

SAR 영상의 전역 품질 개선을 위한 적응형 블록 가중 최소 엔트로피 자동초점 기법

Adaptive Block-Weighted Minimum-Entropy Autofocus for Global SAR Image Quality Improvement

유 용 선 · 이 찬 희* · 이 우 경

Yong-Sun Yoo · Chanhee Lee* · Woo-Kyung Lee

요 약

최소 엔트로피 자동초점(MEA)은 합성개구레이다(SAR) 영상 품질을 향상시키는 대표적인 기법이지만, 목적 함수의 기울기가 강한 산란체 지역에 지배되어 상대적으로 약하거나 분산된 산란체 지역의 초점 개선이 제한되는 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 공간적 최적화 편향 문제를 완화하기 위해 블록 단위 엔트로피 기반 적응형 가중치를 도입한 적응형 블록 가중 최소 엔트로피 자동초점(ABW-MEA) 기법을 제안한다. 제안 기법은 MEA 과정에서 영상의 블록(지역)별 엔트로피 정보를 활용하여, 품질이 낮은 블록의 기울기 가중치를 동적으로 조정하여 위상 보정파라미터 추정 과정에서 모든 지역을 균형 있게 고려하도록 한다. 실제 SAR 데이터를 이용한 검증을 통해 강한 산란체와 분산 표적이 혼재된 환경에서 제안 기법이 분산 표적 지역의 국부 엔트로피를 약 0.36 감소시켜(기존 기법 0.09 감소), 공간적 품질 불균형을 효과적으로 해소함을 확인하였다.

Abstract

Minimum-entropy autofocus (MEA) is a prominent technique used to enhance the quality of synthetic aperture radar (SAR) images. However, it faces a critical issue in which the gradient of the objective function is dominated by regions with strong scatterers, leading to limited focus improvement in areas with weak or distributed scatterers. To alleviate this spatial optimization bias, this study proposes an adaptive block-weighted minimum entropy autofocus (ABW-MEA) method that introduces adaptive weights based on block-level entropy. During the MEA process, the proposed method uses the entropy information of each image block to dynamically adjust the gradient weights of the low-quality blocks, ensuring that all regions are balanced during the phase error parameter estimation. Experimental results using real SAR data demonstrate that in environments where strong and distributed scatterers coexist, the proposed method reduces the local entropy of distributed target areas by approximately 0.36 (compared to a 0.09 reduction by the conventional method), effectively resolving the spatial quality imbalance.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR), Autofocus, Minimum Entropy Autofocus (MEA)

「이 연구는 행정안전부 급경사지 안전관리를 위한 드론 기반 SAR 모니터링 시스템 개발 사업의 지원으로 연구되었음(과제번호: RS-2025-02633421).」
한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronic and Information Engineering, Korea Aerospace University)

*한국과학기술원 전기 및 전자공학부(School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

· Manuscript received November 19, 2025 ; Revised December 20, 2025 ; Accepted December 23, 2025. (ID No. 20251119-145)

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

I. 서 론

합성개구레이다(SAR, synthetic aperture radar)에서 자동 초점(autofocus)은 플랫폼 운동 오차나 센서 불안정성으로 인한 잔여 위상 오차를 보정하여 영상 품질을 개선하는 기법이다^[1]. 자동초점 기법 중 최소 엔트로피 자동초점(MEA, minimum entropy autofocus) 기법은 별도의 신호 모델 가정 없이 영상의 엔트로피를 최소화하는 방향으로 위상 오차를 반복 추정하여 영상 품질을 개선하는 대표적 방법으로 널리 활용되고 있다^{[2],[3]}.

하지만 MEA 목적 함수는 비볼록(non-convex) 특성을 가져 국소 최소해(local minima)에 수렴하는 불안정성이 발생하며^{[4],[5]}, 이러한 문제를 완화하기 위한 최적화 기법 개선 연구가 수행되었다^{[6],[7]}. 또한 MEA는 반복 연산으로 인한 높은 계산 비용 문제가 있으며, 연산 효율성을 높이기 위해 영상 내 고에너지 지역이나 일부 지역만을 대상으로 하는 방법이 제안되었다^{[8],[9]}.

