

자가-회전 운동을 겪는 표적의 고품질 ISAR 영상 형성을 위한 RMC와 결합된 RCMC 프로세싱 체인

ISAR Imaging Processing Chain Combined with RCMC and RMC for Self-Rotating Targets

유보현 · 강병수 · 강기봉 · 이명준 · 김경태

Bo-Hyun Ryu · Byung-Soo Kang · Ki-Bong Kang · Myung-Jun Lee · Kyung-Tae Kim

요 약

자가-회전 운동을 겪는 표적의 경우, 표적의 비 균일한 회전 운동에 의하여 형성된 역합성 개구면 레이더(inverse synthetic aperture radar: ISAR) 영상에 1) 산란점들이 거리 방향으로 움직이는 거리 셀 천이(range cell migration: RCM) 현상과 2) 형성된 ISAR 영상에 도플러(Doppler) 방향으로의 퍼짐 현상이 야기된다. 상기 현상들은 각각 거리 셀 천이 보상(RCM correction: RCMC)과 회전 운동 성분 보상(rotational motion compensation: RMC)을 수행하여 보상할 수 있으나, 현재까지의 ISAR 신호처리 기법에서는 RCMC와 RMC가 독립적으로 수행되고 있는 상황이다. 이에 본 논문에서는 RCMC와 RMC를 결합하여, 자가-회전 운동을 겪는 표적의 비 균일 회전 성분에 의한 모든 ISAR 영상의 품질 저하 현상을 보상하는 처리 체계(processing chain)를 제안한다. 본 논문에서는 모의시험 및 실측 해상 표적 데이터를 활용하여 제안된 처리 체계의 효용성을 검증하였다.

Abstract

In ISAR imaging, a self-rotating target induces a nonuniform rotational motion (RM) between the radar and the target. Because the non-uniform RM results in the range cell migration (RCM) in the range-compressed data and blurring effects in the obtained ISAR images, it is highly desirable to properly compensate for the non-uniform RM of the target for the purpose of focusing ISAR images. Fortunately, in conventional ISAR imaging methods, the aforementioned effects due to the non-uniform RM can be eliminated by performing RCMC and RMC, respectively. Nonetheless, in the existing methods, RCMC and RMC have been conducted separately, yielding unfocused ISAR images of self-rotating targets. Therefore, in this paper, we propose an ISAR imaging processing chain that combines RCMC and RMC. Furthermore, experimental results based on simulated and real measured data are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR), Radar Imaging, RCMC, RMC

I. 서 론

역합성 개구면 레이더(inverse synthetic aperture radar:

「이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1A2B6006426).」

포항공과대학교 전자전기공학부(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· Manuscript received September 7, 2020 ; Revised October 26, 2020 ; Accepted November 18, 2020. (ID No. 20200907-075)

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

ISAR)는 고정된 레이더에서 움직이는 표적에 전자기파를 방사하고, 표적으로부터 반사된 신호를 이용하여 표적을 2차원 영상의 형태로 도시하는 레이더이다^[1]. ISAR는 기존의 광학 센서와 달리 주야에 관계없이 관측이 가능하고, 기상 환경에 영향을 받지 않으므로 automatic target recognition(ATR) 및 non-cooperative target recognition(NCTR)을 통한 표적의 피아 식별을 효과적으로 수행한다. 이러한 장점으로 ISAR는 현재 국방 및 민수 분야에서 다양하게 활용되고 있다.

일반적으로 ISAR 영상 형성 기하구조 내 기동하는 표적의 움직임 성분은 레이더와 표적 사이의 레이더 가시선(radar line of sight: RLOS) 방향으로의 거리(range)가 변하는 1) 병진 운동(translational motion: TM) 성분과 레이더에 대한 표적의 관측 각도가 변하는 2) 회전 운동(rotational motion: RM) 성분으로 구분된다. 이 때, 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성하기 위해선 상기 두 운동 성분 중 관측 각도 변화율이 일정한 회전 운동 성분이 필요하다^[2].

비행기와 같은 대공 표적의 경우, 표적에 대한 레이더 관측 시간(coherent processing interval: CPI)이 짧아 CPI 내 표적의 관측 각도 변화율이 일정하다. 이 경우, 수신 신호에 병진 운동 보상(TM compensation: TMC)을 수행하고, 거리-도플러(range-Doppler) 기법을 적용하여 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성할 수 있다^[2]. 그러나 고 기동 표적이거나 해상 표적과 같이 롤-피치-요우(roll-pitch-yaw)에 의한 자가-회전 운동(self-rotating)을 겪는 표적의 경우, 표적의 비 균일(non-uniform) 회전 운동에 의하여 1) 산란점들이 시간에 따라 거리 방향으로 이동하는 거리 셀 천이(range cell migration: RCM) 현상과 2) 형성된 ISAR 영상에 도플러(Doppler) 방향으로의 퍼짐 현상(blurring)에 의한 ISAR 영상의 품질 저하를 겪는다. 따라서 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대하여 고품질 ISAR 영상을 형성하기 위해선 TMC 이외에 추가적인 신호처리 과정이 수행되어야 한다.

