

ISAR 영상 형성을 위한 회전운동보상 기법 연구

A Study on the Rotational Motion Compensation Method for ISAR Imaging

강병수 · 배지훈 · 정성은 · 김찬홍* · 김경태

Byung-Soo Kang · Ji-Hoon Bae · Sung-Eun Chung · Chan-Hong Kim* · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문에서는 표적의 관측각도 변화율이 일정하지 않은 표적의 회전운동 성분의 결과로 인한, 역합성 개구면 레이더(Inverse Synthetic Aperture Radar: ISAR) 영상의 초점 저하 현상을 해결하는 회전운동보상(Rotational Motion Compensation: RMC) 기법을 제안한다. 먼저, 하나의 산란원이 존재하는 레인지 빈(range bin)을 선택한다. 다음으로, 푸리에 변환(Fourier Transform: FT)과 다항식-위상 변환(Polynomial-Phase Transform: PPT)를 활용하여, 선택된 레인지 빈에 대한 위상함수를 추정한다. 마지막으로, 관측 각도의 변화율을 일정하게 하는 새로운 시간 변수를 정의한 후, 보간법(interpolation)을 통해 새롭게 정의된 시간변수에 대한 레이더 신호를 획득한다. 이에 대한 결과로, 관측 각도의 변화율을 일정하지 않게 하는 표적의 회전운동 성분을 제거함으로써, 초점이 맞는 ISAR 영상을 획득할 수 있다. 전함(battleship) 모델을 사용한 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안된 RMC 기법의 효용성을 검증하였다.

Abstract

In this paper, we propose a inverse synthetic aperture radar(ISAR) rotational motion compensation(RMC) method to remove residual blurring caused by non-uniform rotational motion of a target. First, a range bin having an isolated scatterer is selected. Next, polynomial phase signal in the selected range bin is estimated by using both Fourier transform(FT) and polynomial-phase transform(PPT). Finally, a new slow time variable that uniformly samples radar signal along the aspect angle directions is defined by using the estimated phase signal, and we interpolate radar signal in terms of the new time variable. As a result, rotational motion to blurr ISAR images is removed, and focused ISAR images are obtained. Simulation results using battleship model validate the robustness and effectiveness of our proposed RMC method.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) Image, Rotational Motion Compensation(RMC)

I. 서 론

역합성 개구면 레이더(Inverse Synthetic Aperture Radar: ISAR) 영상 시스템은 고정된 레이더가 광대역 신호를 이용하여 기동하는 표적에 대한 레이더 영상을 제공하는

시스템이다. 상기 ISAR 영상 시스템은 주야 및 날씨에 관계없이 표적에 대한 레이더 영상을 제공하기 때문에, automatic target recognition(ATR) 및 non-cooperative target recognition(NCTR)을 통한 표적의 피아 식별을 보다 더 효율적으로 수행할 수 있게 한다.

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 레이더/IR 표적식별 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

포항공과대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received 2015 October 7, 2015 ; Revised December 24, 2015 ; Accepted December 24, 2015. (ID No. 20151007-072)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

ISAR 영상 형성 시스템 내 기동하는 표적의 움직임 성분은 1) 병진운동(translational motion) 성분과 2) 회전운동(rotational motion) 성분으로 나뉜다. 여기서, 병진운동과 회전운동은 레이더 가시선(Radar Line Of Sight: RLOS) 방향으로의 움직임 성분, 그리고 레이더 관측각도의 변화에 기인하는 표적의 회전성분으로써 각각 정의된다. 여기서, 상기 두 운동성분 중 ISAR 영상 형성을 위해 필요한 표적의 운동성분은 관측각도의 변화율이 일정한 회전운동 성분이다.

일반적으로 대공표적의 경우, 짧은 레이더 관측 시간(Coherent Processing Interval: CPI) 내에서는 관측각도의 변화율이 일정하다. 이는 기동하는 표적의 병진운동 성분을 제거하는 거리 정렬(range alignment) 및 자동초점기법(autofocus)을 수행한 후, 거리-도플러(range-Doppler) 기법을 통해 초점이 맞는 대공표적 ISAR 영상 형성이 가능하다는 것을 의미한다. 그러나 해상표적의 경우, 표적은 파도에 의해 롤-피치-요우(roll-pitch-yaw) 성분을 포함하는 심한 자가-회전운동(self-rotational motion)을 겪게 되고, 이에 대한 결과로 레이더 관측각도의 변화율이 일정하지 않게 된다. 상기 일정하지 않은 관측각도의 변화율은 ISAR 영상 내 도플러 방향으로의 초점을 흐리게 하는 원인이 되기 때문에, 해상표적에 대한 ISAR 영상을 형성하기 위해서는 표적의 회전운동 문제를 해결하는 회전운동보상(Rotational Motion Compensation: RMC)이 수행되어야 한다^{[4]~[7]}.

