

# Rényi 엔트로피 최소화를 이용한 ISAR 요동 보상

## ISAR Autofocus Using Rényi Entropy Minimization

강 민 석

Min-Seok Kang

### 요 약

역합성 개구면 레이더(ISAR, inverse synthetic aperture radar) 영상은 표적으로부터 반사되어 돌아온 레이더 단면적 데이터들을 코히런트하게 신호처리 하여 형성한 표적의 2차원 영상이다. ISAR 영상 형성 시 표적의 운동 성분으로 인해 Doppler 방향으로 위상 오차 보정은 필수적이다. 본 논문에서는 ISAR 영상의 Rényi 엔트로피 최소화를 통한 위상 보정 기법(MRPA, minimum Rényi entropy phase adjustment)을 소개한다. 보정할 위상 오차 성분에 대한 Rényi 엔트로피의 미분 연산 및 고정점 반복법(fixed-point iteration)을 통해 위상 오차를 추정하여 고화질의 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성한다. 또한, Rényi entropy의 종속 변수  $\alpha$ 에 대하여 영상의 화질 평가 지표인 엔트로피 기반 분석을 통해 최적의  $\alpha$ 값을 찾는다. 실험에서는 위상 오차가 반영된 점산란원 모델의 ISAR 신호에 대해 다양한 실험을 수행하여 제안한 위상보정 기법의 우수성을 입증한다.

### Abstract

Inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging generates two-dimensional target images by coherently processing radar cross-section data reflected from the target. During ISAR image formation, phase error correction in the Doppler direction is critical due to target motion. This paper presents a phase correction method based on the minimization of Rényi entropy, referred to as minimum Rényi entropy phase adjustment. The proposed approach estimates phase errors by differentiating Rényi entropy with respect to the phase error component and applying a fixed-point iteration scheme, producing high-resolution, well-focused ISAR images. Furthermore, the effect of the order parameter  $\alpha$  in Rényi entropy is investigated by analyzing entropy as an image quality metric to determine its optimal value. The effectiveness of the proposed method is demonstrated using simulated ISAR signals from point scatterer models corrupted with phase errors.

Key words: Autofocus, ISAR, Rényi Entropy, Phase Adjustment

### I. 서 론

역합성 개구면 레이더(SAR, inverse synthetic aperture

radar) 영상은 레이더가 고정된 상태에서 움직이는 표적에 대해 전자기파를 방사할 때, 표적으로부터 반사되어 돌아온 데이터들을 적절히 신호처리 하여 형성한 표적의 2차

「이 논문은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021R111A3043152).」

국립공주대학교 전기전자제어공학부(Division of Electrical, Electronic & Control Engineering, Kongju National University)

· Manuscript received August 20, 2025 ; Revised August 27, 2025 ; Accepted September 10, 2025. (ID No. 20250820-084)

· Corresponding Author: Min-Seok Kang (e-mail: mskang@kongju.ac.kr)