그러나 수렴 안정성 및 연산 효율성 개선과는 별개로, 엔트로피 지표 자체가 강한 산란체에 편향되는 근본적 한계가 존재한다^[10]. 이는 엔트로피를 포함한 영상 선명도 지표가 강한 점 산란체와 같은 희소 영상(sparse image)을 선호하기 때문이다. 영상 전체의 엔트로피를 단일 목적 함수로 사용하면, 목적 함수의 기울기(gradient)가 에너지가 집중된 강한 산란체 지역에 의해 지배된다. 그 결과, 알고리즘이 안정적으로 수렴하더라도 강한 산란체에 최적화된 위상 오차로 귀결되며, 반사율이 낮거나 균일한 지역의 초점 개선이 제한되는 공간적 품질 불균형이 발생한다.

이러한 편향성을 완화하고 초점 품질 개선이 제한된 지역을 효과적으로 복원하기 위해서는 영상을 분할하여 처리하거나, 영상의 지역적 특성을 반영하는 접근이 필요하다. 이러한 접근법과 관련하여, PGA(phase gradient autofocus) 기반의 분할 처리 자동초점 기법 연구가 수행되었으며^[11], 위상 오차가 공간에 따라 다르게 분포하는 경우를 다루는 공간 가변(space-variant) 위상 오차 보정 연구들이 수행되었다^{[12],[13]}. 해당 방식들은 공통적으로 영상을 블록 단위로 분할하고 각 블록의 위상 오차를 독립적으로 추정한다. 영상 내 산란체의 분포나 밝기 특성이 지

역적으로 상이하다는 점에서, 이러한 블록 기반 분석 접근법은 MEA 기법 개선을 목적으로 하는 본 연구에서도 유효한 대안이 될 수 있다.

그러나 개별 블록에 대해 위상 오차를 독립적으로 추정하는 방식을 적용할 경우, 블록 간 추정값의 불일치로 인해 경계면에서 위상 불연속이 발생한다. 특히 수신기의 감도가 증가할수록 영상 내 픽셀 간의 편차가 증가하여 이러한 문제는 빈번하게 된다. 이를 보정하여 연속적인 위상으로 재통합하기 위해서는 인접 블록 간 중첩(overlapping) 처리와 위상 스티칭(stitching) 과정이 요구된다. MEA는 반복 수렴 과정을 거치므로, 중첩으로 인한 데이터 증가는 연산 효율성을 저하시키며, 스티칭을 위한 후처리는 시스템 복잡도를 증가시킨다.

이러한 물리적 분할 방식의 한계를 극복하고 고품질의 SAR 영상에서 MEA의 편향성 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는, 전역 위상 추정의 연속성을 유지하면서도 국부적 특성을 반영할 수 있도록 목적 함수를 구조적으로 개선해야 한다. 이에 본 논문에서는 단일 전역 엔트로피 기반 목적 함수를 국부 엔트로피의 적응형 가중합 형태로 재구성한 적응형 블록 가중 최소 엔트로피 자동초점(ABW-MEA, adaptive block-weighted MEA) 기법을 제안한다.

제안 기법은 블록을 위상 추정 단위가 아닌 엔트로피 평가 및 가중치 산출을 위한 분석 단위로만 활용한다. 각 블록에 대해 독립적으로 위상 오차를 추정하여 합치는 것이 아니라, 국부 엔트로피 분석을 기반으로 목적 함수 자체를 재구성하여 단일 위상 오차를 추정한다. 수정된 목적 함수는 강한 산란체 지역의 지배적 영향력을 완화하고, 엔트로피가 높은 저초점·약산란 지역에 동적으로 더 큰 가중치를 부여하도록 설계되었다.

제안 기법은 목적 함수 수정을 통해 영상 전체의 균일한 초점 품질을 달성하며, 기존 MEA에서 복원이 제한적이었던 약한 산란체 및 저대비 지역의 품질을 개선한다. 본 논문에서는 실제 차량 플랫폼 기반의 FMCW SAR 데이터를 활용한 실험을 수행하였으며, 제안 기법에 대해 기존 MEA 대비 전역 및 국부 품질의 동시 개선을 확인하였다.