최근, 해상표적에 대한 고품질 ISAR 영상을 형성하기 위한 RMC 기법 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 이는 크게 두 가지 방법으로 분류된다. 먼저, ISAR 영상 내 모든 산란원들에 대한 운동 파라미터를 추정함으로써 고품질 ISAR 영상을 형성하는 기법들이 있다^{[4],[5]}. 그러나 이들은 파라미터 추정 시 많은 연산시간이 요구되기 때문에 실시간으로 ISAR 영상 생성이 요구되는 분야에서는 활용이 불가능하다. 특정 레인지 빈(range-bin)을 따라 형성된 위상함수의 정보를 기반으로 보간법(interpolation)을 수행하는 기법들은^{[6],[7]} 빠른 연산시간 내 RMC를 수행한다. 이들은 particle swarm optimization(PSO) 그리고 adaptive joint-time frequency(AJTF)와 같은 기법들을 기반으로 비용함수를 최적함으로써 위상함수를 추정한다. 그러나,

상기 기법들은 최적화 수행 시 초기 탐색영역(searching space)를 잘못 설정할 경우, 비용 함수 내 국소 최저치(local minima) 혹은 국부 최대치(local maxima)에 대한 수렴 값을 산출하기 때문에 잘못된 위상함수를 추정하게 되는 문제가 있다.

본 논문에서는 보간법 기반 RMC 수행 기법에 관해 연구하였다. 먼저, 산란원이 하나 존재하는 레인지 빈을 선택한 후, 선택된 레인지 빈에서의 위상함수를 추정하였다. 여기서, 푸리에 변환(Fourier Transform: FT) 및 2차 다항식-위상 변환(Polynomial-Phase Transform: PPT)를^[8] 활용하여 위상함수를 추정함으로써, 보간법 기반 RMC 기법들의 위상함수 추정에 대한 문제점을 해결할 수 있다. 다음으로, 추정된 위상함수의 정보를 이용하여 관측 각도의 변화율이 일정한 시간영역에서의 보간법을 수행함으로써 ISAR RMC를 수행하였다.

II. ISAR 신호 모델

본 절에서는, 기동하는 표적에 대한 레이더 수신신호의 수학적 모델링에 관해 기술한다. 표적에 대한 레이더 수신신호에 거리방향 압축(range compression) 및 거리 정렬을 수행한 후, $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 번째 레인지 빈에서의 레이더 신호는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$s_n(t) = \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp(-j \frac{4\pi f_c}{c} (R(t) + x_k \cos(\theta(t)) + y_k \sin(\theta(t))). \quad (1)$$

여기서, $k = 1, 2, \dots, L_n$ 은 n 번째 레인지 빈 내 존재하는 산란원의 인덱스(index)를, L_n 은 n 번째 레인지 빈 내 전체 산란원의 개수를 나타낸다. t 는 슬로우 타임(slow time) 방향으로의 시간 변수, f_c 는 중심 주파수(carrier frequency), c 는 빛의 속도이다. x_k, y_k 그리고 A_k 는 각각 k 번째 산란원의 거리-도플러 평면에서의 위치정보 및 반사계수(reflectivity)로써 정의된다. 여기서, L_n 개의 산란원들은 모두 동일한 거리 방향에 위치하기 때문에 $x_n = x_1 = \dots = x_{L_n}$ 으로써 표기될 수 있다. $R(t)$ 및 $\theta(t)$ 는 표적의 병진운동 성분 및 회전운동 성분을 각각 나타낸다. 전체 관측각도의 변화량이 작고, 자동초점 기법을 통

해 $R(t)$ 성분이 제거된다면, 식 (1)은 식 (2)와 같이 근사된다.

$$s_n(t) \approx \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp\left(-j \frac{4\pi f_c}{c} (x_n + y_k \theta(t))\right). \quad (2)$$

