THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2018 May; 29(5), 366～374.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2018.29.5.366
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

실제 SAR 영상에서의 최소 엔트로피 기반의 자동 초점 기법 연구

Minimum-Entropy-Based Autofocus Method for Real SAR Images

황 정 훈 · 신 현 익 · 김 환 우*

Jeonghun Hwang · Hyun-Ik Shin · Whan-Woo Kim*

요 약

항공기 탑재 SAR(Synthetic Aperture Radar)의 경우 요동의 발생은 필수적이며, 요동 보상 이후 완전히 제거되지 않은 잔여 오차에 의한 품질 저하를 개선하기 위한 자동 초점(Autofocus: AF) 기법은 반드시 필요하다. 본 논문에서는 스포트라이트 모드(spotlight mode)로 획득한 실제 SAR 영상에서 견고한 성능 개선이 가능한 최소 엔트로피(Minimum-Entropy: ME) 기반의 자동초점 기법을 제시한다. AF의 반복 적용 시마다 위상 오차 추정치가 단조 감소 조건을 만족하는지를 확인하고 이를 어긋날 경우, 조건을 만족하도록 위상 오차 추정 크기를 조정하는 기법을 제안한다. 실제 SAR 원시데이터에 제안한 방식을 적용하고 성능 비교를 수행하여 제안한 방식의 우수함을 보이도록 한다.

Abstract

In cases of airborne equipped with SAR, because the occurrence of motion is inevitable, it is necessary to apply autofocus techniques to SAR images to improve the image performance degradations caused by residual errors. Herein, a robust autofocus algorithm based on the minimum entropy criteria is proposed for the real SAR data in the spotlight mode. The convergence condition of the phase error estimation is checked at every iteration and if it is violated, the size of the phase error estimation is adjusted to the convergence condition. The real SAR raw data is used to demonstrate the excellent performance of the proposed algorithm.

Key words: SAR, Autofocus, Minimum Entropy, Phase Error

Ⅰ. 서 론

항공기에 탑재하는 SAR는 바람 및 기체 진동 등으로 인해 이상적인 직선 비행을 하지 못하고 요동을 경험하게 되므로, 반드시 요동 보상이 필요하다. 그러나 IMU/GPS 등 항법 장치의 위치 정확도 한계로 인하여 요동 보상 이후에도 잔여 오차가 반드시 남게 된다. 이러한 외부 요인에 의한 오차뿐 아니라, 시스템 내부 지연 오차 등도 방위 해상도 및 부엽 성능을 저하시키게 되며, 이를 개선하기 위한 SAR 영상에서의 신호처리 기술을 자동초점(Autofocus: AF) 기법이라고 한다[1].

PGA(Phase Gradient Autofocus)[2],[3]는 SAR의 대표적인 AF 기법으로서, 최대우도(Maximum Likelihood: ML) 추정 관점에서 최적이 되며, 반복 적용 기법에 의한 성능 개선을 이루게 된다. 전체 영상에서 PGA에 유리한 점 반사 모델(point reflector model) 특성이 강한 신호들만을 일부 잘 선택[4]하여 적용할 경우, 작은 반복 횟수로도 최종 위상 오차 추정치에 빠르고 견고하게 수렴한다는 장점이 있으

국방과학연구소 제3기술연구본부(The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development)
*충남대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungnam National University)
· Manuscript received January 25, 2018 ; Revised March 7, 2018 ; Accepted April 10, 2018. (ID No. 20180125-014)
· Corresponding Author: Whan-Woo Kim (e-mail: wwkim@cnu.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

나, 실제 SAR 영상에서 항상 유리한 표적만 존재한다고 할 수 없으므로 영상에 따라 개선 성능 편차가 발생할 수 있다는 단점이 있다. SAR 영상의 엔트로피를 계량(metric)하고, 이를 최소화하는 관점으로 방위 위상 오차를 추정하는 최소 엔트로피(Minimum Entropy: ME) 기반의 AF 기법(ME-AF) 또한 SAR/Inverse SAR(ISAR) 영상 품질 개선 목적으로 제안되었다[5]~[11]. PGA와 달리 신호 모델에 대한 가정 없이 위상 오차를 추정하는 최적화 문제 해결 접근이라는 장점이 있는 반면, 느린 수렴 속도에 의한 많은 연산량 및 반복 횟수, 또는 반복 도중 수렴 조건을 만족하지 못할 경우, 전체 최소값(global minima)에 단조 감소(monotonic decrease)하지 못하고, 국소 최소값(local minima)에 수렴하여 위상 오차 추정 성능이 저하될 수 있다는 단점이 존재한다[10].

본 논문에서는 기존 ME-AF의 핵심 이론 및 실제 SAR 영상에 ME-AF 적용 시 수렴 조건 불만족에 의해서 발생하게 되는 성능 저하를 설명하고, 이를 극복하기 위한 기법을 제안한다. 제안한 방식은 ME-AF의 반복 적용 시마다 수렴 조건을 확인하고, 수렴 조건을 만족하지 않을 때마다, 위상 추정치의 크기를 감소시켜서 단조 감소가 지속 가능하도록 조정한다. 기존 ME-AF에 의한 위상 오차 추정 및 영상 형성 결과뿐 아니라, PGA 적용 결과와도 비교, 분석하여 성능을 검증하고 제안한 방식의 우수성을 보이도록 한다.