표적의 비 균일 회전 운동에 의한 ISAR 영상의 품질 저하 현상은 기존의 레이더 신호처리 기법인 RCMC(RCM compensation)와 회전 운동 보상(RM compensation: RMC)을 통해 각각 보상될 수 있다. 즉, 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대하여 TMC 이후 RCMC와 RMC를 순차적으로

수행하여 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성할 수 있다. 그러나 현재까지 ISAR 영상 형성 체계에서는 상기 RCMC와 RMC 기법을 독립적으로 구현하며, 이에 따라 표적의 비 균일한 회전 운동에 의한 모든 ISAR 영상의 품질 저하 현상을 보상하는 신호처리 체계가 확립되지 않은 상황이다. 이에 본 논문에서는 RMC에 RCMC를 결합하여 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대한 고품질 ISAR 영상을 형성하는 프로세싱 체인(processing chain)을 제안한다.

본 논문의 2장에서는 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대한 ISAR 수신 신호를 정의하고, 표적의 비 균일한 회전 운동에 의해 야기되는 ISAR 영상의 품질 저하 현상을 분석한다. 3장에서는 제안된 프로세싱 체인에 대하여 서술하며, 이에는 키스톤 변환(keystone transform)을 통한 RCMC와 결합된 RMC 알고리즘이 포함된다. 마지막 4장에서는 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대한 실험 결과를 도시하여 제안된 프로세싱 체인의 효용성을 증명한다.

II. ISAR 신호 모델

본 절에서는 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대한 ISAR 수신 신호에 관하여 기술한다. 레이더와 표적 사이의 기하구조는 다음 그림 1과 같고, CPI 동안 표적의 상대적인 움직임은 2차원 평면(image projection plane: IPP)에 국한된다^[2]. 선형 주파수 변조 신호(linear frequency modulation: LFM) $p(t)$ (식 (1))를 송신할 때, 표적으로부터 수신된 신호 $s(t', t)$ 는 식 (2)와 같이 정의된다^[1].

$$p(t') = \exp\left(-j\frac{\pi B t'^2}{T_0}\right) \text{rect}\left(\frac{t'}{T_0}\right) \quad (1)$$

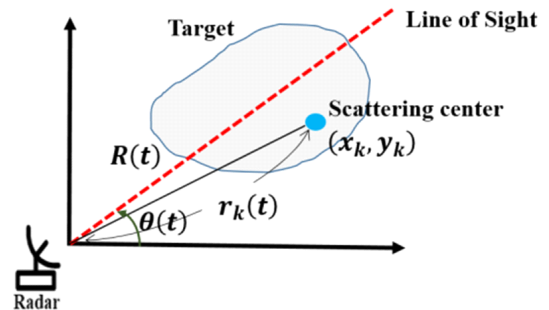


그림 1. ISAR 영상 형성 기하구조
Fig. 1. Geometry of ISAR imaging.

$$s(t', t) = \sum_{k=1}^K A_k \text{rect} \left[t' - \frac{2}{c} r_k(t) \right] \exp [j \phi_k(t)] \quad (2)$$

여기서 t' 와 t 는 각각 패스트 타임(fast-time)과 슬로우 타임(slow-time) 시간 변수, B 는 송신 파형의 주파수 대역폭(frequency bandwidth), rect 와 T_0 는 구형함수 연산자(operator) 및 송신 파형의 폭(pulse width), $k=1, 2, \dots, K$ 는 산란점의 인덱스(index), K 는 전체 산란점의 개수, A_k 는 k 번째 산란점의 반사계수(reflectivity), $r_k(t)$ 는 레이더와 k 번째 산란점 사이의 거리, c 는 빛의 속도이다. 이 때, 식 (2)의 위상 성분 $\phi_k(t)$ 는 평면파(plane wave)의 수신 위상으로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\phi_k(t) = 2\pi f_c \left[t' - \frac{2}{c} r_k(t) \right] + \pi \mu \left[t' - \frac{2}{c} r_k(t) \right]^2 \quad (3)$$

여기서 f_c 는 중심 주파수, $\mu = B/T_0$ 는 B 와 T_0 의 비로써 정해지는 송신 LFM 신호의 처프율(chirp-rate)이다.

식 (2)의 수신 신호에 디처핑(de-chirping)을 수행하고, residual video phase(RVP)를 보상한 신호 $s(t', t)$ 는 식 (4)와 같이 정의된다^[3].

$$s(t', t) = \sum_{k=1}^K A_k \text{rect} \left[t' - \frac{2}{c} r_e(t) \right] \exp \left(-j \frac{4\pi(\mu t' + f_c)}{c} r_e(t) \right) \quad (4)$$

식 (4)의 위상 신호 중 $r_e(t)$ 는 원거리 장 조건(far-field condition)에 의하여 식 (5)와 같이 근사되고, 이는 레이더와 표적 사이의 유효 거리 성분이다.

$$r_e(t) \cong r_k(t) - R_{ref} = R(t) + x_k + y_k \theta(t) - R_{ref} \quad (5)$$