상기 식 (2)에서 $\theta(t)$ 의 변화량이 일정하지 않을 경우, $\theta(t)$ 는 식 (3)과 같이 2차항 이상의 다항식 형태로써 표현된다.

$$\theta(t) = \omega_0 t + \frac{1}{2} \omega_1 t^2 + \frac{1}{6} \omega_2 t^3 \dots \quad (3)$$

이에 대한 결과로, 각 산란원에 대한 도플러 주파수가 t 에 따라 변하기 때문에, t 에 대한 FT의 수행을 통해 형성된 ISAR 영상의 초점이 흐려지게 된다. 여기서, 전체 관측각도의 변화량이 작을 경우, $\theta(t)$ 는 2차 다항식의 형태로 표현될 수 있기 때문에, 식 (2)는 식 (4)와 같이 근사된다.

$$s_n(t) \approx \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp\left(-j \frac{4\pi f_c}{c} (y_k (\omega_0 t + \frac{1}{2} \omega_1 t^2))\right) \quad (4)$$

여기서, 식 (2) 내 $\exp(-j4\pi f_c x_n/c)$ 는 t 에 대한 함수가 아니기 때문에 무시할 수 있다.

III. RMC 알고리즘

본 절에서는 제안된 RMC 알고리즘에 대해 소개한다. 먼저, 산란원이 하나 존재하는 레인지 빈을 선택한다(3-1절). 다음으로 선택된 레인지 빈에 대한 2차 PPT 및 FT를 수행함으로써 하나의 산란원에 대한 위상함수를 추정한다(3-2절). 마지막으로, 관측각도의 변화율을 일정하게 하는 시간 변수 τ 를 계산함으로써 각도 변화율이 일정한 새로운 데이터 분포를 획득한다(3-3절).

3-1 하나의 산란원이 존재하는 레인지 빈 선정

일반적으로, 특정 레인지 빈에서 하나의 산란원만 존재 하는지에 대한 여부는 크기-정규화 분산(Amplitude Normalized Variance: ANV)을 통해 확인할 수 있다^[7]. n 번째 레인지 빈에 대한 ANV는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\sigma_n = 1 - \frac{E_t(|s_n(t)|)^2}{E_t(|s_n(t)|^2)}. \quad (5)$$

$E_t(\cdot)$ 는 변수 t 에 대한 평균 연산자이다. 여기서, σ_n 의 값이 작을수록 해당 레인지 빈에서 산란원이 하나만 존재할 확률이 높다^[8]. 따라서, 모든 레인지 빈에 대한 ANV를 계산한 후, ANV의 값이 가장 작은 레인지 빈 n_1 을 선택한다. 선택된 n_1 번째 레인지 빈에서는 하나의 산란원만 존재하기 때문에 식 (4)는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} s_{n_1}(t) &= A_{n_1} \exp\left(-j \frac{4\pi f_c}{c} (y_{n_1} (\omega_0 t + \frac{1}{2} \omega_1 t^2))\right) \\ &= A_{n_1} \exp(-j2\pi(\alpha_{n_1} t + \beta_{n_1} t^2)). \\ &= A_{n_1} \exp(-j2\pi h_{n_1}(t)). \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $h_{n_1}(t) = \alpha_{n_1} t + \beta_{n_1} t^2$ 는 $s_{n_1}(t)$ 에 대한 위상함수, $\alpha_{n_1} = 2f_c y_{n_1} \omega_0/c$ 와 $\beta_{n_1} = f_c y_{n_1} \omega_1/c$ 는 $h_{n_1}(t)$ 의 1차, 2차 다항식 계수로써 각각 정의된다.