원 영상이다<sup>[11-14]</sup>. 기존의 광학 영상과 달리 레이더 영상은 주야에 관계없이 관측이 가능하고 날씨 상태에 영향을 받지 않는다는 장점이 있다<sup>[5]-[12]</sup>. ISAR 영상은 군용 목적으로 개발되었고 현재도 국방 분야에 많은 비중을 차지하고 있으며 점차 민수 분야로도 영역을 확장하고 있다. 이러한 ISAR 영상은 표적의 회전운동 성분이 존재한다는 가정하에 표적의 수평 방향인 거리(range)와 수직 방향의 도플러(Doppler)에 대한 정보로부터 형성된다<sup>[13]-[15]</sup>. 거리에 대한 정보는 레이더의 가시선(LOS, line of sight) 방향에 위치하는 표적으로부터 반사된 전자기파를 수신한 뒤, 수신신호의 위상 성분으로부터 획득된다. 이렇게 생성된 표적에 대한 1차원 거리의 정보를 HRRP(high resolution range profile)라 한다. 도플러에 대한 정보는 순차적으로 형성된 HRRP에 대해 표적의 회전 성분으로 야기되는 도플러 효과를 이용하여 획득할 수 있다. 하지만 실제 표적의 운동 궤적은 회전운동 성분뿐만 아니라 병진운동 성분을 포함하고 있기 때문에 표적으로부터 수신된 데이터를 신호처리 하는 과정에서 ISAR 영상의 초점이 흐려지게 된다<sup>[16]-[20]</sup>. 따라서 회전운동 성분만의 ISAR 영상을 형성하기 위해서는 표적의 병진운동 성분을 보상해야 하며 최근에는 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 일반적으로 병진운동을 보상하기 위한 기법은 거리정렬 방법<sup>[21]</sup>과 위상보정 방법으로 나뉘어 처리된다. 거리정렬 방법은 HRRP 간의 거리 지연(range delay) 보상을 수행하고 위상보정 방법은 수직 방향의 시간 변화 도플러(time-varying Doppler) 성분을 보상한다. 최근에는 ISAR 영상의 품질 지표를 기반으로 위상 오차를 보상하는 자동초점 기법이 제시되었다<sup>[17]-[18]</sup>. 해당 기법은 위상 오차에 대한 전역 최적화를 통해 ISAR 영상의 품질 지표 값을 최소화하여 고품질의 ISAR 영상을 획득한다. 하지만 전역 최적화를 수행하는 경우 데이터의 크기에 따라 연산량이 기하급수적으로 증가하여 매우 비효율적이라는 단점이 있다.

본 논문에서는 ISAR 영상의 Rényi 엔트로피 최적화(MRPA, minimum Rényi entropy phase adjustment)를 이용한 ISAR 영상의 위상보정을 효율적으로 수행한다. 보정할 위상 오차 성분에 대한 Rényi 엔트로피의 미분 연산을 수행하고 설계한 비용함수를 고정점 반복법(FPI, fixed-point iteration)을 통해 고화질의 초점이 맞는 ISAR 영상

을 효과적으로 형성한다. 본문에서는 제안한 기법을 엄밀한 수식 전개를 통해 이론적으로 고찰하고, 기존 ISAR 자동 초점 기법과의 성능 분석 결과를 제시함으로써 그 우수성을 입증하였다. 또한 가우시안 잡음을 삽입하여 다양한 신호 대 잡음비(SNR, signal-to-noise-ratio) 환경을 구축한 실험을 통해 MRPA 기법의 자동초점 성능이 잡음에 강인함을 확인하였다.

## II. 본 론

### 2-1 수신 신호를 통한 ISAR 영상 형성

ISAR 영상은 레이더가 고정된 상태에서 움직이는 표적의 궤도를 따라 전자기파를 송수신하여 형성된 영상이다. 이 과정을 수식적으로 살펴보기 위해 표적의 운동궤적을 모형화해보면 다음과 같다.

그림 1은  $U-V$ 좌표계의 원점에 위치한 레이더로부터 표적  $P$ 가 시간  $t$ 에 따라 운동하는 모습을 기하학적으로 나타낸 것이다.  $R_p(t)$ 는 레이더와 표적 사이의 거리를 나타내며 식 (1)과 같이 정리된다<sup>[19]</sup>.

$$R_p(t) = R(t) + x\cos[\theta(t)] - y\sin[\theta(t)] \tag{1}$$

식 (1)에서  $x$ 와  $y$ 는  $x-y$  좌표계에서 표적  $P$ 의 좌표를 나타낸다. 식 (1)을 살펴보면 표적에 포함된 두 가지 운동성분이 확인된다. 첫 번째 운동성분은  $U-V$  좌표계에 대하여 시간  $t$ 가 진행될 때 표적  $P$ 가 위치한  $x-y$

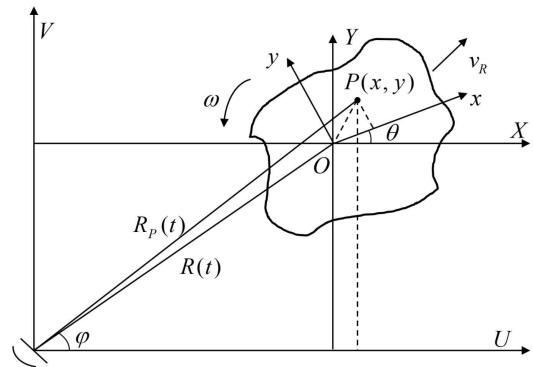


그림 1. 표적의 운동에 대한 기하학적 도시  
Fig. 1. Geometry of a target motion.