Ⅱ. 본 론

2-1 최소 엔트로피 자동초점 기법 (ME-AF)

2차원 SAR 데이터의 거리 압축 방위 주파수 영역(range compressed phase history) 신호를 $y(m,n)$이라고 하고, AF에 의한 방위 위상 추정치를 $\boldsymbol{\Phi}(m,n)$라고 한다. 여기서 m은 방위 인덱스, n은 거리 인덱스를 나타낸다. 영상 관측 폭의 크기가 크지 않을 경우, $\boldsymbol{\Phi}(m,n)$이 거리 방향으로 위상 오차가 공간 변이하지 않다는 일반적인 가정[1]을 고려한다면, $\boldsymbol{\Phi}(m,n)$은 m의 함수인 $\phi(m)$만으로 표현할 수 있으며, $M\times 1$인 벡터가 된다. 따라서 일반적인 AF 관련 연구에서 방위 위상 추정치에 의해 개선된 최종 영상 $z(l,n)$은 다음의 푸리에 변환 식 (1)로 표현할 수 있다[1].

$$z(l,n)=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{M}y(m,n)e^{j\phi(m)}e^{j\frac{2\pi m}{M}l} \tag{1}$$

where

$l=1,2,\ldots,M,\ m=1,2,\ldots,M,\ n=1,2,\ldots,N$

영상의 엔트로피 E는 다음의 식 (2)로 정의하게 되며 SAR 영상의 방위 위상 오차가 감소하여, 방위 해상도 및 부엽 성능이 좋아질수록, 즉 영상의 초점이 잘 맞을수록 엔트로피는 작아지게 된다[6],[7].

$$E=-\frac{1}{E_z}\sum_{l=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}|z(l,n)|^2\ln|z(l,n)|^2+\ln E_z \tag{2}$$

where $E_z=\sum_{l=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}|z(l,n)|^2$

ME 기반 위상 오차 추정은 다음 식 (3)에서 정의한데로, E를 최소화하는 $\phi(m)$를 추정하게 된다.

$$\tilde{\phi}=\arg\min_{\phi}E(\boldsymbol{\Phi}) \tag{3}$$

식 (2)에서 식 (3)을 만족하는 수식을 유도하고 정리하면, 다음의 위상 오차 추정 방정식을 도출하게 된다[6].

$$\tilde{\phi}(m)=\tan^{-1}(B_m/A_m) \tag{4}$$

where

$$\begin{aligned}A_m&=-\frac{\partial^2 E}{\partial\phi_m^2}\\&=-\frac{2}{ME_z}\mathrm{Re}\left\{\sum_{n=1}^{N}\left\{\tilde{y}(m,n)\sum_{l=1}^{M}e^{j\frac{2\pi l}{M}m}z^*(l,n)\ln|z(l,n)|^2\right\}\right\}\\&\quad+\frac{2}{M^2E_z}\sum_{n=1}^{N}\left\{|y(m,n)|^2\sum_{l=1}^{M}\ln|z(l,n)|^2\right\}\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}B_m&=\frac{\partial E}{\partial\phi_m}\\&=\frac{2}{ME_z}\mathrm{Im}\left\{\sum_{n=1}^{N}\left\{\tilde{y}(m,n)\sum_{l=1}^{M}e^{j\frac{2\pi l}{M}m}z^*(l,n)\ln|z(l,n)|^2\right\}\right\}\end{aligned} \tag{6}$$

$$\tilde{y}(m,n)=e^{j\tilde{\phi}(m)}y(m,n) \tag{7}$$

$$z(l,n)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\tilde{y}(m,n)e^{j\frac{2\pi m}{M}l} \tag{8}$$

$\tilde{\phi}(m)$은 m번째 방위 위치에 해당하는 위상 추정치가 되며, M개의 위상 오차 추정치중 $M-1$개의 값은 그대로 두고, m번째 값만 위 식 (4~8)에 의해 순차적으로 갱신하게 되며, M번의 반복 갱신 연산을 통해 $M\times 1$ 크기의 위상 추정 오차 벡터 $\tilde{\phi}$을 전체 1회 추정을 완료하게 된다. $M\times 1$ 크기의 벡터를 전체 추정했을 때마다, 현재 추정된 $M\times 1$ 위상 오차가 보상된 영상의 엔트로피 값과 직전까지 $M\times 1$ 위상 오차 보상 완료된 영상의 엔트로피 값을 비교하고, 그 차이가 일정 크기 이하로 수렴할 때까지 반복을 계속하게 된다. 즉, 매 반복마다 전체 추정을 위해서 M개의 위상 오차 값을 순차적으로 갱신하고 비교한 후 다시 반복하는 연산을 수행하여 위상 오차의 추정치가 식 (3)을 단조 감소시켜 엔트로피가 전체 최소값으로 수렴하도록 보장할 수 있는 기법을 MIA(Monotonic Iterative Algorithm)이라고 한다. 이러한 단조 감소 조건을 만족하기 위해서는 반복 연산을 수행할 때마다 반드시 아래의 조건을 만족하는지 확인하여야 한다.

$$A_m=-\frac{\partial^2 E}{\partial\phi_m^2}<0,\ \ m=1,2,...,M \tag{9}$$

하지만 MIA의 순차적 갱신 연산에서 발생하는 연산량은 상당하며, 이를 줄이기 위해서 식 (4)의 $\tilde{\phi}$의 추정치를 순차적인 방식이 아닌 고속 푸리에 변환을 통해 $M\times 1$ 벡터를 동시에 갱신하는 기법(Simultaneous Update: SU) 또한 같이 제안되었다[6]. 이럴 경우 연산량을 $O(NM^2)$에서 $O(NM\ln M)$으로 크게 감소시킬 수 있는 장점이 있는, 반면 엄격한 의미에서 엔트로피 전체 최소값으로의 수렴을 항상 보장할 수 없게 된다.