3-2 위상함수 추정

3-2-1 2차 PPT를 이용한 β_{n_1} 의 추정

PPT는 초기 탐색영역에 대한 정보 없이 빠른 연산시간 내 위상함수에 대한 2차 이상의 고차 다항식 계수들을 추정한다. $h_{n_1}(t)$ 의 2차 다항식 계수 β_{n_1} 를 추정하기 위해 $s_{n_1}(t)$ 에 2차 PPT를 적용한 결과는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} PPT_2[s_{n_1}(t)] &= FT_{t \rightarrow \gamma}[s_{n_1}(t) s_{n_1}^*(t - t_0)]. \\ &= \exp(-j2\pi(\alpha_{n_1} t_0 - \beta_{n_1} t_0^2)) \delta(\gamma + \gamma_{n_1}). \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $PPT_2[\cdot]$ 는 2차 PPT 연산자, $FT_{t \rightarrow \gamma}[\cdot]$ 는 t 에 대한 FT 연산자, t_0 는 t 에 대한 시간 지연, $\gamma_{n_1} = 2\beta_{n_1} t_0$ 이다. 식 (7)에서 $|PPT_2[s_{n_1}(t)]|$ 가 최대가 되는 γ_{n_1} 을 찾음으로써, $h_{n_1}(t)$ 의 2차 다항식 계수 $\hat{\beta}_{n_1} = \gamma_{n_1}/(2t_0)$ 를 추정할 수 있다.

3-2-2 FT를 이용한 α_{n_1} 의 추정

α_{n_1} 의 추정을 위해 먼저 상기 3-2-1절에서 추정된 $\hat{\beta}_{n_1}$

를 이용하여 식 (8)과 같이 $h_{n_1}(t)$ 의 2차 다항식 성분을 제거한다.

$$\tilde{s}_{n_1}(t) = s_{n_1}(t)\exp(j2\pi\hat{\beta}_{n_1}t^2). \quad (8)$$

다음으로, 식 (9)와 같이 $\tilde{s}_{n_1}(t)$ 에 대한 FT를 수행함으로써 $h_{n_1}(t)$ 의 1차 다항식 계수 $\hat{\alpha}_{n_1}$ 을 추정할 수 있다.

$$FT_{t \rightarrow \omega}[\tilde{s}_{n_1}(t)] = \delta(\omega + \alpha_{n_1}). \quad (9)$$

$\hat{\alpha}_{n_1}$ 그리고 $\hat{\beta}_{n_1}$ 을 통해 추정된 $s_{n_1}(t)$ 의 위상함수는 식 (10)과 같다.

$$\hat{h}_{n_1}(t) = \hat{\alpha}_{n_1}t + \hat{\beta}_{n_1}t^2. \quad (10)$$

3-3 관측각도의 변화율이 일정한 새로운 데이터 분포 획득

식 (6)에서, $\theta(t)$ 는 식 (11)과 같이 $h_{n_1}(t)$ 의 향으로써 정의될 수 있다.

$$\theta(t) = \frac{c}{2f_c y_{n_1}} h_{n_1}(t). \quad (11)$$

여기서, $h_{n_1}(\tau) = kt$ 를 만족하는 새로운 시간 변수 $\tau = f(t)$ 를 정의한다면, 식 (12)와 같이 관측각도의 변화율이 일정한 데이터 분포를 획득할 수 있다.

$$\theta(\tau) = \frac{c}{2f_c y_{n_1}} kt. \quad (12)$$

상기 목적을 달성하기 위해, 본 논문에서는 3-2절에서 추정된 $\hat{h}_{n_1}(t)$ 의 역함수를 구함으로써 $h_{n_1}(\tau) = t$ 를 만족하는($k = 1$) 새로운 시간 변수 τ 를 계산한다(식 (13)).

$$\begin{aligned} \tau &= \hat{h}_{n_1}^{-1}(t). \\ &= \sqrt{\frac{1}{\hat{\alpha}_{n_1}}t + \left(\frac{\hat{\beta}_{n_1}}{2\hat{\alpha}_{n_1}}\right)^2} - \frac{\hat{\beta}_{n_1}}{2\hat{\alpha}_{n_1}}. \end{aligned} \quad (13)$$

상기 계산된 τ 를 이용하여 $s_n(t)$ 에 1차원 선형보간법을 수행함으로써, $s_n(\tau)$ 를 획득할 수 있다. 이에 대한 결과로, 식 (14)와 같이 관측각도의 변화율이 일정한 레이더

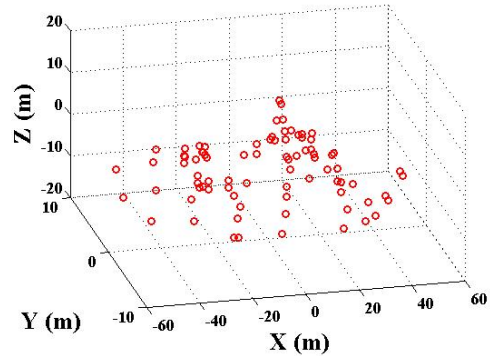


그림 1. 전함 모델
Fig. 1. Battleship model.