여기서 $R(t)$ 는 레이더와 표적 사이의 병진 운동 성분, x_k 와 y_k 는 각각 k 번째 산란점의 거리-도플러 평면에서 표적의 회전 중심으로부터의 위치, $\theta(t)$ 는 레이더에 대한 표적의 관측 각도 변화 성분이며, R_{ref} 는 디처핑 수행 시 사용된 기준 거리(reference distance)이다. 만약 $\theta(t)$ 의 변화량이 비 균일하다면, $\theta(t)$ 는 테일러 급수 전개(Taylor-series expansion)의 결과, t 에 대한 고차 다항식으로 전개할 수 있다^[2].

$$\theta(t) = \omega_0 + \omega_1 t + \omega_2 t^2 + \omega_3 t^3 \dots \quad (6)$$

일반적으로 ISAR 영상은 식 (4)의 수신 신호에 2차원

푸리에 변환(Fourier transform: FT)을 수행함 (i.e. 거리-도플러 기법)으로 형성된다. 그러나 식 (4)와 식 (6)의 보상되지 않은 $R(t)$ 와 $\theta(t)$ 의 고차 성분($\omega_1, \omega_2, \dots$)이 ISAR 영상에 왜곡 성분을 야기하므로 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성하기 위해선 $R(t)$ 와 $\theta(t)$ 에 대한 적절한 보상 과정이 필요하다. 이 때, 병진 운동 성분 $R(t)$ 를 보상하는 과정을 TMC, 회전 운동 성분 $\theta(t)$ 의 고차 성분을 보상하는 과정을 RMC라 한다.

고 기동 표적이나 해상 표적과 같이 롤-피치-요우에 의한 자가-회전 운동을 겪는 표적의 경우, 표적의 비 균일한 관측 각도 변화율의 영향으로 RCM 현상이 추가적으로 발생한다. 상기 RCM 현상은 $\theta(t)$ 의 변화량이 클수록 크게 발생하며, 기존의 RMC 기법^[2,4-7]의 고차계수 추정 과정에 심각한 오차를 야기한다. 즉, RCM 현상이 보상되지 않는다면 TMC와 RMC가 수행되어도 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성할 수 없다. 따라서 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대하여 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성하기 위해선 RCMC 기법이 추가적으로 수행되어야 한다. 그러나 기존의 ISAR 영상 형성 체계에서는 RCMC와 RMC를 각각 독립적으로 수행하며, 표적의 비 균일 회전 운동에 의한 모든 ISAR 영상의 품질 저하 현상을 보상하는 전반적인 신호처리 체계가 확립되지 않은 상황이다. 이에 본 논문에서는 RMC에 RCMC를 결합한 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대한 고품질 ISAR 영상형성 프로세싱 체인을 제안한다.

III. RMC와 결합된 RCMC 기법

본 절에서는 표적의 비 균일한 회전 운동 성분에 의해 추가적으로 야기되는 RCM 현상을 분석하고, 키스톤 변환을 활용한 RCMC 과정을 서술한다. TMC 수행 후의 수신 신호 $\tilde{s}(t', t)$ 는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\tilde{s}(t', t) = \sum_{k=1}^K A_k \text{rect} \left[t' - \frac{2}{c} (x_k + y_k \theta(t) - R_{ref}) \right] \times \exp \left(-j \frac{4\pi(\mu t' + f_c)}{c} (x_k + y_k \theta(t) - R_{ref}) \right) \quad (7)$$

식 (7)의 $\tilde{s}(t', t)$ 에 t' 방향으로 FT를 수행하여 거리 압축(range compression)을 수행하고, 고 해상도 거리 측면도(high resolution range profile: HRRP) $H(x, t)$ 를 획득한다.

$$H(x, t) = FT[\tilde{s}(t', t)]_{t' \rightarrow x} \\ = \sum_{k=1}^K A_k \text{sinc}[x - \{x_k + y_k \theta(t) - R_{ref}\}] \\ \times \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} \{x_k + y_k \theta(t) - R_{ref}\}\right] \quad (8)$$

여기서 식 (8)의 sinc 함수의 $y_k \theta(t)$ 성분은 표적의 비 균일 회전 운동 $\theta(t)$ 에 의한 표적의 거리 방향으로의 이동 성분을 나타낸다. 이 때, CPI 동안 $y_k \theta(t)$ 의 전체 변위가 거리 해상도보다 커진다면 산란원의 거리 방향으로의 위치가 시간에 따라 변하는 RCM 현상이 발생한다. 즉, RCM 현상이 발생하지 않기 위해서는 식 (9)와 같이 CPI 동안 $y_k \theta(t)$ 의 전체 변위가 거리 해상도보다 작아야 한다.

$$|y_k \theta(T_{CPI})| \leq dx \quad (9)$$

여기서 T_{CPI} 는 CPI, $dx = c/(2B)$ 는 주파수 대역폭에 의해 결정되는 거리방향 해상도이다. 그러나 고 기동 표적, 해상 표적과 같이 자가-회전 운동을 겪는 표적의 경우, 상기 식 (9)의 조건을 만족하지 않는 경우가 많다. 따라서 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대하여 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성하기 위해서는 RCMC를 통한 RCM 현상의 보상이 추가적으로 수행되어야 한다.