연산량 감소를 위해 SU 방식을 적용한다고 하더라도 전체 SAR 영상 샘플에 대해 ME-AF를 적용할 경우, 느린 수렴 속도로 인하여 반복 횟수가 많기에 실시간 처리용으로 적용하기에 여전히 부담이 크다고 할 수 있다. 강한 표적 신호와 클러터의 대비차(contrast)를 비교하여 일부 거리 빈만을 선택하고 ME-AF를 적용하는 개념이 제안되었다[7]. 전체 영상의 일부를 잘 선택할 경우 빠르고 정확하게 오차 추정이 가능하다는 점은 PGA에 적용 시 검증된 방식[4]이다. ME-AF 또한 SAR 영상에서 엔트로피에 의한 비용 함수인 대리 함수(surrogate function)로 부터 최적 해를 반복적으로 찾는 기법이므로 초기 값을 잘 선택할수록 빠르게 수렴 가능하다는 점에서 이러한 접근법은 연산량을 줄이면서도 성능을 저하시키지 않는 매우 효율적인 접근법이라고 할 수 있다.

2-2 실제 SAR 영상 적용을 위한 ME-AF 개선기법

기존의 논문[6],[7]들은 식 (9)를 만족한다고 가정하고, ME-AF의 적용을 설명하고 있고, 또 SAR 영상에 적용한 결과를 보여주고 있다. 그러나 실제 우리가 획득한 실제 SAR 원시데이터에 오리지널 MIA와 SU 방식을 모두 적용해 보았을 때, 많은 경우에서 반복 적용 중간에 식 (9)를 위반하는 경우가 발생하였다.

원인을 분석해 보면, ME-AF에서는 식 (2)의 엔트로피 정의에서부터 유도된 관계식과 SAR 영상의 방위 푸리에 변환 값으로 이루어진 식 (5) ~식 (6)을 통해 A_m, B_m를 계산하게 되며, 식 (4)로 부터 방위 위상 오차 추정치를 구하게 된다. 즉 매 반복마다 SAR 영상 획득 지역의 특성(표적 및 클러터의 세기 및 위상 등)에 의한 엔트로피 관계식이 반영되며, 추정된 위상 오차가 $\tan^{-1}$ 함수의 하나의 치역인 $[-\pi/2,\pi/2)$을 벗어난 크기로 추정될 수 있다. 이럴 경우, 위상 펼침(phase unwrapping)이 되지 않은 위상 겹침(phase wrapping) 상태인 추정치로 다가가게 되나, 이럴 경우 반복 추정 도중 식 (9)의 단조 감소 수렴 조건을 위배하는 경우가 발생하게 되며, 그림 1은 이러한 경우의 예를 잘 보여주고 있다.

이와 달리 PGA에서는 위상 오차 추정 시 오직 SAR 영상의 방위 푸리에 변환 도메인에서 각 거리 빈 정보만을 사용하게 되며, 게다가 위상 오차를 직접 추정하는 것이 아니라 위상 오차의 기울기를 추정하여 합성한 후, 최종적으로 위상 오차가 되도록 적분하게 된다. 따라서 적분 과정에서 선형 치우침(linear bias)만 잘 제거한다면, 위상 펼침이 잘 수행된 오차 추정 결과를 언제나 견고하게 얻을 수 있다.

다양한 형태의 표적 특성이 존재하는 SAR 영상에서 ME-AF에 의한 개선이 성능 저하 없이 항상 가능하기 위

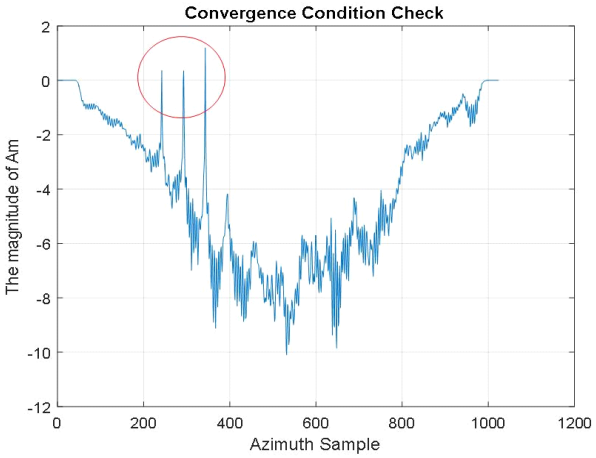


그림 1. $\overline{A}$ 의 수렴 조건 확인 결과
Fig. 1. The convergence condition check of $\overline{A}$.

