

해상 표적의 실제 레이다 측정 데이터를 이용한 ISAR 영상 형성 기법 성능 비교

Comparisons of ISAR Imaging Methods for Maritime Targets with Real Measured Radar Data

강병수 · 이명준 · 유보현 · 백진혁 · 김찬홍* · 김경태

Byung-Soo Kang · Myung-Jun Lee · Bo-Hyun Ryu · Jin-Hyeok Baek · Chan-Hong Kim* · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문에서는 X-밴드 대역에서 운영되는 레이다 장비를 이용하여 실제 이동하는 해상 표적을 대상으로 역합성 개구면 레이다(Inverse Synthetic Aperture Radar: ISAR) 영상 생성 기법들의 성능을 비교 분석하였다. 성능 비교에 사용된 ISAR 영상 생성 기법들은 1) 거리 순시 도플러(Range Instantaneous Doppler: RID) 기법, 2) 위상보상(phase adjustment) 수행 후의 거리 도플러(Range Doppler: RD) 기법, 그리고 3) 주요 산란원 기법(Prominent Point Processing: PPP) 수행 후의 RD 기법들이 있다. 본 논문에서 수행된 성능 비교 결과는 향후 실제 해상 이동 표적의 ISAR 영상 생성을 위한 기반 기술 확보 및 기본 프레임워크(frame work) 구축을 위한 지표를 제공한다는데 그 의의가 있다.

Abstract

In this paper, we compared performance of conventional inverse synthetic aperture radar(ISAR) imaging methods for maritime target with real data measured by X-band radar. Following conventional approaches were used for performance comparisons: 1) range instantaneous Doppler(RID) method, 2) range Doppler(RD) processing with phase adjustment, and 3) RD processing with prominent point processing(PPP). It is noteworthy that the comparison results have significance of providing basic concept to establish ISAR imaging frame work for maritime targets.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) Image, Maritime-target, Motion compensation(MOCOM), Radar Experiment

I. 서 론

레이다는 제2차 세계 대전 이후 군에서 사용하는 가장 중요한 센서 중 하나이다. 과거의 레이다 센서는 표적의 존재 유무만을 판별하는 기능을 하였지만, 최근 하드웨어

및 소프트웨어 기술이 발달함으로써 레이다를 이용한 표적의 영상 형성이 가능하게 되었다. 여기서, 표적에 대한 레이다 영상은 주야 및 날씨에 관계없이 표적의 고유 정보를 제공하기 때문에, automatic target recognition(ATR) 및 non-cooperative target recognition(NCTR)을 통한 표적의

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 레이다/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 July, 28, 2017 ; Revised September, 11, 2017 ; Accepted September, 11, 2017. (ID No. 20170728-071)

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

피아 식별을 보다 더 효율적으로 수행 가능하게 한다. 상기 레이더 영상 형성 시스템은 영상 형성을 위한 기하구조적 특징에 따라 합성 개구면 레이더(Synthetic Aperture Radar: SAR) 시스템과 역합성 개구면 레이더(Inverse SAR: ISAR) 시스템으로 분류된다^{[1],[2]}.

SAR 영상 시스템은 레이더를 항공기나 위성에 탑재하여 관심지역에 대한 레이더 영상을 얻는 시스템으로써, 넓은 지표면 영역에 대한 전장 정보를 획득하는데 활용된다. 현재 선진국에서는 레이더를 unmanned air vehicle(UAV), 혹은 위성에 탑재하여 고해상도의 SAR 영상을 획득하는 시스템을 운영하고 있다. 국내에서는 국방과학연구소를 중심으로 X-밴드 대역에서 운영되는 Korea miniature synthetic aperture radar(KOMSAR)에 대한 시험 및 제작에 성공한 경험을 가지고 있다.

SAR 영상 시스템과는 반대로 고정된 레이더가 이동하는 표적에 대한 레이더 영상을 획득하는 시스템을 ISAR 영상 시스템이라 한다. ISAR 영상 시스템은 지상의 추적용 레이더(tracking radar)를 이용하여 관심 있는 대공 혹은 해상 표적의 고해상도 레이더 영상을 제공함으로써 비협조(non-cooperative) 표적에 대한 피아 식별을 수행한다. 관련하여, 국내에서는 표적의 움직임 성분을 보상하여 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성하기 위한 신호처리 기법들을 모의실험으로써 검증한 연구 결과들이 발표되었다^[3]. 이와 더불어, 최근에는 실제 측정 데이터를 기반으로 한 ISAR 영상 형성 기술을 확립하기 위해, KOMSAR를 지상에 고정시킨 후 대공 표적의 ISAR 영상을 형성하는 연구가 수행되었다^[4]. 그러나 상기 연구들은 대부분 대공 표적에 대한 ISAR 영상 형성을 위한 것으로, 현재 국내에서는 해상 표적의 ISAR 영상 생성을 위한 실험 및 알고리즘 검증이 충분히 수행되어지고 있지 않다. 특히 국내의 경우, 삼면이 바다로 둘러싸인 지형적 조건으로 인해 해상상을 통해 침투하는 표적의 피아 식별의 중요성이 크기 때문에, 해상 표적에 대한 ISAR 영상 형성기술을 구축하는 것이 반드시 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 X-밴드 대역에서 운영되는 레이더 장비를 이용하여 실제 이동하는 해상 표적의 ISAR 영상을 형성하기 위한 실험을 수행하였다. 다음으로, 측정된 데이터를 이용하여 기존의 ISAR 영상 생성 기법들의