본 논문에서는 키스톤 변환을 활용하여 RCMC를 수행한다[8]. 상기 RCM 현상은 식 (7)의 수신신호를 t' 방향으로 FT를 수행할 때 t' 와 $\theta(t)$ 사이의 커플링 현상에 의하여 발생한다. 따라서 슬로우 타임 t 를 아래의 식 (10)과 같이 정의된 τ 로 치환하여 RCM 현상을 제거할 수 있다[8].

$$\tau = (f_c + \mu t')t/f_c \quad (10)$$

식 (7)의 수신 신호에 식 (10)의 키스톤 변환을 수행한 신호 $\tilde{s}_R(t', \tau)$ 는 아래의 식 (11)과 같다.

$$\tilde{s}_R(t', \tau) = \sum_{k=1}^K A_k \text{rect}\left[t' - \frac{2}{c}(x_k + y_k \theta(\tau) - R_{ref})\right] \\ \times \exp(-j\phi_1) \exp(-j\phi_2) \exp(-j\phi_3) \quad (11)$$

여기서 식 (11)의 위상 성분(ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3)은 다음과 같다.

$$\phi_1 = \frac{4\pi(\mu t' + f_c)}{c}(x_k - R_{ref}), \\ \phi_2 = \frac{4\pi f_c}{c} y_k \omega_0 \tau, \quad \phi_3 = \frac{4\pi f_c^2}{c(\mu t' + f_c)} y_k \omega_1 \tau^2 \quad (12)$$

식 (11), 식 (12)의 결과에 따라, 키스톤 변환을 통해 t' 과 $\theta(t)$ 사이의 커플링 현상이 제거되어 RCM 현상이 보상됨을 확인할 수 있다. 이후, 식 (11)에 t' 방향으로의 FT를 수행하여 RCMC가 수행된 거리 측면도 $H_R(x, \tau)$ 를 획득한다.

$$H_R(x, \tau) = FT[\tilde{s}(t', \tau)]_{t' \rightarrow x} \\ = \sum_{k=1}^K A_k \text{sinc}[x - \{x_k - R_{ref}\}] \\ \times \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} \{x_k - R_{ref}\}\right] \\ \times \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} \left\{y_k \omega_0 \tau + \frac{f_c}{(\mu t' + f_c)} y_k \omega_1 \tau^2\right\}\right] \quad (13)$$

식 (13)의 결과, RCMC 수행 이후 모든 표적 신호가 각 버스트(burst)에 대해 같은 레인지 셀(range cell)에 위치함을 확인할 수 있다. 그러나 표적의 비 균일한 회전 운동 성분(ω_1)에 의한 도플러 방향의 퍼짐 현상이 여전히 남아 있기 때문에 RMC 과정이 연속적으로 수행되어야 한다.

본 논문에서는 참고문헌 [2]에서 제안한 RMC 기법을 활용한다. 제안된 RMC 기법은 다항식-위상 변환(poly-nomial-phase transform)을 활용하여 식 (13)의 위상 성분을 추정하고, 추정된 위상 값을 이용하여 표적의 관측 각도 변화율을 일정하게 하는 새로운 시간 변수 τ' 를 정의한다. 이후 τ' 에 대한 보간법(interpolation)을 수행하여 ω_1 에 의한 영향을 제거한다. RMC 수행 이후의 신호 $H_R(x, \tau')$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$H_R(x, \tau') \cong \sum_{k=1}^K A_k \text{sinc}[x - \{x_k - R_{ref}\}] \\ \times \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} \{y_k \omega_0 \tau'\}\right] \quad (14)$$

최종적으로 $H_R(x, \tau')$ 신호에 슬로우 타임 방향으로의 FT를 수행하여 초점이 맞는 ISAR 영상 $I(x, f_d)$ 를 형성한다.

$$I(x, f_d) \cong \sum_{k=1}^K A_k \text{sinc}[x - \{x_k - R_{ref}\}] \\ \times \text{sinc}\left[f_d - \frac{2\omega_0 y_k}{\lambda}\right] \quad (15)$$

그림 2는 본 논문에서 제안한 RMC와 결합된 RCMC 처리 체계의 순서도(flowchart)를 도시한다. 제안된 처리 체계에서는 TMC가 수행된 전처리 신호에 키스톤 변환을

자가-회전 운동을 겪는 표적의 고품질 ISAR 영상 형성을 위한 RMC와 결합된 RCMC 프로세싱 체인

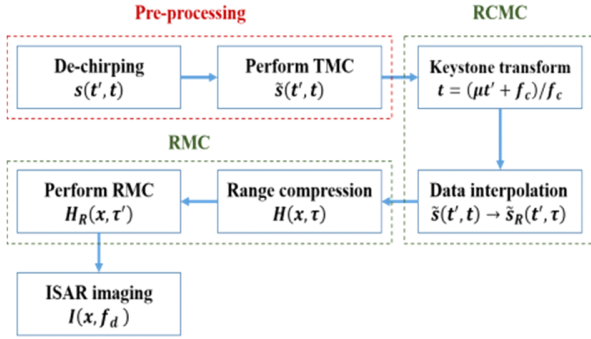


그림 2. 본 논문에서 제안된 RMC와 결합된 RCMC 프로세싱 체인

Fig. 2. Flowchart of the proposed processing chain.