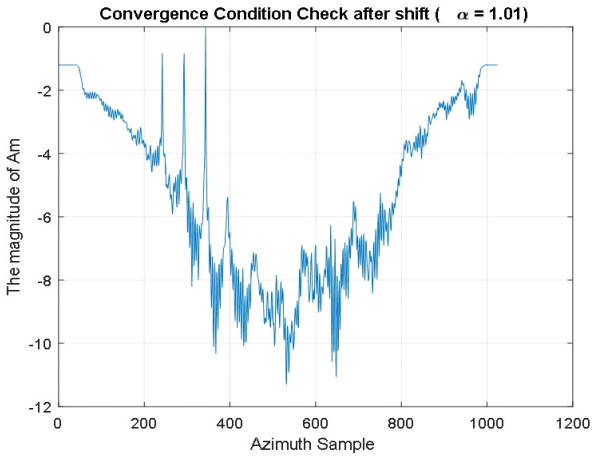


그림 2. 식 (10)에 의한 $\overline{A}$ 값 변화
Fig. 2. The change of $\overline{A}$ by formula (10).

해서는 식 (9)를 만족하며 반복 연산을 진행해야 위상 오차를 보상한 영상의 엔트로피가 전체 최소값에 다가가게 됨을 보장한다. 이를 위해 ME-AF에서 매 반복 연산때마다 $M\times 1$벡터 $\overline{A} = [A_1, A_2, \ldots, A_M]$의 한 성분이라도 식 (9)를 위반하는 경우가 발생할 경우, 그때마다 $\overline{A}$ 의 최대값이 0보다 크지 않도록 $\overline{A}$ 을 선형이동 시키게 되는 방식을 새롭게 제안하며, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\overline{A} = \overline{A} - \alpha \cdot \max(\overline{A}) \tag{10}$$

그림 2에 식 (10)을 적용한 $\overline{A}$ 를 나타내었다. α는 scale factor로서 1보다 큰 상수이다. 식 (4)에서 보면 $\max(\overline{A})$의 값이 양수였다면, 주변 위상 추정치와 달리 $\max(\overline{A})$ 위치에서만 위상 추정치의 부호가 반대가 되므로, 이는 곧 $\max(\overline{A})$ 값 위치에서 위상 오차 추정치가 이상치(outlier)가 될 수 있음을 의미한다. 식 (10)에 의해 양수였던 $\max(\overline{A})$의 값은 양수에서 음수로 바뀌게 되므로 식 (9)의 단조 감소 수렴 조건을 항상 만족하게 되며, $\max(\overline{A})$를 제외한 나머지 A_m 값들은 원래 모두 음수인 상태에서 그 절대값만 기존보다 모두 커지게 된다. 이럴 경우, 식 (4)에서 $\tan^{-1}(B_m/A_m)$에 의한 위상 오차 추정치의 값이 전체적으로 모두 동일한 비율로 작아지는 효과를 나타내므로 위상 오차 추정치에 의한 개선이 작아지게 된다. 이로 인해 엔트로피 개선 효과가 다소 줄어들게 되므로, 반복 횟수가 다소 증가하게 되나, 더 이상 수렴 조건 불만족에 의한 반복 중단 또는 최종 위상 오차 추정 성능 저하는 극복할 수 있게 된다.

Ⅲ. 실험 결과 분석

본 논문에서 제안한 방식을 검증하기 위해 비행 시험을 통해 획득한 실제 SAR 원시데이터[12]를 활용하도록 한다. SAR 영상 획득 기하는 비행 고도 약 3 km, 경사거리 24.3 km, 스퀸트 각도 −11.6°이며, 영상 획득 모드는 스포트라이트 모드, 서브미터급 해상도를 위한 시스템 변수를 적용하였다. 영상 형성 알고리즘으로는 잔여 오차 성분에 의한 공간 변이 열화에 매우 강건한 역투영 알고리즘(Back-Projection Algorithm: BPA)[13]에 의해 영상을 형성하였다. 그림 3에는 영상 획득 동안 비행체가 경험한 요동의 특성을 거리, 고도 방향으로 분해하여 나타내었다.

실시간 처리 적용 시의 연산량 부담을 고려할 때, 오리지널 MIA 방식은 매우 큰 제약 조건을 가지게 되므로, 실제적용 가능성 확인 관점에서 SU 기법의 적용만을 고려한다. 또 표적 대 클러터 대비차를 비교해 일부 거리 빈만을 선택하고, 여기에 ME-AF를 적용하는 기법을 오리저널 SU와 제안한 SU 기법에 모두 적용해 연산량 부담을 더욱 경감시키도록 한다.

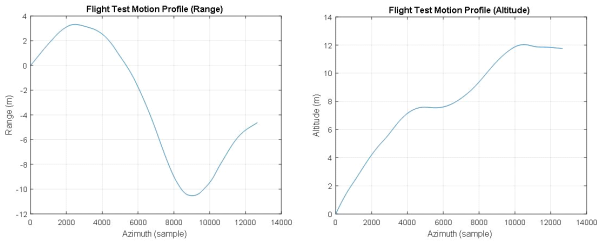


그림 3. 비행체 요동 특성 (거리, 고도)
Fig. 3. Motion characteristics of platform(range, altitude).