표 1. 레이더 파라미터
Table 1. Radar parameters.

중심 주파수	30 GHz
주파수 대역폭	500 MHz
주파수 간격	1.25 MHz
버스트(burst) 구간	500 μ sec

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters.

표적 초기 위치	$[100 \ 100 \ 0]^T$ km
표적 이동 방향	$[1 \ 0 \ 0]^T$
표적 이동 속도	100 m/sec
표적 이동 가속도	40 m/sec ²
CPI	10.7 sec
각속도 ω_0	5.2×10^{-4} rad/sec
각가속도 ω_1	4.8×10^{-5} rad/sec ²

데이터 분포를 획득함으로써, t 에 대한 FT 수행 시 초점이 맞는 ISAR 영상을 획득할 수 있다.

$$\begin{aligned} s_n(\tau) &\approx \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp\left(-j \frac{4\pi f_c}{c} (y_k \theta(\tau))\right). \\ &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp\left(-j \frac{4\pi f_c}{c} (y_k \nu t)\right). \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $\nu = c/(2f_c y_{n_1})$ 으로 관측각도의 변화율이다.

IV. 시뮬레이션 결과

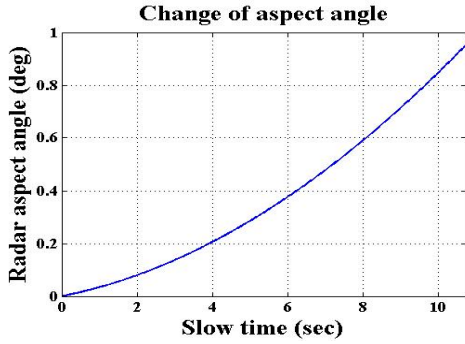


그림 2. 레이더 관측각도 변화
Fig. 2. Change of radar aspect angle.

본 절에서는 관측 각도의 변화율이 일정하지 않은 표적에 대한 RMC 수행 결과를 보인다. 표적의 위치 및 이동방향은 레이더를 원점으로 하는 직교좌표 $[xyz]^T$ 를 기반으로 표기되었으며, 표적은 길이, 폭, 그리고 높이가 각각 100.8 m, 10.8 m, 그리고 25.1 m의 크기를 가지는 83개의 점 산란원으로 구성된 전함(battleship) 모델을 사용하였다(그림 1). 시뮬레이션에서는 표 1의 계단-주파수(steped-frequency waveform) 파형을 송신하는 레이더가 사용되었으며, 이는 표 2의 시나리오를 기반으로 수행되었다. 표적에 대한 레이더 수신신호에 대하여, 각 버스트별 1차원 고해상도 거리측면도(high resolution range profile: HRRP)를 형성한 후, 거리정렬 및 자동초점기법을 수행함으로써 병진운동성분을 보상하였다. 여기서, 표적에

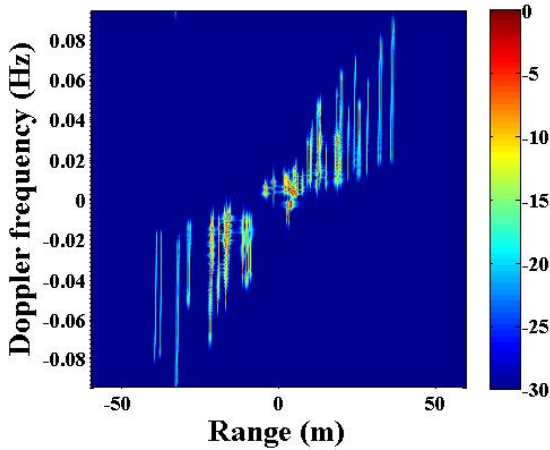


그림 3. RMC 수행 전의 ISAR 영상
Fig. 3. ISAR images before RMC.