성능을 비교 분석하였다. 여기서, 성능 비교에 사용된 ISAR 영상 생성 기법들은 1) 거리 순시 도플러(Range Instantaneous Doppler: RID) 기법^{[5],[6]}, 2) 위상보상(phase adjustment) 수행 후의 거리 도플러(Range Doppler: RD) 기법^{[7],[8]}, 그리고 3) 주요 산란원 기법(Prominent Point Processing: PPP) 수행 후의 RD 기법이 있다^{[9],[10]}. 상기 실제 측정 데이터를 이용한 성능 비교 결과는 해상 표적의 ISAR 영상 생성을 위한 기반 기술 확보 및 기본 프레임워크(frame work) 구축을 위한 지표를 제공한다는 데 큰 의의가 있다.

II. 해상 표적의 ISAR 신호 모델

본 절에서는 이동하는 표적의 ISAR 영상 생성을 위한 수학적 신호 모델링에 관해 기술하며, 그림 1은 이동 표적의 ISAR 영상 형성을 위한 기하구조를 도시한다. 여기서, t 는 슬로우 타임(slow time)을, X , Y , 그리고 Z 축은 각각 거리(range) 방향, 수직거리(cross-range) 방향, 그리고 유효회전벡터 $\vec{\Omega}_{eff}(t)$ (Effective Rotation Vector: ERV)의 방향을 각각 나타낸다. 여기서, ERV의 방향은 표적의 회전 축 방향이며, X - Y 평면은 ISAR 영상 생성을 위한 2차원 영상 투영 평면(Image Projection Plane: IPP)이다. $r_p = [x_p, y_p, z_p]^T$ 는 표적 내 p 번째 산란원의 위치벡터를, $R_0(t)$ 와 ERV의 크기성분 $|\vec{\Omega}_{eff}(t)|$ 는 각각 이동 표적에 대한 병진운동 및 회전운동(rotational motion) 성분을 나타낸다.

상기 기하구조에서의 레이더 수신 신호에 대한 거리 압축(range compression) 및 거리 정렬(range alignment)이 수행된 후^[8], n ($n = 1, 2, \dots, N$)번째 레인지 bin에서의 레이더 수신신호는 식 (1)과 같이 정의된다^[11].

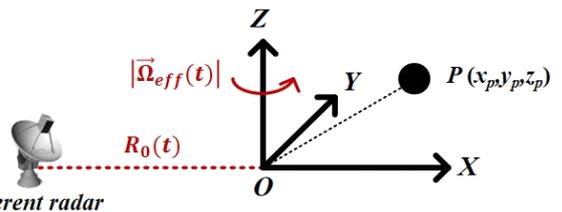


그림 1. ISAR 영상 형성을 위한 기하구조
Fig. 1. Geometry for ISAR imaging.

$$s_n(t) = \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp \left[-j \frac{4\pi f_c}{c} (R_o(t) + (x_k \cos[|\vec{\Omega}_{eff}(t)|] + y_k \sin[|\vec{\Omega}_{eff}(t)|])) \right]. \quad (1)$$

여기서, 거리 정렬 수행 후 L_n 개의 산란원들은 모두 동일한 거리 방향에 위치하기 때문에 $x_n = x_1 = \dots = x_{L_n}$ 으로 표기될 수 있다. 짧은 영상 합성 시간(Coherent Processing Interval: CPI) 동안 관측 각도의 변화량이 작다면, 상기 식 (1)은 아래의 식 (2)와 같이 근사된다.

$$s_n(t) = \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp \left[-j \frac{4\pi f_c}{c} (R_o(t) + x_n + y_k |\vec{\Omega}_{eff}(t)|) \right]. \quad (2)$$

해상 표적의 경우, 상기 식 (2)의 병진운동성분 $R_o(t)$ 및 회전운동성분 $|\vec{\Omega}_{eff}(t)|$ 는 식 (3)과 같이 고차 다항식의 형태로 표현된다.

$$R_o(t) = v_1 t + \frac{1}{2} v_2 t^2 + \frac{1}{6} v_3 t^3$$

$$|\vec{\Omega}_{eff}(t)| = \omega_1 t + \frac{1}{2} \omega_2 t^2 + \frac{1}{6} \omega_3 t^3 \quad (3)$$

상기 식 (3)을 식 (2)에 대입함으로써 $s_n(t)$ 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$s_n(t) = \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp \left[-j \frac{4\pi f_c}{c} (R_o(t) + x_n + y_k |\vec{\Omega}_{eff}(t)|) \right]$$

$$= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp \left[-j \frac{4\pi f_c}{c} ((v_1 + y_k \omega_1) t + \frac{1}{2} (v_2 + y_k \omega_2) t^2 + \frac{1}{6} (v_3 + y_k \omega_3) t^3) \right]. \quad (4)$$