3-1 α값 변화에 의한 오차 추정 결과/반복 횟수 변화 분석

앞서 α는 1보다 커야 하며, 적절한 α값의 선택을 통한 최적화를 위해 α값의 변화에 따른 위상 오차 추정 성능의 변화와 영상의 엔트로피가 전체 최소값에 수렴할 때까지의 반복 횟수의 변화를 분석하기로 한다. α=1.01, 1.5, 3, 10일 때 위상 오차 추정 결과와 반복 횟수에 따른 영상 엔트로피의 변화를 그림 4 및 그림 5에 각각 나타내었다. 그림 4에서 보면, α값의 변화에 따른 최종 위상 오차 추정 성능은 상대적으로 큰 차이가 없음을 확인하였다. 엄밀히 말하면, α=1.01일 때만 나머지 α값 적용결과와 비교 시 미세한 간극이 나타나고 있으나 유의미한 차이라고 보기 어렵다. 그림 5에서 α값 변화에 따른 반복 횟수의 변화는 의미 있는 차이를 보이고 있다. α값이 다

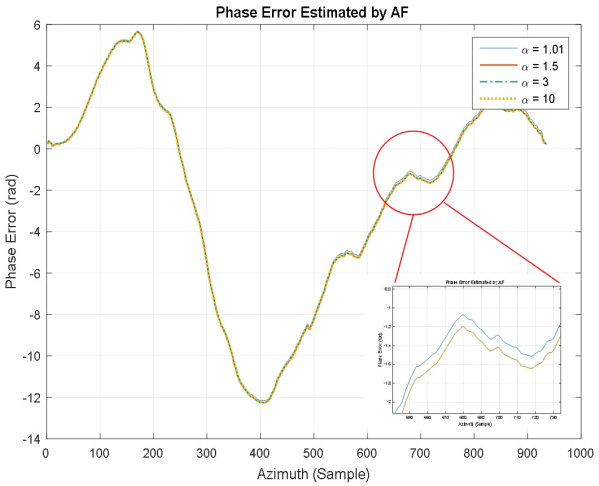


그림 4. α값 변화에 따른 위상 오차 추정 결과
Fig. 4. Estimated phase errors by changing α.

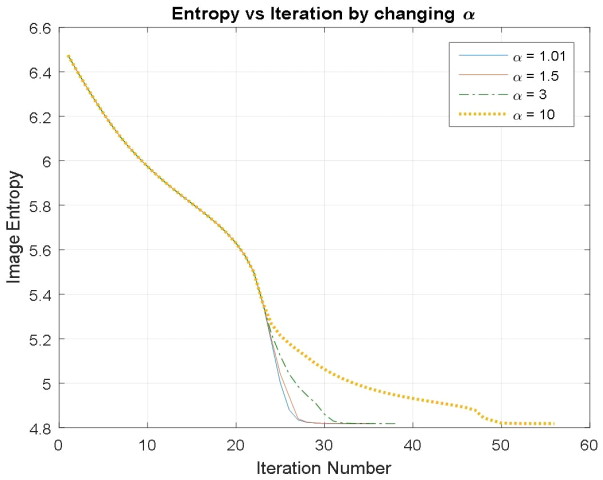


그림 5. α값 변화에 따른 반복 횟수 대 엔트로피 변화
Fig. 5. Entropy vs iteration by changing α.

른 4가지 경우에도, 반복 횟수가 22회일 때까지 동일한 결과를 보이다가, 그 이후 수렴 속도 차이가 나타나고 있다. 즉, 반복 횟수 23회 때부터, 식 (9)를 위반하는 경우가 발생하였으며, 제안한 기법에 의해 α값에 의해 $\overline{A}$ 를 조정하여 위상 오차 추정 크기를 감소시켜 추정하기 시작한다. 최종 영사의 엔트로피가 전체 최소값에 수렴할 때까지 α=1.01, 1.5일 때는 반복 횟수의 증가 없이 동일하였으나, 그 이후 α=3, 10일 때를 보면 α값이 커질수록 반복 횟수가 비례적으로 증가하고 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 위의 분석 결과를 종합해 본 논문에서는 α=1.5로 설정하고, 성능 비교 분석을 수행하도록 한다.

3-2 제안한 ME-AF 적용 결과 성능 분석

제안한 ME-AF의 성능을 객관적으로 검증하기 위해, PGA 및 기존 SU 방식의 ME-AF와 위성 오차 추정 정확도 및 SAR 영상 형성 결과를 비교 분석하기로 한다. 영상의 크기는 거리 방위 각각 1,024샘플이며, 3가지 AF 기법에 동일하게 전체 영상의 약 10 %인 100개의 거리 빈만 표적 대 클러터 대비 차에 의해 선택[4] 후 위상 오차 추정을 수행하며, 최종 위상 오차 추정 결과를 전체 영상에 보상하도록 한다. PGA의 경우, 초기 방위 표적 길이로 전체 크기인 1024부터 시작해 50 %씩 샘플 수를 감소시키며 적용하게 되며, ME-AF의 경우, 알고리즘 특성상 샘플 수

감소가 필요 없으므로, 방위 표적 길이 1024를 그대로 유지하게 된다. 오리지널 SU의 경우, 식 (9)를 위반해도 영상의 엔트로피가 지속적으로 감소한다면 반복 적용을 멈추지 않고, 엔트로피 개선 정도의 차이가 0.001보다 작거나 같아질 때까지 계속한다. 제안한 SU에서는 식 (9)를 위반할 경우, 식 (10)을 적용하게 되며, 마찬가지로 개선 정도의 차이가 0.001보다 작거나 같아질 때까지 반복 개선을 계속한다.

100개의 거리 빈에 대해서 수행한 방위 위상 추정 결과, 영상 엔트로피와 반복 횟수 관계를 그림 6 및 그림 7에 각각 나타내었다. 그림 6에서 오리지널 SU에 의한 오차는 2군데 변곡점에서 마치 위상 펼침이 제대로 되지 않은 것 같은 형태로 추정되었으며, 이상치의 개입으로 위상 펼침이 제대로 이루어질 수 없었다고 분석할 수 있다. 이와 반대로 PGA와 제안한 ME-AF에 의한 추정 결과는 매우 유사함을 쉽게 확인할 수 있다.