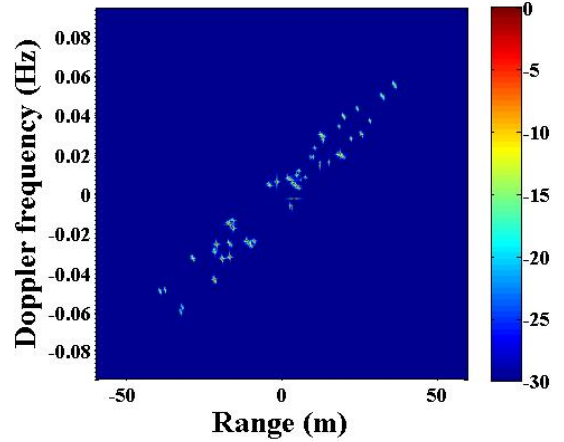


그림 4. RMC 수행 후의 ISAR 영상
Fig. 4. ISAR images after RMC.

대한 관측각도의 변화율 $\theta(t)$ 는 그림 2와 같이 일정하지 않기 때문에, 도플러 방향으로 초점이 저하된 ISAR 영상이 형성됨을 확인할 수 있다(그림 3). 상기 표적의 회전운동으로 인한 ISAR 영상의 초점저하 현상을 해결하기 위해 본 논문에서 제안한 RMC 알고리즘을 적용한 후, ISAR 영상을 형성하였다. 본 논문에서 제안한 RMC 기법의 결과로 관측각도의 변화율을 일정하게 하는 시간 변수 τ 에 대한 데이터 분포를 형성할 수 있기 때문에, 그림 4와 같이 초점이 맞는 ISAR 영상이 형성됨을 확인할 수 있다. 여기서, RMC를 수행하는데 소요된 시간은 0.0836 sec으로 빠른 연산시간 내 RMC가 수행된다는 것을 확인할 수 있다.

신호 대 잡음 비(Signal to Noise Ratio: SNR)의 변화에 따른, 제안된 RMC 기법과 참고문헌 [7]에서 제시된 기존의 보간법 기반 RMC 알고리즘 간의 성능비교를 수행하였다. 이를 위해 SNR을 0 dB에서 30 dB까지 5 dB 간격으로 변화시켜 가며, 2차 PPT 그리고 FT를 기반한 위상함수 추정 알고리즘과, PSO를 기반한 위상함수 추정 알고리즘에 대해 각각 SNR 별로 100번의 몬테-카를로(Monte-Carlo) 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서, RMC 후 형성된 ISAR 영상의 품질에 대한 정량적인 평가를 위해 식 (15)와 같이 ISAR 영상의 엔트로피(entropy)를 정의하였다.

$$E = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|I(m,n)|^2}{S} \ln \left(\frac{S}{|I(m,n)|^2} \right). \quad (15)$$

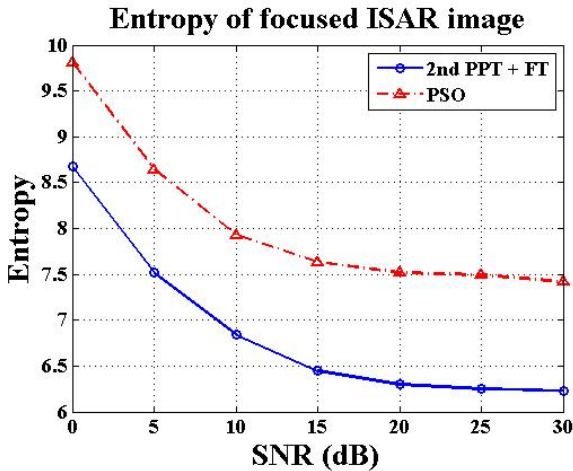


그림 5. SNR의 변화에 따른 ISAR 영상의 엔트로피
 Fig. 5. Entropy of ISAR images with respect to change of SNR.

여기서, $I(m, n)$ 은 거리-도플러 방향에서 형성된 ISAR 영상,

$$S = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |I(m, n)|^2, \quad (16)$$

m 는 도플러 빈 인덱스, M 은 전체 도플러 빈 개수, n 은 레인지 빈 인덱스 그리고 N 은 전체 레인지 빈 개수이다. 일반적으로, 상기 식 (15)에서 정의된 ISAR 영상의 엔트로피가 낮을수록 초점이 잘 맞는 ISAR 영상으로써 평가된다^[3]. 그림 5는 상기 언급된 두 가지 기법에 대한 SNR별 엔트로피 평균값을 도시한다. 여기서 파란색 선은 2차 PPT 및 FT를 기반으로 한 RMC 수행결과를, 빨간색 선은 PSO를 기반으로 한 RMC 수행결과를 각각 도시한다. 그림 5에서, 제안된 기법의 적용 후 형성된 ISAR 영상의 엔트로피가 PSO 기반 RMC의 적용 후 형성된 ISAR 영상의 엔트로피보다 더 낮다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 레이다 관측각도의 변화율이 일정하지 않은 표적에 대한 ISAR 영상의 RMC 기법에 대해 연구하였다. 먼저, 하나의 산란원이 존재하는 레인지 빈을 찾기 위해 가장 작은 ANV를 가지는 산란원을 선택하였다. 다