II. 본 론

2.1 최소 엔트로피 기반 자동초점 기법

최소 엔트로피 자동초점(MEA) 기법은 SAR 영상의 잔여 위상 오차를 추정하기 위해, 영상의 엔트로피를 최소화하는 위상 보정파라미터를 반복적으로 갱신한다. 위상 보정은 각 영역의 오차값을 보상하는 방식으로 수행되며 이때 추정 대상인 위상 오차 ϕ 는 단순히 방위(azimuth) 방향, 즉 slow-time 상에 존재하는 1차원 벡터로 모델링 될 수 있다. 보정위상 ϕ 가 적용된 영상 $I(\phi)$ 의 엔트로피는 정규화된 복소 영상 강도 p_i 를 이용하여 식 (1)과 같이 정의된다.

$$H(\phi) = -\sum_i p_i(\phi) \log p_i(\phi), \quad p_i = \frac{|I_i|^2}{\sum_j |I_j|^2} \quad (1)$$

여기서 i 와 j 는 전체 영상의 각 픽셀을 지칭하는 인덱스이며, p_i 는 전체 영상 에너지 $\sum |I_j|^2$ 에 대한 i 번째 화소의 에너지 기여도를 나타낸다. 엔트로피는 영상 내 에너지 집중도를 정량적으로 표현하며, 초점이 잘 맞을수록 에너지가 일부 화소에 집중되어 $H(\phi)$ 가 작아지게 된다.

최적 위상 $\hat{\phi}$ 를 찾기 위해 경사하강법(gradient descent), 켈레 기울기법(CG method) 등 다양한 최적화 기법을 사용할 수 있다^[4]. 본 연구에서는 경사하강법을 사용하였으며, 최적 위상 $\hat{\phi}$ 는 엔트로피를 최소화하는 방향으로 식 (2)와 같이 반복적으로 갱신된다.

$$\phi^{(t+1)} = \phi^{(t)} - \eta \nabla_{\phi} H(\phi^{(t)}) \quad (2)$$

여기서 η 는 학습률(갱신 계수)을 의미하며, $\nabla_{\phi} H$ 는 엔트로피의 위상 기울기를 나타낸다. 해당 기울기는 연쇄 법칙(chain rule)에 따라 식 (3)과 같이 전개된다.

$$\nabla_{\phi} H = \frac{\partial H}{\partial I} \frac{\partial I}{\partial \phi} \quad (3)$$

SAR 영상은 수십 dB의 넓은 동적 범위(dynamic range)를 가지므로, 강한 산란체가 존재할 경우 에너지가 특정 화소에 집중되어 p_i 분포가 편중된다. 이에 따라 목적 함

수의 기울기 $\nabla_{\phi} H$ 는 에너지가 높은 강한 산란체의 위상 변화에 지배적으로 민감하게 반응하게 되며, 상대적으로 에너지가 낮은 약한 산란체 지역의 정보는 최적화 과정에서 배제되는 한계가 있다.

이를 보완하기 위해 다음 절에서는 기존 MEA의 최적화 구조를 유지하면서도 영상의 지역별 품질 차이를 목적 함수 내에 반영할 수 있는 적응형 블록 가중 방식의 MEA 기법을 제안한다.

2.2 적응형 블록 가중 목적 함수 설계

제안하는 목적 함수는 영상의 블록 단위 품질 정보를 반영하는 국부 엔트로피 항이 추가되며, 각 블록의 상대적 엔트로피 차를 이용하여 기울기 가중치를 동적으로 조정한다. 영상 $I(\phi)$ 를 K 개의 블록 $\{B_k\}$ 로 논리적으로 분할하면, 국부 엔트로피는 각 블록 내 정규화된 픽셀 강도 p_i^k 를 이용하여 식 (4)와 같이 정의된다.

$$H_k(\phi) = -\sum_{i \in B_k} p_i^k(\phi) \log p_i^k(\phi), \quad p_i^k = \frac{|I_i|^2}{\sum_{j \in B_k} |I_j|^2} \quad (4)$$

이는 전역 엔트로피 H 와 동일한 형태의 품질 지표를 블록 단위로 정의한 것으로, 각 블록의 엔트로피 차이는 각 영상 지역의 초점 품질 및 강도 분포의 불균형을 동시에 반영한다.

제안하는 기법의 목적 함수는 전역 및 국부 엔트로피 항을 결합하는 형태로 구성되며, 그 수식은 식 (5)와 같다.

$$L(\phi) = H(\phi) + \sum_{k=1}^K w_k H_k(\phi) \quad (5)$$

여기서 가중치 w_k 는 최저 엔트로피 값을 가지는 블록과 각 블록 간의 엔트로피 차를 기준으로 식 (6)과 같이 정의한다.