좌표계 전체가  $R(t)$ 의 거리만큼 이동하는 병진운동 성분이 존재한다. 두 번째 운동성분은  $x-y$  좌표계 내에서 표적  $P$ 가 시간  $t$ 에 따라  $\theta(t)$ 의 회전운동 성분을 가지게 된다.  $\theta(t)$ 는  $\omega t$ 이며 이 때  $\omega$ 는 각속도이다. 여기서  $\theta(t)$ 가 매우 작은 값을 갖게 된다면 식 (2)와 같은 근사화가 성립한다<sup>[20]</sup>.

$$R_p(t) \cong R(0) + v_R t + \frac{1}{2} a_R t^2 + x - y \omega t \quad (2)$$

식 (2)는 식 (1)의 근사식이며, 표적의 초기 위치를  $R(0)$ 로 설정하고 레이더 LOS 방향의 속도를  $v_R$ , 가속도를  $a_R$ 로 나타낸 식이다. 식 (3)은 표적으로부터 수신된 신호 모델이다<sup>[19]</sup>.

$$E^s(f, t_m) = \sum_{i=1}^N A_i \text{rect} \left[ \frac{f - f_c}{B} \right] \times \text{rect} \left[ \frac{t_m}{T_{obs}} \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi f}{c} R_p(t) \right] \quad (3)$$

식 (3)에서  $\text{rect}$ 는 사각함수,  $A_i$ 는  $i$ 번째 산란점의 크기,  $c$ 는 빛의 속도,  $B$ 는 대역폭,  $f_c$ 는 중심주파수,  $t_m$ 은 느린시간(slow-time),  $N$ 은 산란점의 개수,  $T_{obs}$ 는 표적 관찰 시간을 각각 나타낸다. 식 (3)을 주파수 방향으로 푸리에 변환하면 거리 압축 데이터가 형성되며 이에 거리정렬 과정을 적용하면  $R_p(t)$ 에 포함된  $v_R$ 와  $a_R$ 를 제거할 수 있다. 이 때 신호 모델은 식 (4)와 같다<sup>[19]</sup>.

$$FT[E^s(f, t_m)] = B \sum_{i=1}^N A_i \text{sinc} \left[ \frac{2B}{c} (r - R(0) - x_i) \right] \times \text{rect} \left[ \frac{t_m}{T_{obs}} \right] e^{-j \frac{4\pi f_c}{c} [R(0) + v_{RO} t_m + \frac{1}{2} a_{RO} t_m^2 + x_i - y \omega t_m]} \quad (4)$$

식 (4)에서  $FT$ 는 푸리에 변환 연산을,  $\text{sinc}$ 는  $\text{sinc}$  함수를 나타낸다.  $A_i$ 는 식 (4)는 거리(range) 축에서  $\text{sinc}$  함수의 위치가 시간에 따라 변하지 않는 거리 정렬된 형태를 보이지만, 위상 성분에 포함된  $v_{RO}$ 와  $a_{RO}$ 가 시간  $t_m$ 에 관계되기 때문에  $y \omega t_m$  항에 영향을 주게 된다. 결국 Doppler 주파수와 느린시간 사이의 푸리에 변환 관계에 영향을 주는 요소로 인해 수직 방향의 푸리에 변환을 수

행하면 초점이 맞지 않는 ISAR 영상이 형성된다. 따라서 거리 압축 데이터의 위상성분에서  $y \omega t_m$  항을 제외한 시간에 따라 변화하는 항을 효과적으로 제거할 수 있는 위상보정 과정 혹은 요동 보상 과정이 요구된다.

