장면 균질성에 따른 추정 및 보정 성능 분석

본 절에서는 2-2절의 기법을 적용하여 장면 균질성에 따른 스켈로핑 주기 추정 성능을 평가하고 이에 따라 보정 품질에 미치는 영향을 분석한다.

표 1의 주기 추정 결과에서 균질 영역에서는 공간적 피크 탐색과 주파수 스펙트럼 분석 방식 모두 참값을 추정하는 반면, 비균질 영역에서는 지형의 불규칙한 산란 분포가 오차를 유발하는 주된 요인으로 작용하였다. 이러한 주기 추정 오차는 스켈로핑 변조 성분 산출 결과에 결정적인 영향을 미친다. 특히 공간적 피크 탐색 방식은 지형의 강한 산란체에 의한 방사 피크를 스켈로핑 주기로 오인하는 경향이 심하여, 주파수 도메인 분석대비 큰 추정 오차를 보였다. 정확한 주기가 반영된 균질 영역에서는 그림 2의 좌측 결과와 같이 변조 성분이 안정적으로 추정되었으나, 부정확한 주기가 적용됨에 따라 스켈로핑 성분과 지형의 방사 특성이 중첩되어 그림 2의 우측 결과와 같이 위상 및 진폭이 심하게 왜곡된 변조 성분이 산출되었다.

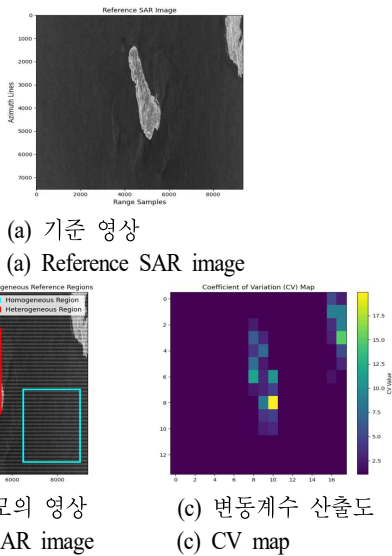


그림 1. 스켈로핑 모의 데이터 생성 및 장면 균질성 기반 참조 영역 선정(청록색: 균질, 적색: 비균질)  
Fig. 1. Scalping simulation and ROI selection based on scene homogeneity (cyan: homogeneous, red: heterogeneous).

표 1. 참조 영역에 따른 스켈로핑 주기 추정 결과  
Table 1. Scalping period estimation by reference region.

	Homogeneous region	Heterogeneous region
Peak-find	150	90
FFT spectrum	150	152

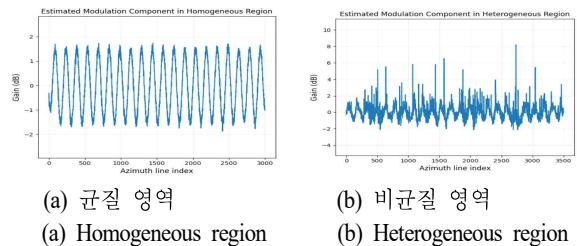


그림 2. 참조 영역별 스켈로핑 변조 성분 산출 결과  
Fig. 2. Estimation results of modulation component.