수행하여 RCM 현상을 보상하고, 이후 RMC를 수행하여 ISAR 영상의 도플러 방향으로의 퍼짐 현상을 보상한다. 최종적으로 제안된 처리 체계는 자가-회전 운동을 겪는 표적의 ISAR 영상에 발생하는 모든 품질 저하 현상을 보상하고, 고품질 ISAR 영상을 형성한다.

IV. 실험 결과

본 절에서는 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대하여 본 논문에서 제안된 처리 체계의 수행 결과를 기술한다. 실험 결과는 1) 점 산란원(point scatterer) 기반의 모의시험과 2) 해상 표적의 레이더 측정 데이터 결과를 포함한다.

4.1 점 산란원 기반 모의시험

표적의 위치 및 이동 방향은 레이더를 원점으로 하는 직교좌표 $[x y z]^T$ 를 기반으로 표기되었으며, 표적의 길이, 폭, 그리고 높이는 각각 40 m, 20 m, 그리고 10 m의 크기를 갖는 83개의 점 산란점으로 구성된 항공기(Boeing- 737) 모델을 사용하였다(그림 3). 본 모의시험에서는 표 1의 LFM 신호를 사용하였으며, 표 2의 영상 형성 시나리오를 기반으로 수행되었다. 레이더에 대한 표적의 병진 운동 성분 $R(t)$ 와 회전 운동 성분 $\theta(t)$ 는 각각 그림 4(a)와 그림 4(b)에 도시되어 있다.

그림 5(a)는 표적으로부터 수신된 신호에 TMC를 수행하여 각 버스트 별 1차원 HRRP를 형성한 결과이다. 그림 5(a)의 결과로 표적의 비 균일한 회전 성분($\omega_1=0.03$)이

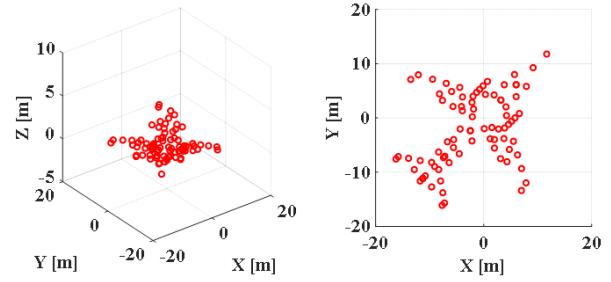


그림 3. Boeing-737 항공기 모델

Fig. 3. Aircraft model of Boeing-737.

표 1. 모의시험 변수

Table 1. Simulation parameters.

Carrier frequency f_c	9 GHz
Frequency bandwidth B	500 MHz
Pulse duration T_0	10 us
Pulse repetition frequency	200 Hz
CPI	1.2 s
Signal-to-noise ratio(SNR)	20 dB

표 2. 레이더 변수 설정

Table 2. Radar parameters.

Initial position of the target	[5, 0, 0] km
Velocity of the target	[200, 200, 0] m/s
Angular velocity ω_0	0.075 rad/s
Angular acceleration ω_1	0.03 rad/s ²

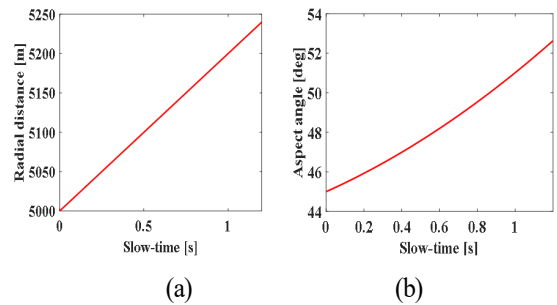


그림 4. (a) 표적의 병진 운동 성분 $R(t)$ 와 (b) 회전 운동 성분 $\theta(t)$

Fig. 4. (a) Translational motion components $R(t)$ and (b) Rotational motion components $\theta(t)$ of the target.

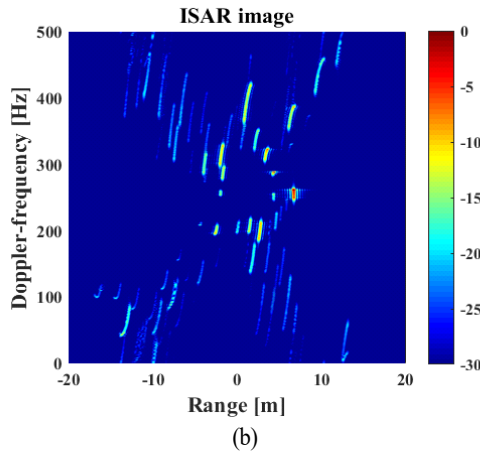
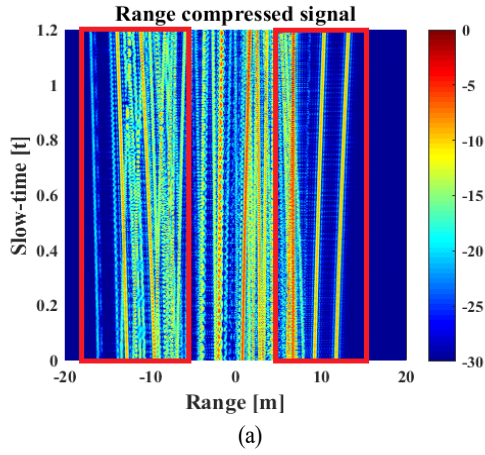


그림 5. (a) 형성된 HRRP와 (b) 왜곡된 ISAR 영상
Fig. 5. (a) HRRP and (b) ISAR image of the received signal.