## 2-2 Rényi 엔트로피를 이용한 ISAR 영상 위상 보정

Shannon 엔트로피(SE, Shannon entropy)는 확률 분포의 불확실성을 정량화하는 가장 보편적인 척도로 널리 활용되어 왔다. 그러나 SE는 단일한 기준에 의해 정의되므로, 분포의 다양한 특성을 충분히 반영하기에는 한계가 있다. 이에 반해 Rényi 엔트로피는 차수  $\alpha$ 라는 매개변수를 도입함으로써, 분포의 여러 측면을 유연하게 강조할 수 있다는 장점을 가진다. Rényi 엔트로피는  $\alpha$ 값에 따라 희귀 사건이나 우세한 사건에 대한 민감도를 조절할 수 있다. 예를 들어,  $\alpha$ 가 큰 경우에는 확률이 높은 사건의 영향이 강조되어 분포의 집중도를 평가하는 데 유용하며,  $\alpha$ 가 작은 경우에는 낮은 확률을 갖는 사건들의 기여도가 상대적으로 커져 분포의 다양성을 반영할 수 있다. 이러한 특성은 SE가 모든 사건을 동일한 기준으로 처리하는 것과 차별화되는 중요한 특징이다.

2-2장에서는 Rényi 엔트로피를 이용한 ISAR 영상의 위상 보정 과정을 수식적으로 살펴보고자 한다. ISAR 영상을 이산 데이터 형식으로 정리하면 식 (5)와 같다<sup>[14]</sup>.

$$g(k, n) = \sum_{m=0}^{M-1} f(m, n) \exp[j\phi(m)] \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} km\right) \quad (5)$$

식 (5)에서  $m$ 은 느린시간,  $n$ 은 거리빈(range bin),  $k$ 는 Doppler 주파수를 각각 나타낸다.  $\phi(m)$ 은 식 (4)에서 표현된 시간에 따라 변화하는 위상 오차 성분을 의미한다.  $f(m, n)$ 은 식 (4)를 의미하며  $g(k, n)$ 은 위상 보정된  $f(m, n)$ 의 푸리에 변환식으로 ISAR 영상을 나타낸다.

Rényi 엔트로피는 식 (6)과 같이 정의된다<sup>[18]</sup>.

$$R_\alpha = \frac{1}{1-\alpha} \ln \left[ \sum_{i=1}^N (p_i)^\alpha \right] \quad (6)$$

식 (6)에서  $p_i$ 는 확률밀도함수를 나타내며  $\alpha$ 는 Rényi 엔트로피의 변수로 표현된다. ISAR 영상을 정규화하여

영상 전체를 확률밀도함수로 바라볼 때 Rényi 엔트로피는 식 (7)과 같다.

$$R\{|g(k,n)|^2\} = \frac{1}{1-\alpha} \ln \left\{ \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \frac{|g(k,n)|^2}{S} \right]^\alpha \right\} \quad (7)$$

$$S = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |g(k,n)|^2 \quad (8)$$

식 (7)의 값을 최소로 만드는  $\phi(m)$ 을 찾으려면 식 (9)를 만족해야 한다.

$$\frac{\partial R\{|g(k,n)|^2\}}{\partial \phi(m)} = 0 \quad (9)$$

식 (7)을 미분하여 정리하면 식 (10)과 같이  $\phi(m)$ 와  $a(m)$ 의 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial R\{|g(k,n)|^2\}}{\partial \phi(m)} = 2M \text{Im} \{ \exp[j\phi(m)] a^*(m) \} \quad (10)$$

$$a(m) = \sum_{n=0}^{N-1} f^*(m,n) \frac{1}{M} \frac{1}{\sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[ \frac{|g(k,n)|^2}{S} \right]^\alpha} \times \sum_{k=0}^{M-1} \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{[|g(k,n)|^2]^{\alpha-1}}{S^\alpha} g(k,n) \exp\left(j \frac{2\pi}{M} km\right) \quad (11)$$

식 (9)와 식 (11)로부터 위상 오차 성분  $\angle a(m)$ 은 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$\phi(m) = \angle a(m) \quad (12)$$