$$H_{\min} = \min_k H_k, \quad d_k = \max(0, H_k - H_{\min}),$$

$$w_k = \frac{d_k}{\sum_j d_j} \quad (6)$$

식 (6)에서 국부 엔트로피가 가장 작은 블록 ($H_k =$

H_{min})은 가중치 w_k 가 0이 되어 국부 최적화 항에서 제외되며, 엔트로피가 높은 블록일수록 큰 가중치가 부여된다. 이러한 설계는 MEA 수행 과정에서 전역 엔트로피가 이미 초점이 잘 형성된 강한 산란체 지역(H_{min})에 의해 지배되고 있음을 고려한 것이다. 즉, 강한 산란체 지역은 전역 항에 의해 이미 충분한 최적화 기울기를 제공받고 있으므로, 국부 항에서 해당 블록에 대한 중복 가중을 피하고($w_k=0$), 소외된 약한 산란체 지역의 최적화 기여도를 상대적으로 높임으로써 전체적인 초점 품질의 균형을 달성하기 위함이다.

결과적으로 해당 목적 함수는 전역 엔트로피 항을 통해 기존 MEA의 수렴 안정성을 유지하면서, 국부 엔트로피 항을 통해 기울기의 공간적 편향을 보정한다. 또한 추가 연산은 블록 단위 엔트로피 계산에 국한되므로, 기존 MEA와 유사한 연산 복잡도 내에서 구현이 가능하다.

2.3 목적 함수 구현

제안한 목적 함수를 실제 SAR 영상 형성 과정에 적용하기 위해서는 영상 형성 연산과 목적 함수 평가가 하나의 연쇄적 구조로 통합되어야 한다. 본 논문에서는 구현 효율과 재현성을 고려하여 거리 압축된 수신 신호에 보정위상 ϕ 를 적용한 뒤 미분 가능한 후방 투영 알고리즘(BPA, back projection algorithm)을 사용하여 SAR 영상을 형성하였다.

BPA 연산은 영상 좌표와 송·수신 펄스에 대한 거리 계산 및 보간, 위상 보정을 수행하고, 이를 각 영상 좌표에 대해 누적하는 과정으로 표현할 수 있다^[15]. 이때 각 단계의 연산을 미분 가능한 형태로 구성하면 목적 함수 $L(\phi)$ 에 대한 기울기를 자동미분(autograd)로 계산할 수 있으며, 본 논문에서는 해당 구조를 PyTorch 프레임워크 기반으로 구현하였다.

연쇄법칙에 따라 $L(\phi)$ 의 기울기는 식 (7)과 같이 전개된다.

$$\nabla_{\phi}L(\phi) = \left(\frac{\partial H_{global}}{\partial I} + \sum_{k=1}^K w_k \frac{\partial H_k}{\partial I} \right) \times \frac{\partial I}{\partial \phi} \quad (7)$$

여기서 w_k 는 현재 영상 상태에 따라 기울기를 증폭시

키는 계수로만 동작하며, $\partial w_k / \partial \phi = 0$ 으로 설정하여 기울기 전파를 차단하였다. 이는 각 보정단계에서 가중치를 상수로 고정함으로써 가중치 변동에 의한 최적화 과정에서의 진동을 방지하고 안정적인 수렴을 보장한다.

최종적으로 위상 보정파라미터는 경사하강법을 사용하여 식 (8)과 같이 반복적으로 갱신된다.

$$\phi^{(t+1)} = \phi^{(t)} - \eta \nabla_{\phi}L(\phi^{(t)}) \quad (8)$$

2.4 알고리즘 수행 절차

본 논문에서 제안하는 ABW-MEA 기법의 전체 수행 과정은 그림 1과 같다. 알고리즘은 거리 압축된 수신 신호(SAR echo data)를 입력으로 하여 초기 위상 오차 $\phi^{(0)}$ 을 0으로 설정하는 단계에서 시작된다. 이후 최적의 위상 오차를 추정하기 위한 반복적인 최적화 과정이 수행되며, 구체적인 절차는 다음과 같다.