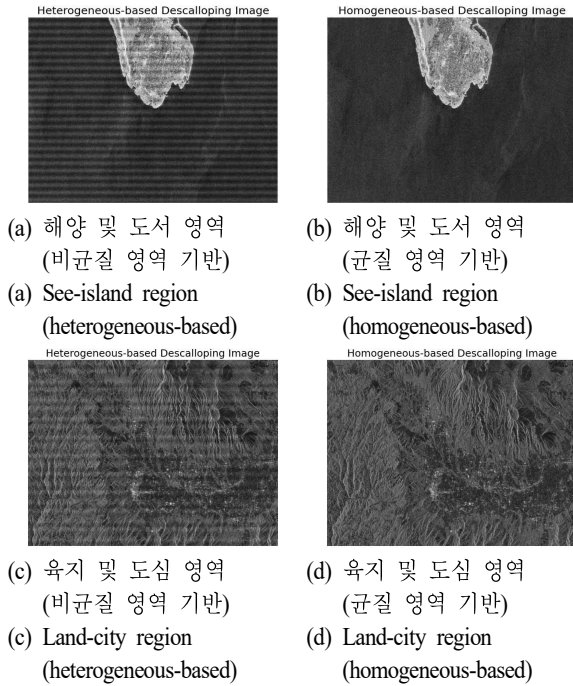


그림 3. 참조 영역 균질성에 따른 스캘로핑 보정 SAR 영상 및 방위 프로파일 비교  
Fig. 3. Comparison of descalloping SAR images based on reference scene homogeneity.

변조 성분의 추정 오차는 보정 영상의 품질 저하로 직결된다. 그림 3(a) 및 그림 3(b)의 해양 및 도서 영역 보정 결과를 비교하면, 비균질 영역 기반의 그림 3(a)는 주기적인 방사 변동이 여전히 존재하는 반면, 균질 영역 기반의 그림 3(b)에서는 스캘로핑 패턴이 효과적으로 억제된 방사를 보인다. 이러한 차이는 그림 4(a)의 방위 프로파일 분석에서도 뚜렷하게 나타난다. 비균질 기반 결과(주황색 실선)는 잔여 스캘로핑 및 국소적 과보정에 의한 강도 왜곡을 보이는 것과 대조적으로, 균질 기반 결과(녹색 실선)는 방사 기준선(적색 점선)을 안정적으로 추종하는 경향을 보인다.

또한, 육지 환경에 대한 적용성 평가를 추가로 수행하였다. 그림 3(c) 및 그림 3(d)는 산림과 도심이 혼재된 육지 영상에 대한 실험 결과이다. 지형 텍스처가 복잡한 육지 환경에서도 산림과 같은 통계적 균질 영역을 참조할 경우, 스캘로핑 성분이 안정적으로 제거됨을 확인할 수 있다. 이는 그림 4(b)의 방위 프로파일에서 보정된 신호가 기준선에 수렴하는 결과와도 일치한다.

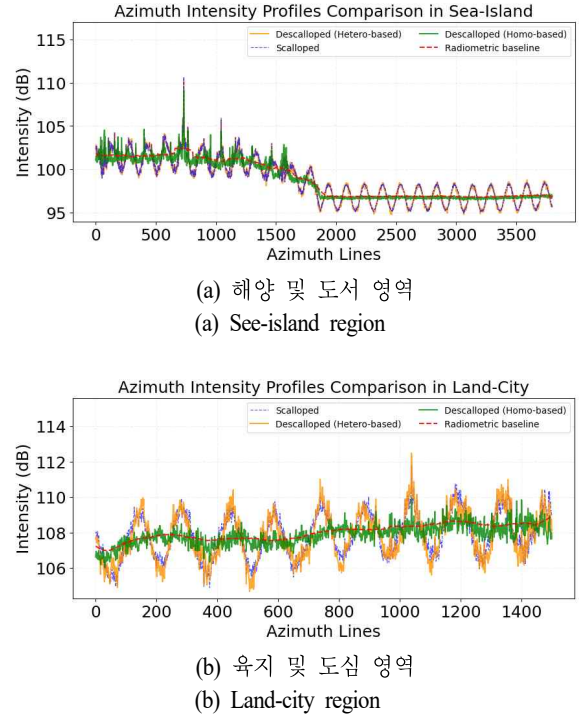


그림 4. 참조 영역 균질성에 따른 스캘로핑 보정 영상 방위 프로파일 비교  
Fig. 4. Comparison of descalloping SAR profiles based on reference scene homogeneity.

표 2. 스캘로핑 보정 성능 정량 지표(단위: dB)  
Table 2. Quantitative descalloping metrics (unit: dB).