### 2.3 고정점 반복법 및 Rényi 엔트로피의 $\alpha$ 변수에 대한 ISAR 영상 분석

2.2장에서는 Rényi 엔트로피를 이용한 ISAR 영상의 위상 보정 과정으로부터 위상 오차 성분을 식 (12)의 형태로 도출하였다. 식 (11)을 살펴보면 식 (12)가  $g(k, n)$ 에 포함된 항임을 확인할 수 있다. 따라서 식 (11)은 그림 2와 같이 고정점 반복법(FPI, fixed-point iteration)을 이용하여 해결 가능하다. 반복 알고리즘을 탈출하기 위한 조건은 식 (13)과 같이 설정할 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$\max_{i=1}^{M-1} \{ |\exp[j\phi_i(m)] - \exp[j\phi_{i-1}(m)]| \} \leq \mu \quad (13)$$

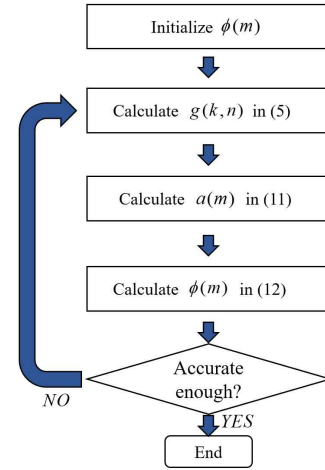


그림 2. 제안된 위상 보정 알고리즘  
Fig. 2. Flow chart of the proposed algorithm.

식 (13)에서 max는 최댓값 추출 연산자이고,  $\phi_i(m)$ 는  $i$ 번째 반복을 진행했을 때 구한 위상 오차 성분이며,  $\mu$ 는 문턱 값으로서 이전 위상 오차 성분과 현재 위상 오차 성분의 차이와 비교를 통해 반복 알고리즘을 탈출한다. 본 논문에서  $\mu$ 는 0.01로 설정하였다.

한편, 식 (6)으로부터 Rényi 엔트로피와 변수  $\alpha$ 는 종속 관계가 있음을 알 수 있다.  $\alpha$ 값이 1에 수렴할 때 Rényi 엔트로피는 SE로 표현된다.  $\alpha$ 값이 2에 수렴하는 경우 Rényi 엔트로피는 충돌 엔트로피(collision entropy)와 같아진다. 결국 Rényi 엔트로피는 엔트로피의 일반적인 형태로 간주할 수 있다. 따라서 ISAR 영상의 Rényi 엔트로피 위상 보정 과정은  $\alpha$ 값의 변화에 영향을 받는다. Rényi 엔트로피의 최적의  $\alpha$ 를 찾기 위해 ISAR 영상에 대한 SE 값을 비용함수로 설정하여 전역 최적화를 수행하였다. SE의 경우 값이 작을수록 무질서도가 감소하며 초점이 맞는 ISAR 영상을 보이기 때문에  $\alpha$ 의 변화에 따라 비용함수가 최소가 되는  $\alpha$ 값을 통해 Rényi 엔트로피를 최적화할 수 있다. 임의의 기동 표적에 대한 서로 다른 시나리오 10개를 설정하고  $\alpha$ 값에 따른 각 ISAR 영상의 SE를 측정하고 평균을 계산하였다. 각 시나리오마다 특정  $\alpha$ 의 위치에서 SE가 최적화되었고 비용함수가 최소가 되는  $\alpha$ 의 값은 1.5 부근으로 확인되었다. 따라서 본 논문에서는 Rényi 엔트로피의  $\alpha$ 값을 1.5로 설정하여 모든 실험을 수행하였다.

### III. 실험 결과

실험에서는 MRPA 기법이 다양한 실험 환경에서 우수한 자동초점 성능을 보임을 확인한다.