반복 과정의 첫 단계로, 현재 시점의 위상 오차를 수신

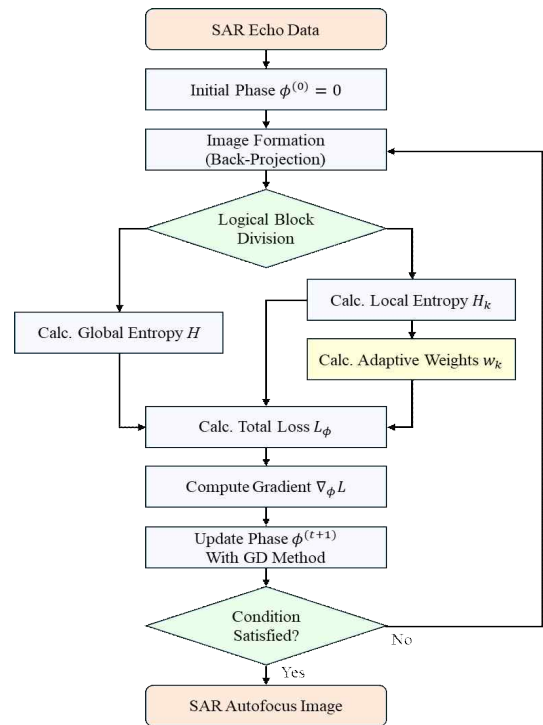


그림 1. ABW-MEA 수행 절차
Fig. 1. ABW-MEA flow chart.

신호에 보정한 후 BPA를 수행하여 SAR 영상을 형성한다. 형성된 영상에 대해 전역 엔트로피 H 와 K 개의 블록에 대한 블록별 국부 엔트로피 H_k 가 각각 산출된다. 이때 산출된 국부 엔트로피 H_k 는 두 가지 경로로 활용된다. 첫째, 식 (6)에 따라 블록별 적응형 가중치 w_k 를 결정하는 기준으로 사용되며, 둘째, 결정된 가중치 w_k 는 국부 엔트로피 항과 결합하여 식 (5)의 목적 함수 L_ϕ 를 구성하는 항으로 사용된다.

이후 목적 함수 L_ϕ 에 대한 위상 오차의 기울기 $\nabla_\phi L$ 를 계산하고, 경사하강법을 적용하여 위상 오차 $\phi^{(t+1)}$ 를 갱신한다. 갱신된 위상 오차는 다시 영상 형성 단계로 피드백되며, 이 과정은 목적 함수가 수렴 조건을 만족하거나 최대 반복 횟수에 도달할 때까지 반복된다.

본 논문에서 해당 알고리즘 구현 및 검증은 자동 미분 (automatic differentiation)을 지원하는 PyTorch 프레임워크를 기반으로 수행되었으며, 연산 환경은 Intel Core i7 CPU 및 NVIDIA GeForce RTX 4060 Ti GPU가 탑재된 워크스테이션을 사용하였다.

III. 실험 및 결과

3-1 실험 개요

본 논문에서는 제안 기법의 성능 검증을 위해, 차량 플랫폼에 탑재된 X-밴드 대역의 FMCW SAR 시스템을 이용하여 실제 데이터를 수집하였다(주요 운용 파라미터 표 1 참조).

그림 2는 본 실험의 데이터 수집 환경 및 기하 구조를 보인다. 그림 2(a)와 같이 레이더 시스템은 차량 측면에

표 1. 실험 파라미터

Table 1. Experimental parameters.

Parameter	Values
Center frequency (GHz)	9.9
Bandwidth (MHz)	400
Sampling frequency (MHz)	10
PRF (Hz)	1,000
Velocity (m/s)	21.6

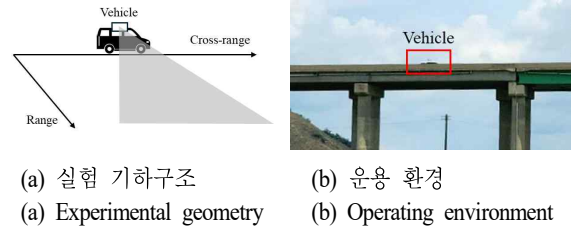


그림 2. 실험 기하 구조 및 운용 환경

Fig. 2. Experimental geometry and operating environment.

고정되어 표적 지역을 지향하도록 설치되었으며, 차량은 일정한 속도로 방위 방향으로 주행하면서 레이더 신호를 송·수신하였다. 그림 2(b)는 실험이 진행된 실제 도로 환경과 운용 중인 차량의 모습을 보인다.

실험은 정량적 분석을 위한 점 표적 기반 시나리오와 점 표적과 분산 표적이 혼재한 시나리오로 구성된다. 첫 번째 시나리오에서는 그림 3(a)의 광학 영상과 같이 두 개의 코너 리플렉터(CR1, CR2)를 배치하였으며, 측정된 두 표적의 피크 진폭은 약 8 dB 차이를 보였다(CR1>CR2).