그림 7에서 PGA의 경우, 9번의 반복만으로 위상 오차 추정이 완료되며, 연산시간이 약 0.45s 정도로 빠르다는 장점을 확인할 수 있다. 반면, ME-AF 계열 방식은 PGA 대비 상대적으로 많은 반복 횟수를 통해 수렴하고 있으나, 연산시간이 약 0.837s 정도로 매우 빠른 반복 수행이 가능하다. 또, 제안한 방식이 오리지널 SU 방식보다 2회 더 반복 수행이 일어나지만, 최종적으로 작은 영상 엔트로피 값으로 수렴하고 있음 또한 확인할 수 있다.

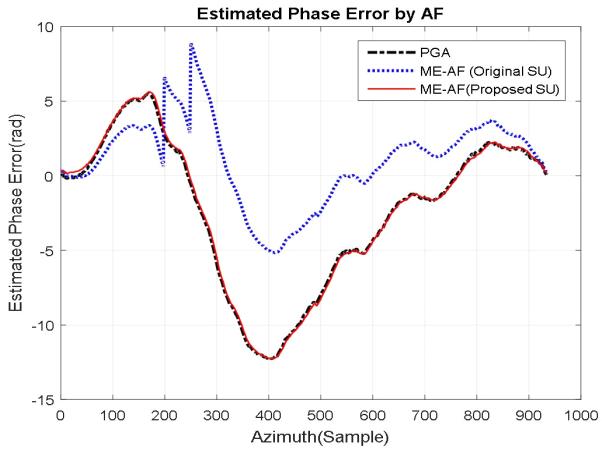


그림 6. 방위 위상 오차 추정 결과
Fig. 6. Azimuth phase error estimation results.

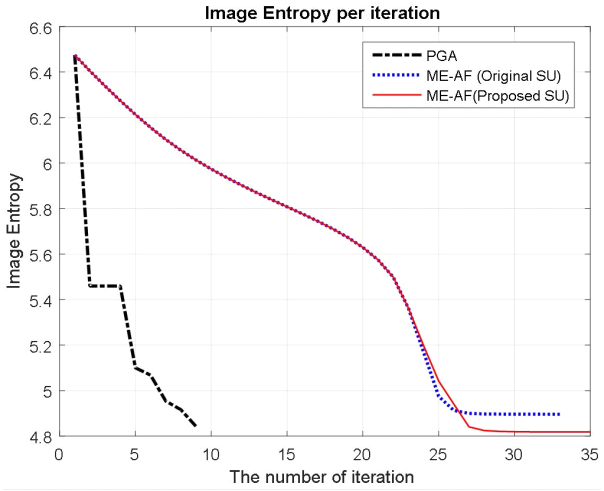
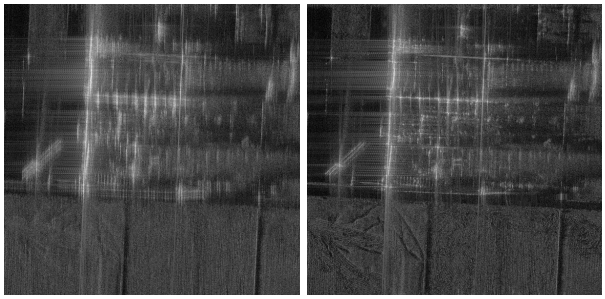


그림 7. 반복 횟수 대 엔트로피 변화 비교
Fig. 7. Entropy vs iteration comparison.

이렇게 추정한 위상 오차 성분을 전체 영상에 적용하여 보상한 결과를 그림 8에 나타내었다. AF 적용 결과, 3가지 방식 모두 해상도 측면에서 성능 개선이 가능함을 확인할 수 있으나, 오리지널 SU에 의한 그림 8(c)의 경우, 위상 오차의 불연속 지점 영향으로 밝은 표적들의 방위 부엽 성능 저하로 영상을 크게 열화시키고 있음을 볼 수 있다. 그림 8(b), 그림 8(d)의 경우, 육안으로 성능 차이를 확인하기는 어려울 만큼 유사한 성능을 보이고 있으며, 보다 정량적인 분석을 위해 AF 적용 전/후 전체 영상의 엔트로피 값 변화를 표 1에 나타내었다. 오리지널 SU 적용했을 때의 개선 정도가 가장 작음을 쉽게 확인할 수 있고, 제안한 ME-AF 방식이 오리지널 SU 결과 대비 약 0.1 이상 개선되었을 뿐만 아니라, PGA 적용 결과와 비교 시에도 개선 정도가 수치상으로는 우위에 있음을 확인할 수 있다.

즉, 오리지널 SU에 의한 위상 오차 추정치는 국소 최소 해를 만족하는 값으로 추정되었다고 볼 수 있으며, 제안한 방식은 식 (9)를 항상 만족할 수 있게 되므로 전체 최소해로 수렴했다고 볼 수 있다.

제안한 ME-AF의 성능이 오리지널 SU와 비교 시에는 영상에 나타난 결과 및 엔트로피 변화 측면에서 모두 뚜렷한 성능 개선 효과를 확인할 수 있었으나, 그림 8 영상에서 PGA와의 성능 차이를 뚜렷하게 확인하기 어려웠다.