#### 3-1 기존 기법과 제안한 기법의 성능 비교 분석

본 실험에서는 제안한 알고리즘의 성능을 분석하기 위해서 88개의 산란점으로 구성된 보잉(Boeing)-747 모델 (그림 3(a))을 표적을 기반으로 기동 시나리오에 대한 ISAR 신호를 구성하였다. ISAR 영상은 좁은 대역폭 및 좁은 관측각도 조건하에서 고속-푸리에 변환(FFT, fast Fourier transform)을 기반으로 형성하였으며 시뮬레이션은 MATLAB 프로그램을 이용하였다. 실험에서의 모든 계산은 AMD Ryzen 9 5900X(12-Core, 3.70 GHz) CPU 환경에서 MATLAB R2021a를 이용하여 수행하였다. 표적의 움직임에 따른 병진운동 성분이 위상 오차에 반영되어 해당 ISAR 신호에 대해 Doppler 방향으로 FFT하면 그림 3(b)와 같이 초점이 맞지 않는 ISAR 영상이 생성된다.

제안한 기법의 성능을 비교 분석하기 위해서 기존에 널리 알려진 ISAR 자동초점 기법인 엔트로피 최소화 기반 ISAR 위상 오차 보상 알고리즘(AREM, ISAR auto-focusing based on Rényi entropy minimization)을 선정하였다<sup>5)</sup>. 위상 오차가 존재하는 ISAR 신호에 대해 AREM를 통해 획득한 ISAR 영상은 그림 4(a)와 같다. 그림 3(b)에 비해서는 열화가 많이 개선되었지만 여전히 잔존하는 위상 오차로 인해 초점이 잘 맞지 않는 것을 확인할 수 있다. 한편, 동일한 ISAR 신호에 MRPA를 적용하여 복원된

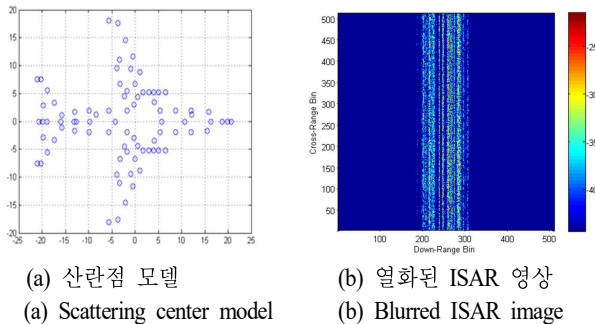


그림 3. 보잉-747 모델과 ISAR 영상  
Fig. 3. A model of Boeing-747 aircraft and its ISAR image.

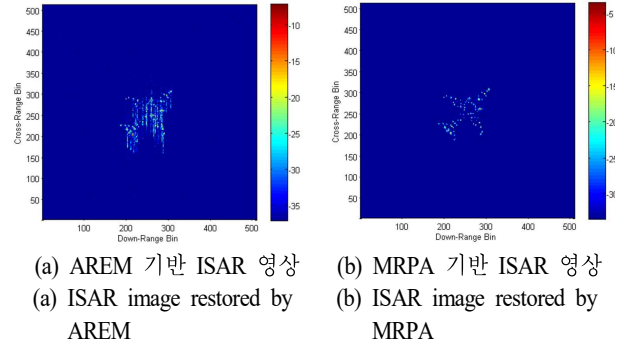


그림 4. AREM과 MRPA 기법을 통해 복원된 ISAR 영상  
Fig. 4. ISAR images obtained by AREM and MRPA.

ISAR 영상은 그림 4(b)와 같다. MRPA를 통해 각 산란점들의 에너지가 분산되지 않고 초점이 잘 맞는 ISAR 영상을 형성하였음을 확인할 수 있다. 각 자동초점 기법을 통해 획득한 ISAR 영상을 정량적으로 분석하기 위해 영상 품질 지표로서 SE를 측정하였다. AREM과 MRPA를 통해 형성된 각 ISAR 영상의 SE는 7.5 및 6.9로 계산되었다. 정량 지표 결과를 통해 MRPA 기법이 기존 AREM 보다 자동초점 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