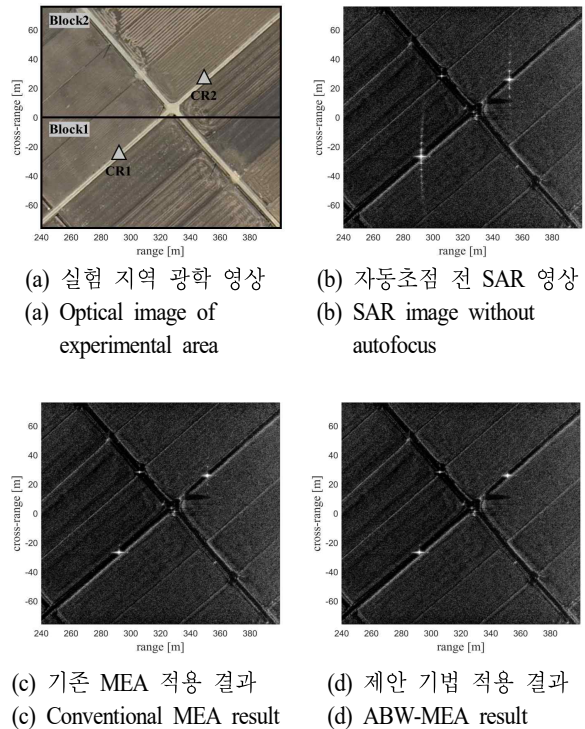


그림 3. 시나리오 1 SAR 영상 및 자동초점 결과

Fig. 3. SAR image and autofocus results of scenario 1.

제안 기법 적용 시 영상을 방위 방향으로 2등분하여 각 코너 리플렉터를 포함하는 2개의 블록을 설정하였다. 두 번째 시나리오에서는 점 표적과 분산 표적이 혼재된 실제 환경 데이터를 사용하였다.

3-2 실험 결과 및 분석

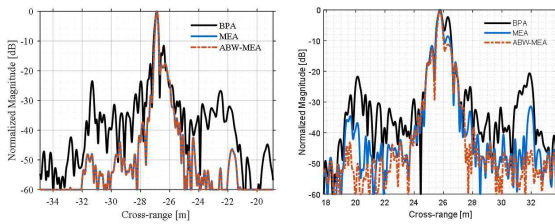
그림 3에서는 첫 번째 시나리오의 SAR 영상 및 자동초점 결과를 보인다. 자동초점 전 초기 영상 그림 3(b)는 위상 오차로 인한 강한 위표적(ghost target) 발생으로 표적 식별이 제한된다. 기존 MEA를 적용한 그림 3(c)는 강한 산란체인 CR1을 복원하였으나, 상대적으로 에너지가 낮은 CR2 주변의 위표적 억제 성능은 제한적이었다. 반면, 제안 기법(ABW-MEA)을 적용한 그림 3(d)는 CR1뿐만 아니라 CR2 주변의 위표적까지 효과적으로 제거하였으며, 이러한 성능 향상은 그림 4의 방위 방향 응답 비교와 표 2의 정량적 지표 비교를 통해 명확히 입증된다. 제안 기법은 CR1

의 표적 대 위표적 억제 비율(GSR)을 기존 MEA와 동등한 수준(-48.09 dB)으로 유지함과 동시에, CR2의 GSR을 기존 -31.42 dB에서 -45.80 dB로 약 14.38 dB 향상시켰다. 이는 제안 기법이 실제 국부 지역의 초점 품질을 유의미하게 개선했음을 정량적으로 입증한다.

그림 5는 두 번째 시나리오에 대한 MEA 자동초점 결과를 보인다. 그림 5(a)의 기존 MEA 결과와 그림 5(b)의 제안 기법 결과를 비교하면, 제안 기법이 영상 전반의 품질을 개선함을 알 수 있다. 구체적으로, 제안 기법은 A 지역의 점 표적 품질을 유지하는 동시에 B 지역 분산 표적의 경계를 더 명확히 복원하였다.

시나리오 2에 대한 정량적 성능 검증을 위해, 강한 산란체가 집중된 A 지역(block A)과 분산 표적이 주를 이루는 B 지역(block B)에 대해 각각 국부 엔트로피를 산출하였으며, 그 결과는 표 3과 같다.