RCM 현상을 야기함을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 해당 수신 신호에 RCM 보상 과정 없이 RMC 기법만 수행하였을 때의 ISAR 영상이다. 그림 5(b)의 결과로 RCM 현상이 RMC의 고차계수 추정 과정에 오차를 야기하며, 이에 따라 초점이 저하된 ISAR 영상이 형성됨을 확인할 수 있다.

그림 6은 본 논문에서 제안된 처리 체계 수행 결과이다. 그림 6(a)는 키스톤 변환을 활용하여 그림 5(a)의 RCM 현상을 보정한 결과이고, 그림 6(b)는 RCMC 수행 후 RMC를 수행하여 고품질 ISAR 영상을 형성한 결과이다. 그림 6의 결과, RCMC와 RMC가 모두 수행되어야 표적의 비 균일 회전 운동에 의한 모든 ISAR 영상의 품질

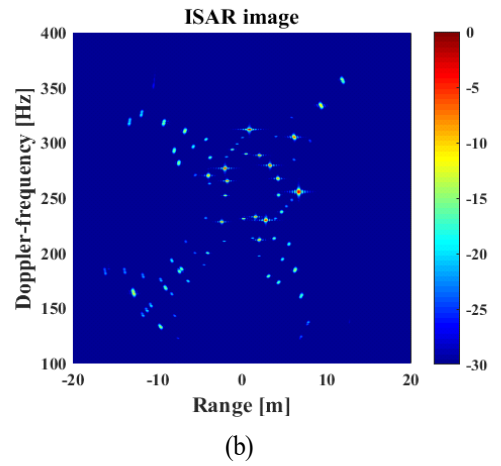
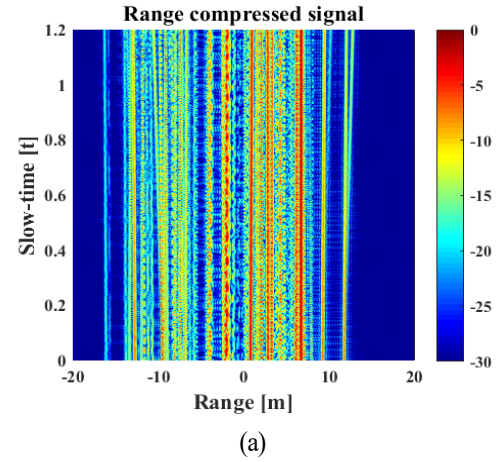


그림 6. (a) RCMC 수행 후의 HRRP와 (b) 초점이 맞는 ISAR 영상
Fig. 6. (a) HRRP after RCMC and (b) the focused ISAR image.

저하 현상이 보상됨을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 형성된 ISAR 영상의 품질에 대한 정량적인 평가를 위하여 엔트로피(entropy) E 를 사용하였다^[9].

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

$$S = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |I(m,n)|^2 \quad (17)$$

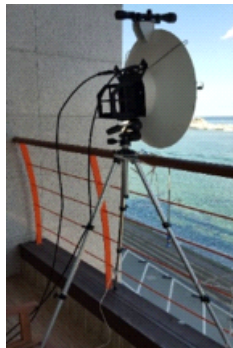
여기서, $I(m,n)$ 은 거리-도플러 방향으로 형성된 2차원 ISAR 영상이고, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 은 도플러 셀(Doppler

cell)의 인덱스, M 은 전체 도플러 셀의 개수, $n=0, 1, \dots, N-1$ 은 레인지 셀의 인덱스, N 은 전체 레인지 셀의 개수이다. 일반적으로 식 (16)에서 정의된 E 의 값이 작을수록 초점이 잘 맞는 ISAR 영상으로 평가된다^[9]. 식 (16)의 결과, 그림 5(b), 그림 6(b) 두 ISAR 영상의 E 값은 각각 11.38, 9.21로 계산되었다. 그림 5(b)의 경우, 보상되지 않은 RCM 성분이 RMC의 고차 계수 추정에 오차를 야기하고, ISAR 영상 속 도플러 방향으로의 퍼짐 현상이 완벽히 보상되지 않아 계산된 E 값이 그림 6 (b)의 경우보다 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 모의시험 결과, 본 논문에서 제안된 RCMC와 결합된 RMC 처리 체계를 수행하여 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대하여 고품질 ISAR 영상을 형성함을 확인할 수 있다.

4.2 해상 표적에 대한 실측 데이터

그림 7(a)와 그림 7(b)는 실제 해상 표적 측정 시에 사용된 X-밴드 펄스형 레이더(pulsed radar)의 안테나와 송/수신 장치이다. 해상 표적의 예상 이동 경로 방향으로 안테나의 빔을 조향한 후, 표적이 안테나의 메인 빔 폭에 들어온 순간 측정을 시작하였다. 그림 8은 실제 해상 표적에 대한 광학 영상이며, 해당 표적에 대한 상세 실험 절차는 참고문헌 [10]에 기술되어 있다(표 3).