#### 3-2 잡음 환경에서의 MRPA 성능 분석

본 실험에서는 다양한 SNR 실험 환경에서 MRPA의 자동 초점 성능을 분석하였다. 먼저, 그림 3(a)의 동일한 보잉-747 모델에 대하여 위상 오차가 존재하지 않는 이상적인 환경에서 ISAR 영상(그림 5(a))을 획득하였다. 이후 위상 오차 성분을 구축하기 위해 Doppler 방향으로  $[-\pi, \pi]$  범위 내에서 랜덤하게 위상을 형성하였다. 생성 오차 성분을 그림 5(a)의 원본 데이터의 위상 신호에 삽입하고 Doppler 방향으로 FFT하면 초점이 맞지 않는 ISAR 영상이 생성된다. 위상 오차가 반영된 ISAR 신호에 대해 잡음 환경을 구축하기 위해 가우시안 잡음을 추가하였다. 구체적으로, SNR이 -5, 0, 5 dB인 가우시안 잡음을 주파수 영역의 ISAR 신호에 각각 삽입하였으며, 각 ISAR 신호에 대해 MRPA 기법을 적용한 결과를 그림 5에 도시하였다. 그림 5(b)는 SNR이 5 dB이며 그림 5(a)의 원본 영상과 매우 유사함을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 SNR이 0 dB이며 표적 주변으로 잡음이 발생하지만 산란점은 초점이

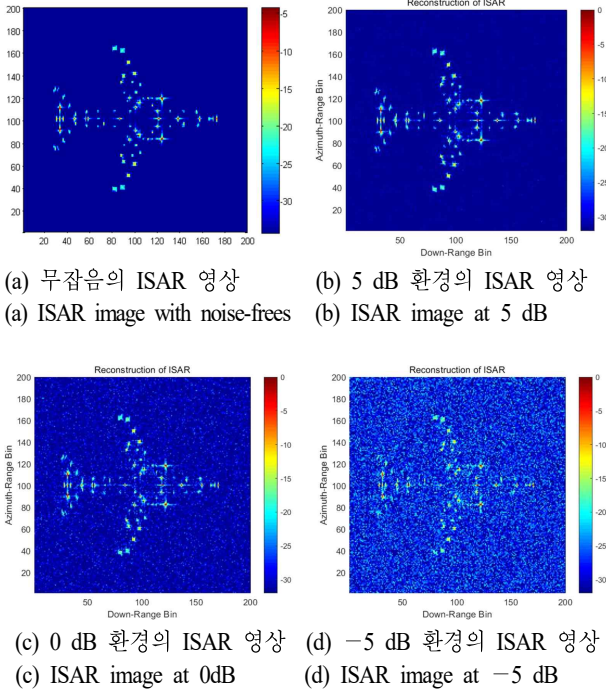


그림 5. 다양한 잡음 환경에서 복원된 ISAR 영상  
Fig. 5. ISAR images obtained by MRPA various SNR.

잘 맞는 것을 관측할 수 있다. 그림 5(d)는 SNR이  $-5$  dB의 열악한 잡음 환경에서 복원된 ISAR 영상을 나타낸다. 각 SNR 환경에서 MRPA 기법을 통해 형성된 ISAR 영상들의 SE는 7.2, 8.5 및 9.5로 계산되었다. 실험 결과를 통해 MRPA 기법은 잡음에 강인함을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 ISAR 영상의 Rényi 엔트로피를 최소화하는 위상 보정 기법을 제안하였다. ISAR의 수학적 모델링을 통해 위상 오차 성분을 수식화하고 이를 보정하기 위해 Rényi 엔트로피를 이용한 최적화 알고리즘을 고안하였다. Rényi 엔트로피의 미분 연산에 FPI를 적용하여 위상 오차 값을 추정하였다. 기존에 제시된 자동초점 기법과의 위상 오차 보정 성능을 비교하였을 때 정량적인 지표에서 MRPA 기법이 더 우수함을 확인하였다. 또한, 다양한 잡음 환경에서도 고품질의 ISAR 영상을 획득하며 잡음에 강한 성능을 보였다. 제안한 MRPA 기법은 안정

적으로 빠르게 수렴하므로 ISAR 신호처리의 근실시간 연산이 가능하다.