표 3을 통해 각 기법에 따른 지역별 초점 품질 변화를 정량적으로 확인할 수 있다. 우선 강한 산란체가 지배적인 Block A의 경우, 초기 BPA 영상의 엔트로피 12.44에서 MEA와 제안 기법(ABW-MEA) 적용 시 각각 12.05와 12.02

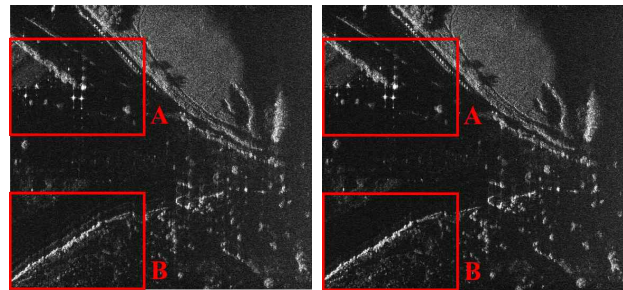


(a) CR1 방위방향 응답 비교 (b) CR2 방위방향 응답 비교
 (a) Comparison of CR1 azimuth profiles (b) Comparison of CR2 azimuth profiles

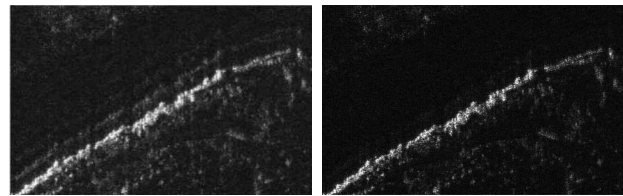
그림 4. 코너 리플렉터 방위방향 응답 비교
 Fig. 4. Comparison of corner reflector azimuth profiles.

표 2. 실험 결과
 Table 2. Experimental results.

Variables	BPA	MEA	ABW-MEA
Full entropy	10.75	10.30	10.26
Block1 entropy	8.68	8.13	8.13
Block2 entropy	12.43	12.23	12.12
CR1 GSR (dB)	-23.47	-48.09	-48.09
CR2 GSR (dB)	-20.63	-31.42	-45.80
Execution time (s) (iteration: 10)	-	79.12	80.31



(a) 기존 MEA 적용 영상 (b) ABW-MEA 적용 영상
 (a) Conventional MEA result (b) ABW-MEA result



(c) B 지역(MEA) (d) B 지역(ABW-MEA)
 (c) Block B (MEA) (d) Block B (ABW-MEA)

그림 5. 시나리오 2 자동초점 결과
 Fig. 5. Autofocus results of scenario 2.

표 3. 실험 결과

Table 3. Experimental results.

Variables	BPA	MEA	ABW-MEA
Full entropy	18.81	18.66	18.59
Block A entropy	12.44	12.05	12.02
Block B entropy	14.76	14.67	14.40
Iteration	-	10	10

로 감소하였다. 두 기법 간 엔트로피 차이가 0.03에 불과하여, 제안 기법이 강한 산란체에 대해 기존 MEA와 동등한 수준의 초점 복원 성능을 유지함을 확인할 수 있다.

반면, 상대적으로 반사도가 낮은 분산 표적 지역인 block B에서는 두 기법의 성능 차이가 뚜렷하게 나타난다. 초기 엔트로피 14.76에 대해 기존 MEA는 14.67로 0.09 감소하는 데 그쳤으나, 제안 기법은 14.40으로 0.36 감소하였다. 이는 제안된 블록 가중치 기반 기법이 기존 MEA 기법 대비 국부 엔트로피를 약 0.27 추가 감소시켰으므로, 약한 산란체 지역에서도 실질적인 초점 개선 효과가 있음을 정량적으로 입증한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 최소 엔트로피 자동초점에서 목적 함수의 기울기가 특정 지역에 편향되어 발생하는 초점 품질의 불균형 문제를 완화하기 위해, 적응형 블록 가중 최소 엔트로피 자동초점(ABW-MEA) 기법을 제안하였다. 제안 방법은 전역 및 국부 엔트로피를 결합한 목적 함수를 통해 MEA 과정에서 지역별 품질 불균형을 동적으로 보정함으로써, 기존 MEA의 단순한 구조를 유지하면서도 영상 전반의 초점 품질을 균형 있게 향상시킬 수 있음을 보였다. 실제 차량 기반 FMCW SAR 데이터를 이용해 검증한 결과, 제안 기법은 강한 산란체 중심의 보정편향을 효과적으로 완화하며 정량적 지표(엔트로피, GSR) 면에서 전역 및 국부 품질의 균형 잡힌 개선을 확인하였다. 다만, 제안 기법은 영상의 블록별 엔트로피 변화를 가중치로 활용하므로, 잔잔한 수면이나 평탄한 지형과 같이 텍스처(texture) 정보가 거의 없거나 엔트로피 변화가 미미한 지역으로만 구성된 영상에서는 가중치 산출의 이득이 제한