음으로, 선택된 레인지 빈 내 신호에 대한 위상함수를 추정하기 위해 1차 그리고 2차 다항식 계수를, FT 그리고 2차 PPT를 통해 각각 추정하였다. 마지막으로, 추정된 위상함수를 이용하여 관측각도의 변화율을 일정하게 하는 새로운 시간변수를 정의함으로써 관측각도의 변화율이 일정한 데이터 분포를 획득하였다. 관측각도의 변화율이 일정하지 않은 해상표적에 대한 시뮬레이션 결과를 통해, 본 논문에서 제안한 RMC 기법을 수행함으로써 도플러 방향으로 초점이 맞춰진 ISAR 영상이 형성됨을 확인할 수 있었다. 이와 더불어, 향후 상기 제안된 RMC 기법을 기반으로, 해상표적에 대한 실제 레이다 측정데이터의 ISAR 영상 형성 기법에 대한 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] V. Chen, M. Martorella, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging*, Edison, NJ: SciTech, 2014.
- [2] D. Zhu, L. Wang, Q. Tao, and Z. Zhu, "ISAR range alignment by minimizing the entropy of average range profile", In *Proceedings of IEEE Radar Conference 2006*, NY, USA, pp. 813-818, 2006.
- [3] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-entropy phase adjustment for ISAR", *IEE Proc. -Radar Sonar Navig.*, vol. 151, no. 4, pp. 203-209, Aug. 2004.
- [4] Y. Li, R. Wu, M. Xing, and Z. Bao, "Inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion", *Proc. IET Radar Sonar Navigat.*, vol. 2, no. 6, pp. 395-403, Dec. 2008.
- [5] J. Zheng, T. Su, W. Zhu, L. Zhang, Z. Liu, and Q. H. Liu, "ISAR imaging of non-uniformly rotating target based on a fast parameter estimation algorithm of cubic phase signal", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 53, no. 9, pp. 4727-4740, Sep. 2015.
- [6] T. Thayaparan, G. Lampropoulos, S. K. Wong, and E. Riseborough, "Application of adaptive joint time-frequency algorithm for focusing distorted ISAR images from simulated and measured radar data", *Proc. IET Radar Sonar Navigat.*, 2003, vol. 150, no. 4, pp. 213-220, Aug.

2003.

[7] W. Brinkman, T. Thayaparan, "Focusing inverse synthetic aperture radar images with higher-order motion error using the adaptive joint-time-frequency algorithm optimized with the genetic algorithm and the particle swarm optimization algorithm comparison and results", *Proc.*

IET Signal Process., vol. 3, no. 4, pp. 329-342, Jul. 2009.

[8] L. Liu, F. Zhou, M. -L. Tao, B. Zhao, and Z. -J. Zhang, "Cross-range scaling method of inverse synthetic aperture radar image based on discrete polynomial-phase transform", *Proc. IET Radar Sonar Navigat.*, vol. 9, no. 3, pp. 333-341, Mar. 2015.

강 병 수



2012년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 2014년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2014년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이다 영상

김 찬 홍



1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2005년 3월~2008년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1993년 2월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] 레이다 시스템, 위상배열안테나, 레이다 표적특성

배 지 훈



2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2013년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 2002년 1월~2006년 12월: 한국전자통신

연구원 연구원

2007년 1월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원

[주 관심분야] 레이다 신호 처리, HF/UHF RFID 시스템, RFID 디지털 모뎀, 배열안테나 빔형성, 최적화 기법

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전

자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월~현재: 레이다/IR 표적식별 특화연구실 실장

[주 관심분야] 레이다 표적인식, 레이다 영상, 레이다 신호처리, 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정

정 성 은



2014년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

2014년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정

[주 관심분야] 레이다 영상