그림 9(a)는 레이더 원시 데이터(raw data)에 정합 필터(matched filtering) 수행 후 획득한 고해상도 거리 측면도



(a) 안테나
(a) Antenna



(b) 송/수신 장치
(b) Transmitter and receiver

그림 7. X-밴드 레이더 장비
Fig. 7. X-band pulsed radar.



그림 8. 실제 해상 표적에 대한 광학 영상
Fig. 8. Optical image of maritime target.

표 3. X-밴드 펄스형 레이더 변수

Table 3. Parameters for pulsed radar in X-band.

Carrier frequency f_c	9.65 GHz
Frequency bandwidth B	200 MHz
Range resolution dx	0.75 m
Pulse duration T_0	0.125 us
Pulse repetition frequency	8 kHz
Sampling rate	500 MHz
Antenna beamwidth	3°

이다. 해상 표적의 병진 운동 성분에 의하여 시간(slow-time)에 따라 펄스별로 HRRP가 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이에 거리 압축(range alignment)^[11]과 위상 보상(phase adjustment)^[12]를 수행하여 그림 9(b)와 같이 병진 운동 성분의 영향이 보상된 HRRP를 획득한다. 그러나 해상 표적의 경우, 파도에 의한 자가-회전 운동을 겪으며 이는 TMC 수행 후에도 보상되지 않은 RCM 성분을 야기한다. 이에 본 논문에서 제안된 키스톤 변환 기반의 RCMC를 수행하여 그림 9(c)의 RCM 현상이 보상된 HRRP를 획득한다.

그림 10(a)는 그림 9(a)에 RMC를 수행하여 획득한 ISAR 영상이고, 그림 10(b)는 RCMC와 RMC가 모두 수행된 ISAR 영상이다. 두 영상의 엔트로피(E) 값은 각각 13.06, 12.2로 계산되었다. 모의시험 결과와 마찬가지로, 제안된 처리 체계 결과, 표적의 비 균일 회전 운동에 의한 RCM 현상과 도플러 방향의 퍼짐 현상이 모두 보상됨을 확인할 수 있다.

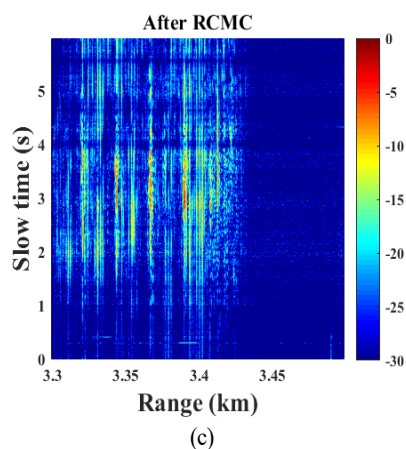
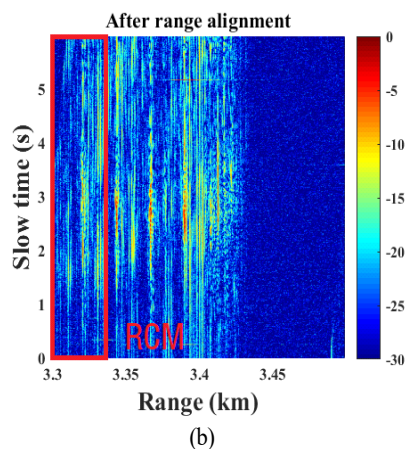
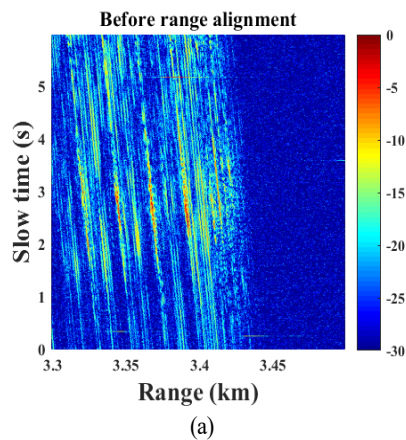


그림 9. (a) 거리 정렬 수행 전 HRRP, (b) 거리 정렬 수행 후 HRRP, (c) RCMC 수행 후 HRRP
Fig. 9. HRRPs (a) before range alignment, (b) after range alignment, and (c) after RCMC.

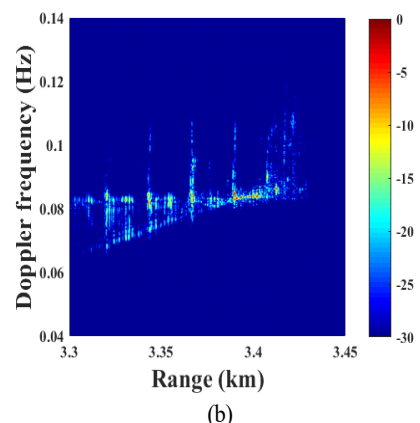
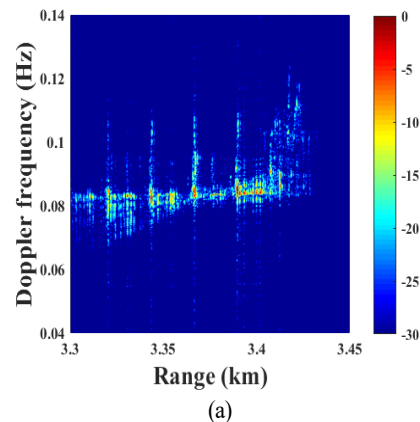


그림 10. (a) RMC 수행 후의 ISAR 영상, (b) RCMC 및 RMC 수행 후의 ISAR 영상
Fig. 10. ISAR images after (a) RMC, and (b) RMC with RCMC.