될 수 있다. 향후 연구에서는 이러한 균일 매질 환경에서도 안정적인 초점 성능을 확보하기 위해, 엔트로피 외에 영상의 경계선(edge)이나 대비(contrast) 정보를 결합한 다중 지표 기반의 가중치 최적화 기법을 연구할 계획이다. 특히 향후 광역 고해상도 SAR 영상 활용이 보편화될 경우, 표적 반사도 분포에 따라 다중 분할된 복수의 영역으로 분할하는 최적화하는 방식의 연구로 확장할 필요가 있다. 본 연구에서 제안한 기법의 고도화를 위해 블록의 개수 및 크기가 초점 성능과 안정성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 적응적으로 결정하는 파라미터 최적화 연구를 병행할 예정이다.

References

- [1] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar, A Signal Processing Algorithms*, Norwood, MA, Artech House, 1995.
- [2] A. F. Yegulalp, "Minimum entropy SAR autofocus," in *7th Adaptive Sensor Array Processing Workshop*, Lexington, MA, Mar. 1999, pp. 25-36.
- [3] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-entropy phase adjustment for ISAR," *IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, vol. 151, no. 4, pp. 203-209, Aug. 2004.
- [4] X. Qiu, Y. Zhao, "Study on entropy function optimization problem in auto-focusing algorithm applied for radar imaging," in *2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Nanjing, Apr. 2008, pp. 366-369.
- [5] R. L. Morrison, D. C. Munson, and M. N. Do, "Avoiding local minima in entropy-based SAR autofocus," in *IEEE Workshop on Statistical Signal Processing*, St. Louis, MO, 28 Sep. - 01 Oct. 2003, pp. 356-359.
- [6] J. Hwang, H. I. Shin, and W. W. Kim, "Minimum-entropy-based autofocus method for real SAR images," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 5, pp. 366-374, May 2018.
- [7] T. Xiong, M. Xing, Y. Wang, S. Wang, J. Sheng, and L. Guo, "Minimum-entropy-based autofocus algorithm for SAR data using Chebyshev approximation and method of

series reversion, and its implementation in a data processor," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 3, pp. 1719-1728, Mar. 2014.

[8] H. Su, S. Wei, X. Zhang, L. Pu, and X. Yang, "Efficient autofocus of small multi-rotor UAV SAR by minimum entropy BP algorithm," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 21, pp. 7356-7359, Oct. 2019.

[9] X. Hou, Y. Ma, "SAR minimum entropy autofocusing based on Prewitt operator," *PLOS ONE*, vol. 18, no. 2, p. e0276051, Feb. 2023.

[10] R. L. Morrison, M. N. Do, and D. C. Munson, "MCA: A multichannel approach to SAR autofocus," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, no. 4, pp. 840-853, Apr. 2009.

[11] H. S. Shin, J. W. Ok, J. W. Kim, and J. M. Lee, "Performance improvement of SAR autofocus based on partition processing," *The Journal of Korean Institute of*

Electromagnetic Engineering and Science, vol. 28, no. 7, pp. 580-583, Jul. 2017.

[12] L. Ran, Z. Liu, L. Zhang, R. Xie, and T. Li, "Multiple local autofocus back-projection algorithm for space-variant phase-error correction in synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 13, no. 9, pp. 1241-1245, Sep. 2016.

[13] G. Wang, M. Zhang, Y. Huang, L. Zhang, and F. Wang, "Robust two-dimensional spatial-variant map-drift algorithm for UAV SAR autofocusing," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 3, p. 340, Feb. 2019.

[14] J. L. Nazareth, *Conjugate Gradient Method: Optimization Theory and Methods*, New York, NY, Springer, 2006.

[15] M. I. Duersch, "Backprojection for synthetic aperture radar," Ph.D. dissertation, Brigham Young University, Provo, UT, 2013.

유 용 선 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-3834-8111>



2025년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)
 2025년 3월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정
 [주 관심분야] SAR 신호처리, 요동보상

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] 위성탐체체, SAR 영상, 레이더 시스템 및 신호처리

이 찬 희 [한국과학기술원/박사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-7722-1912>



2021년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학사)
 2024년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학석사)
 2024년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정
 [주 관심분야] RF 시스템 설계, 레이더 시스템, 위상배열 안테나, 안테나 설계