Metrics	Heterogeneous-based		Homogeneous-based	
	Sea-island	Land-city	Sea-Island	Land-city
$\Delta D$	3.56	4.28	0.55	0.72
$\sigma_B$	1.08	1.15	0.1	0.12

이러한 분석 결과에 대해 수치적 검증을 위해 지형 산란이 배제된 균질 참조 영역의 잔여 스캘로핑 깊이( $\Delta D$ )와 방사 기준선 대비 잔차의 표준편차( $\sigma_B$ )를 정량적 지표로 산출하여 표 2에 제시한다.

#### IV. 결 론

실험 및 분석 결과, 참조 영역의 통계적 균질성은 방사 기준선 기반 ScanSAR 스캘로핑 보정 성능을 좌우하는 핵

심 요인임을 확인하였다. 균질 영역을 참조한 경우 안정적인 기준선 추종과 잔여 스칼로핑 억제 가능하였으나, 비균질 영역에서는 지형 산란 간섭으로 인해 주기·진폭 추정 오차와 국소적 과보정이 증가하였다. 이러한 결과는 고품질 ScanSAR 영상 생성을 위해 스칼로핑 보정에 앞서 통계적으로 균질한 참조 영역 선별이 선행되어야 함을 시사한다.

### References

- [1] A. M. Guarnieri, C. Prati, "ScanSAR focusing and interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 4, pp. 1029-1038, Jul. 1996.
- [2] R. Bamler, "Optimum look weighting for burst-mode and ScanSAR processing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 3, pp. 722-725, May 1995.
- [3] R. Romeiser, J. Horstmann, M. J. Caruso, and H. C. Graber, "A desclopping postprocessor for ScanSAR images of ocean scenes," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 6, pp. 3259-3272, Jun. 2013.
- [4] J. Tian, Y. Cai, W. Yu, and H. Fan, "An adaptive scalloping suppression method for spaceborne ScanSAR images based on pre-estimation and weighted filtering," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 190, pp. 267-278, Aug. 2022.
- [5] W. Yang, J. Deng, X. An, H. Zeng, Z. Ma, and W. Liu, et al., "An adaptive scalloping suppression method for ScanSAR images based on the Kalman filter," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62, p. 5205613, Feb. 2024.
- [6] X. An, W. Yang, H. Shen, H. Zeng, F. Zou, and J. Deng, et al., "A joint suppression method of scalloping and inter-scan banding for SAR images," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 18, pp. 6681-6693, Feb. 2025.
- [7] H. Ye, G. Jin, H. Zhang, X. Xiong, J. Wang, and H. Yang, "Scalloping suppression method for ScanSAR images considering azimuthal correction errors and range spatial variant characteristics," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 22, p. 4003105, Jan. 2025.

김 평 주 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0007-5760-4947>



2024년 8월: 한국항공대학교 항공전자정 보공학과 (공학사)  
 2024년 9월: 한국항공대학교 항공전자정 보공학과 석사과정  
 [주 관심분야] SAR 신호처리, 도플러 추정, 레이더 신호처리

정 지 환 [한국항공대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0009-0004-5289-8702>



2024년 2월: 한국항공대학교 항공전자정 보공학과 (공학사)  
 2026년 2월: 한국항공대학교 항공전자정 보공학과 (공학석사)  
 2026년 3월: 한국항공대학교 항공전자정 보공학과 박사과정  
 [주 관심분야] SAR 신호처리, 레이더 신호처리

민 규 보 [한국항공대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0009-0004-9060-5800>



2020년 3월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 학사과정  
[주 관심분야] SAR 신호처리, 레이더 신호처리

이 우 경 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2092-2048>



1994년 2월: 한국과학기술원 전자 및 전자공학과 (공학사)  
1996년 2월: 한국과학기술원 전자 및 전자공학과 (공학석사)  
1999년 12월: 런던대학교(UCL) 전기전자공학과 (공학박사)  
1999년 10월~2002년 12월: 한국과학기술원 인공위성센터 연구교수

2003년 1월~2004년 8월: 삼성종합기술원 책임연구원

2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수  
[주 관심분야] 위성탐체, SAR 영상, 레이더 시스템 및 신호처리