V. 결 론

본 논문에서는 자가-회전 운동을 겪는 표적의 ISAR 영상 형성 과정에서, 표적의 비 균일한 회전 운동에 의해 야기되는 ISAR 영상의 품질 저하 현상을 분석하는 연구를 수행하였다. 일반적으로 표적의 비 균일한 회전 운동은 산란점들이 거리 방향으로 움직이는 RCM 현상과 형성된 ISAR 영상의 도플러 방향으로의 퍼짐 현상을 야기한다. 상기 RCM 현상과 ISAR 영상의 퍼짐 현상은 기존의 레이 다 신호처리 기법인 RCMC와 RMC를 수행하여 보상 가능하나, 현재까지의 ISAR 신호 처리 기법에서는 RCMC

와 RMC를 각각 수행하며, 이에 따라 표적의 비 균일한 회전 운동에 의해 야기되는 모든 품질 저하 현상을 보상하는 전반적인 ISAR 신호 처리 체계가 확립되지 않은 상황이었다. 이에 본 논문에서는 RMC와 RCMC를 결합한, 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대한 고품질 ISAR 영상을 형성하는 처리 체계를 제안하였다. 제안된 처리 체계에서는 키스톤 변환을 활용하여 RCMC를 수행하고, 이어 RMC를 수행한다. 보상되지 않은 RCM 성분은 RMC의 고차 계수 추정 과정에 오차를 야기하므로 RCMC와 RMC를 순차적으로 수행하여 표적의 비 균일한 회전 운동에 의한 ISAR 영상의 품질 저하 현상을 모두 보상할 수 있다. 본 논문에서는 점 산란원 기반의 모의시험 및 실제 해상 표적에 대한 레이다 측정 데이터를 활용하여 제안된 처리 체계 적용 후 자가-회전 운동을 겪는 표적에 대한 고품질 ISAR 영상을 형성함을 확인하였다.

References

- [1] C. Özdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.
- [2] B. S. Kang, J. H. Bae, S. E. Chung, C. H. Kim, and K. T. Kim, "A study on the rotational motion compensation method for ISAR imaging," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 1, pp. 67-75, Jan. 2016.
- [3] X. Bai, R. Tao, Z. Wang, and Y. Wang, "ISAR imaging of a ship target based on parameter estimation of multicomponent quadratic frequency-modulated signals," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 2, pp. 1418-1429, May 2013.
- [4] Y. Li, R. Wu, M. Xing, and Z. Bao, "Inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion," *IET Radar, Sonar & Navigation*, 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 nonuniformly rotating target based on a fast parameter estimation algorithm of cubic phase signal," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 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," *IEE Proceedings - Radar, Sonar Navigation*, 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," *IET Signal Processing*, vol. 4, no. 4, pp. 329-342, Jul. 2009.
- [8] M. Xing, R. Wu, J. Lan, and Z. Bao, "Migration through resolution cell compensation in ISAR imaging," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 141-144, Apr. 2004.
- [9] 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.
- [10] B. S. Kang, M. J. Lee, B. H. Ryu, J. H. Baek, C. H. Kim, and K. T. Kim, "Comparisons of ISAR imaging methods for maritime targets with real measured radar data," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 9, pp. 740-748, Sep. 2017.
- [11] J. Wang, X. Liu, "Improved global range alignment for ISAR," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, no. 3, pp. 1070-1075, Jul. 2007.
- [12] S. H. Lee, J. H. Bae, M. S. Kang, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus technique using eigenimages," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, pp. 605-616, Feb. 2017.

유 보 현 [포항공과대학교/통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1256-3866>



2015년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학사)
2015년 3월~현재: 포항공과대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리, SAR/ISAR 이미징

이 명 준 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8073-2556>



2014년 8월: 한동대학교 전산전자공학부 (공학사)
2017년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2017년 3월~현재: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학박사)
[주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호처리, 레이더 표적 탐지

강 병 수 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0377-1321>



2012년 2월: 영남대학교 전자공학과(공학사)
2014년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과(공학석사)
2018년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)
2018년 3월~2018년 4월: 포항공과대학교

박사후 연구원

2018년 5월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, SAR/ISAR 이미징, SAR/ISAR Autofocus, SAR 검보정

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



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

자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

[주 관심분야] 레이더 표적인식, SAR/ISAR 이미징, 레이더 신호처리, 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정

강 기 봉 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-2846-3616>



2015년 2월: 부경대학교 전자공학과(공학사)
2017년 2월: 부경대학교 전자공학과(공학석사)
2017년 2월~2018년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 연구원
2018년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전

기공학과 박사과정

[주 관심분야] 레이더 표적식별, 레이더 신호처리, 미세도플러 분석 등