(a) AF 적용 전 SAR 영상 (b) PGA 적용 후 SAR 영상
(a) SAR image before AF (b) SAR image after PGA

(c) 오리지널 SU 적용 후 SAR 영상 (d) 제안한 SU 적용 후 SAR 영상
(c) SAR image after original SU (d) SAR image after proposed SU

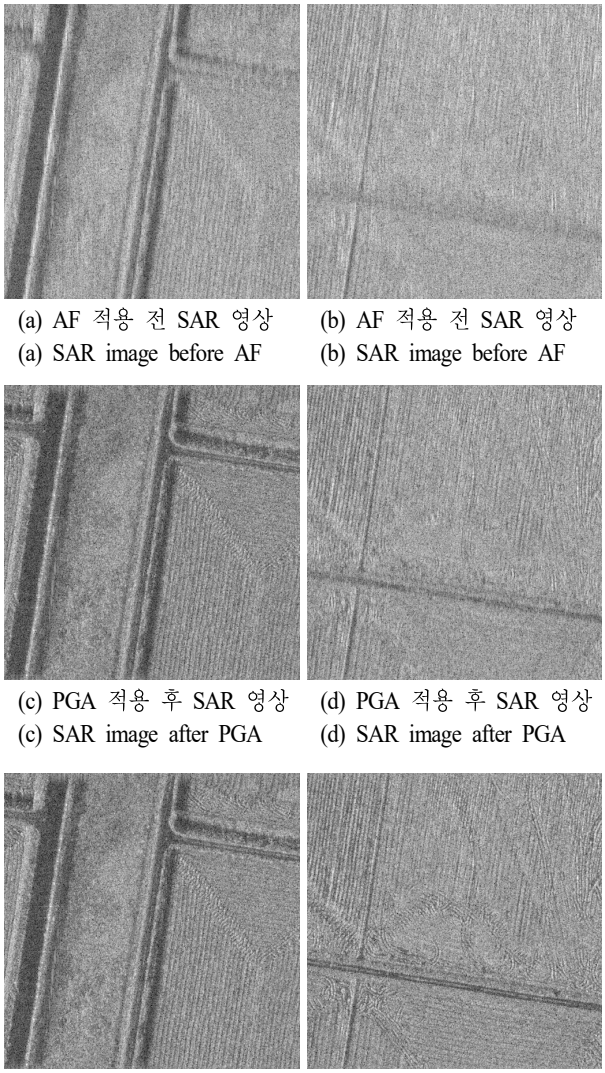
그림 8. SAR 영상형성 결과
Fig. 8. SAR image formation results.

표 1. AF 적용 전/후 전체 영상 엔트로피 변화
Table 1. Entire image entropy change before/after AF.

	Entire image entropy	
AF algorithm	Before AF	After AF
PGA	7.6368	6.7268
ME-AF(original SU)	7.6368	6.8223
ME-AF(proposed SU)	7.6368	6.7133

따라서 다른 특징을 갖는 영상 지역(512×512)에 대해서 제안한 기법과 PGA 적용 결과와의 비교 분석을 추가 수행하여, 제안한 ME-AF의 실질적 효용성과 한계를 분석하고자 한다. 그림 9 왼쪽 라인에 1) 수로와 논둑이 존재하나, AF에 유리한 표적이 없는 논밭 지역(less homogeneous), 오른쪽 라인에 2) 작은 논둑만 존재하는 완전한 논밭 지역(more homogeneous) 지역에 대해서 PGA와 제안한 ME-AF을 적용한 결과를 나타내었다. 100개의 거리 빈만을 선택하여 AF를 수행하게 되며, 관련 엔트로피 변화, 반복 횟수 및 연산 시간 등을 비교한 결과를 표 2에 나타내었다.

1), 2) 영상에서는, 식 (9)를 위반하는 경우가 발생하지 않아서, 오리지널 SU와 제안한 SU가 같아지는 경우이나,



(a) AF 적용 전 SAR 영상 (b) AF 적용 전 SAR 영상
(a) SAR image before AF (b) SAR image before AF

(c) PGA 적용 후 SAR 영상 (d) PGA 적용 후 SAR 영상
(c) SAR image after PGA (d) SAR image after PGA

(e) 제안한 SU 적용 후 SAR 영상 (f) 제안한 SU 적용 후 SAR 영상
(e) SAR image after proposed SU (f) SAR image after proposed SU

그림 9. PGA/제안기법 비교 결과(좌측 열 1, 우측 열 2)
Fig. 9. PGA/ME-AF comparison results(left col 1, right col 2).

표 2. AF 적용 전/후 성능 분석
Table 2. Performance analysis before/after AF.

AF algorithm		Less homogeneous		More homogeneous	
		Before AF	After AF	Before AF	After AF
PGA	Entropy	11.5087	11.2356	11.7551	11.6064
	Iteration	-	8	-	8
	Time(s)	-	0.238	-	0.236
ME-AF	Entropy	11.5087	11.2037	11.7551	11.4494
	Iteration	-	173	-	242
	Time(s)	-	1.443	-	1.7

100개 거리 빈만을 선택하는 방식이 ME-AF에서 성능 저하로 나타나는지에 대해서 PGA 기법과의 실증적인 비교/검증은 충분히 가능하다.