#### References

- [1] M. S. Kang, J. H. Bae, B. S. Kang, and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling using iterative processing via principal component analysis and bisection algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 15, pp. 3909-3918, Aug. 2016.
- [2] M. S. Kang, S. J. Lee, S. H. Lee, and K. T. Kim, "ISAR imaging of high-speed maneuvering target using gapped stepped-frequency waveform and compressive sensing," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 26, no. 10, pp. 5043-5056, Oct. 2017.
- [3] M. S. Kang, S. H. Lee, K. T. Kim, and J. H. Bae, "Bistatic ISAR imaging and scaling of highly maneuvering target with complex motion via compressive sensing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 6, pp. 2809-2826, Dec. 2018.
- [4] M. S. Kang, B. S. Kang, S. H. Lee, and K. T. Kim, "Bistatic-ISAR distortion correction and range and cross-range scaling," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 16, pp. 5068-5078, Aug. 2017.
- [5] M. S. Kang, J. M. Baek, "Compressive sensing-based Omega-K algorithm for SAR focusing," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 22, p. 4003405, Jan. 2025.
- [6] M. S. Kang, J. M. Baek, "SAR image reconstruction via incremental imaging with compressive sensing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 4, pp. 4450-4463, Aug. 2023.
- [7] M. S. Kang, J. M. Baek, "Efficient SAR imaging integrated with autofocus via compressive sensing," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, p. 4514905, Oct. 2022.
- [8] M. S. Kang, K. T. Kim, "Automatic SAR image registration via tsallis entropy and iterative search process," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 14, pp. 7711-7720, Jul. 2020.
- [9] M. S. Kang, K. T. Kim, "Ground moving target imaging based on compressive sensing framework with single-

- channel SAR," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 1238-1250, Feb. 2020.
- [10] M. S. Kang, K. T. Kim, "Compressive sensing based SAR imaging and autofocus using improved Tikhonov regularization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 14, pp. 5529-5540, Jul. 2019.
- [11] M. S. Kang, J. M. Baek, "Effective denoising of InSAR phase images via compressive sensing," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 17, pp. 17772-17779, May 2024.
- [12] M. S. Kang, Y. J. Won, B. G. Lim, and K. T. Kim, "Efficient synthesis of antenna pattern using improved PSO for spaceborne SAR performance and imaging in presence of element failure," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 16, pp. 6576-6587, Aug. 2018.
- [13] M. S. Kang, K. T. Kim, "ISAR imaging and cross-range scaling of high-speed maneuvering target with complex motion via compressive sensing," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 12, no. 3, pp. 301-311, Mar. 2018.
- [14] M. S. Kang, J. H. Bae, S. H. Lee, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus via minimization of Tsallis entropy," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 6, pp. 2950-2960, Dec. 2016.
- [15] M. S. Kang, J. M. Baek, "Robust ISAR autofocus for non-uniformly rotating target," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 61, no. 4, pp. 8972-8983, Aug. 2025.
- [16] M. S. Kang, "Robust ISAR autofocus via newton-based tsallis entropy minimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 22, p. 3505905, Aug. 2025.
- [17] L. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-entropy phase adjustment for ISAR," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation Issues*, vol. 151, no. 4, pp. 203-209, Aug. 2004.
- [18] J. M. Munoz-Ferreras, F. Perez-Martnez, and M. Datcu, "Generalisation of inverse synthetic aperture radar autofocusing methods based on the minimization of the Renyi entropy," *IET Radar Sonar and Navigation*, vol. 4, no. 4, pp. 586-594, Aug. 2010.
- [19] C. Ozdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*, New York, NY, John Wiley & Sons, 2012.
- [20] V. C. Chen, H. Ling, *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*, Norwood, MA, Artech House, 2002.
- [21] D. Zhu, L. Wang, and Y. Yu, "Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 204-208, Apr. 2009.

강 민 석 [국립공주대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7021-6873>



2013년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2015년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2019년 3월~2020년 8월: 국방과학연구소

선임연구원

2020년 9월~2024년 8월: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 조교수

2024년 9월~현재: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 부교수  
[주 관심분야] 레이더 신호 및 영상처리, 레이더 영상 활용, 배열 안테나 합성 및 빔 패턴 최적화, 최적화 이론 및 압축센싱 응용, 딥러닝