1)의 경우, 그림 8 영상보다 AF에 불리한 조건임에도 불구하고, PGA 및 ME-AF 기법에서 육안으로 차이를 식별하기 어려운 개선 결과를 그림 8의 결과와 유사하게 보여주고 있으며, 엔트로피 변화 측면에서만 제안한 기법이 약 0.03 정도 개선되었음을 보여주고 있다. 반면, 1)보다 AF에 유리한 표적이 더 없는 환경인 2)의 경우, PGA에 의해서 개선은 가능하나, ME-AF 대비 영상 측면에서 뚜렷한 개선 저하가 나타나고 있으며, 엔트로피 변화 측면에서도 약 0.157 정도 개선 정도가 저하되었음을 확인할 수 있다. 연산 반복 횟수 측면에서 PGA는 연산 반복 횟수를 8회로 일정하게 유지할 수 있는 반면, ME-AF에서는 1)보다 2)에서 반복 횟수가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 AF에 유리한 표적이 없기에 좋은 초기 값에서 시작하지 못하므로 빠르게 수렴하지 못한다고 할 수 있다. 하지만, 알고리즘 수행 시간 측정 결과를 보면, 반복 횟수의 큰 차이만큼 비례해서 수행 시간의 차이가 커지지 않고 있음을 확인할 수 있으며, 좋은 표적이 많은 지역일 경우, 반복 횟수가 크게 줄어들어 연산시간 단축이 가능하다는 점은 이미 앞선 시험 결과를 통해 확인하였다.

Ⅳ. 결 론

실제 다양한 표적 환경을 갖는 SAR 영상에서 ME-AF 방식의 강건한 적용을 위한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 기존 ME-AF를 실제 SAR 영상에 적용했을 때 발생 가능한 열화 요인을 분석하고, 이를 극복하기 위한 개선된 ME-AF을 제안하였다. 단조 감소에 의한 영상 엔트로피의 전체 최소값으로 수렴을 보장하기 위해 위상 오차 추정 크기를 조정하는 기법을 제안하였고, 오리지널 ME-AF 대비, 항상 견고한 성능을 보일 수 있음을 입증하였다. 뿐만 아니라 다양한 영상 특성을 갖는 지역에 대해서 PGA 적용 결과와의 비교 분석을 통해, AF에 유리한 표적이 없는 지역에 대해서 연산시간에 대한 비용을 일부 감수할 경우, PGA보다 우수한 결과를 보일 수 있음을 확인하였다.

References

[1] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar*, *A Signal Processing Algorithms*, Artech House, Jul. 1995.

[2] C. V. Jakowatz, D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and P. A. Thompson, *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach*, Springer Science & Business Media, 1996.

[3] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz, "Phase gradient autofocus- A robust tool for high resolution sar phase correction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 827-835, Jul. 1994.

[4] H. L. Chan, T. S. Yeo, "Non-iterative quality phase-gradient autofocus(QPGA) algorithm for spotlight SAR imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36. no. 5, pp. 1531-1539, Sep. 1998.

[5] A. F. Yegulalp, "Minimum entropy SAR autofocus," in *7th Adaptive Sensor Array Processing Workshop*, Lexington, MA, MIT Lincoln Laboratory, Mar. 1999, pp. 25-36.

[6] T. J. Kragh, A. A. Kharbouch, "Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus," in *Adaptive Sensor Array Processing(ASAP) Workshop*, Lexington, MA, MIT Lincoln Laboratory, Jun. 2006.

[7] T. Zeng, R. Wang, and F. Li, "SAR image autofocus utilizing minimum-entropy criterion," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 10. no. 6, pp. 1552-

1556, Jul. 2013.

[8] J. Wang, X. Liu, "SAR minimum-entropy autofocus using an adaptive-order polynomial model," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 512-516, Oct. 2006.

[9] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-entropy phase adjustment for ISAR," in *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, Aug. 2004, vol. 151, no. 4, pp. 203-209.

[10] R. L. Morrison, D. C. Munson, and M. N. Do, "Avoiding local minima in entropy-based SAR autofocus," *IEEE Workshop on Statistical Signal Processing*, Sep.-Oct. 2003, pp. 454-457.

[11] 배준우, 김경태, 이진호, 임정흠, "엔트로피 기반의 ISAR 자동 초점 기법에 대한 성능 분석," 한국전자파학회논문지, 17(12), pp. 1249-1258, 2006년 12월.

[12] 신현익, 권경일, 윤상호, 김형석, 황정훈, 고영창 외, "실시간 영상형성 및 원시데이터 획득용 SAR 테스트베드," 한국군사과학기술학회지, 20(2), pp. 181-186, 2017년 4월.

[13] 황정훈, 김환우, "스퀸트 모드 SAR 영상 형성을 위한 역투영 알고리즘에서의 자동초점 기법 적용 연구," 전자공학회논문지, 54(7), pp. 81-89, 2017년 7월.

황 정 훈

2003년 2월: 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
2005년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2005년～현재: 국방과학연구소 선임연구원
2015년～현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 체계 설계

신 현 익

1986년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2004년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
1988년～현재: 국방과학연구소 수석연구원
[주 관심분야] 레이다/SAR/GMTI 체계설계/신호처리

김 환 우

1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1979년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1988년 6월: University of Utah 전자공학과 (공학박사)
1980년～현재: 충남대학교 전자공학과 정교수
[주 관심분야] 레이다/SAR 신호처리, 디지털 통신 및 신호처리