상기 식 (4)에 있어서 t 에 대한 1차 다항식 항 $[(v_1 + y_k \omega_1) t]$ 은 수직거리 방향으로의 각 산란원들을 분해시키는데 필요한 성분이다. 그러나, t 에 대한 고차 다항식 성분 $[(v_2 + y_k \omega_2) t^2 / 2 + (v_3 + y_k \omega_3) t^3 / 6]$ 은 각 산란원들의 도플러 주파수를 시간에 따라 변하게 하고, 이는 ISAR 영상 형성 시 도플러 방향으로의 블러링(blurring)

을 초래한다. 따라서, 초점이 맞는 ISAR 영상을 생성하기 위해서는 각 산란원들의 도플러 주파수가 시간에 따라 변하는 문제를 해결하여야 한다.

III. 기존의 ISAR 영상 형성 기법들

산란원들의 시변 도플러 주파수 문제를 해결하는 기존의 기법들은 크게 다음의 세 가지로 분류 된다: 1) RID 기법, 2) 위상보상 수행 후의 RD 기법, 3) PPP 수행 후의 RD 기법. 본 절에서는 상기 기법들에 대한 각각의 특징을 간략히 기술한다.

3-1 RID 기법

RID 기법은 기존의 FT를 기반으로 수행되는 RD 기법 대신, short time Fourier transform(STFT)과 같은 시간-주파수(Time-Frequency: TF) 변환 기법을 이용하여 ISAR 영상을 생성하는 기법이다. 이들을 이용하여 ISAR 영상을 형성할 경우, 시변하는 산란원들의 도플러 주파수를 시간별 순시 도플러 주파수의 형태로 제공하는 3차원 RID 영상 큐브(cube)의 형태로써 형성된다^{[5],[6]}. RID 기법을 이용할 경우, $R_o(t)$ 및 $|\vec{\Omega}_{eff}(t)|$ 에 의해 기인된 시변 도플러 주파수의 영향을 최소화 할 수 있지만, RD 기법에 비해 도플러 방향으로의 해상도가 낮고, 3차원 영상 큐브 형성에 있어 계산 시간이 많이 소요된다.

3-2 위상보상 수행 후의 RD 기법

FT를 기반한 RD 기법을 이용하여 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성하기 위해서는 표적의 이동에 의해 기인된 고차 다항식 성분 $[(v_2 + y_k \omega_2) t^2 / 2 + (v_3 + y_k \omega_3) t^3 / 6]$ 이 보상되어야 한다. 상기 목적을 달성하기 위해, 위상보상 과정에서 식 (5)와 같이 모든 산란원들에 대해 동일한 보상 벡터 $[\psi_{comp}(t)]$ 를 이용하여 보상과정을 수행한다^{[7],[8]}.

$$s_n^{comp}(t) = s_n(t) \exp(j\psi_{comp}(t)). \quad (5)$$

여기서, 위상 보상 벡터 $\psi_{comp}(t)$ 는 형성된 ISAR 영상의 엔트로피(entropy) 최소화, 혹은 대조비(contrast) 최대화 과정을 통해 추정될 수 있다.

위상보상 과정에 있어 가장 큰 특징은 모든 산란원들

에 대해 동일한 보상 성분 $[\psi_{comp}(t)]$ 을 보상을 수행한다는 점이다. 식 (4)의 고차 항 성분에 있어 L_n 개의 모든 산란원들이 공통적으로 공유하는 고차 다항식 성분은 병진 운동성분에 의해 기인된 성분 $[v_2t^2/2 + v_3t^3/6]$ 으로, 이에 대한 보상을 병진운동보상이라고도 한다. 만약 CPI 동안 표적의 회전운동성분이 t 에 따라 선형적으로 변한다면 $|\vec{\Omega}_{eff}(t)| \approx \omega_1 t$, 위상보상 후 RD 기법을 수행함으로써 초점이 맞는 고품질 ISAR 영상을 형성할 수 있다. 그러나 위상보상 과정은 표적의 회전운동에 의해 기인된 고차 항 성분을 보상하지 못하기 때문에, 표적이 식 (3)과 같이 비균일 회전운동을 겪을 경우, 형성된 ISAR 영상의 품질이 저하되게 된다.

3-3 PPP 수행 후의 RD 기법

PPP는 두 개의 주요 산란원들의 위상함수를 추정한 후, 이들을 이용하여 표적의 이동에 의한 ISAR 영상의 도플러 블러링 현상을 보상하는 기법이다^{[9],[10]}. 여기서, 첫 번째 주요 산란원의 위상함수는 $R_o(t)$ 의 고차 다항식 성분을, 두 번째 주요 산란원의 위상함수는 $|\vec{\Omega}_{eff}(t)|$ 의 고차 다항식 성분을 보상하는데 사용된다. 즉, PPP는 표적의 병진운동 및 회전운동보상 과정을 모두 포함하는 ISAR 요동보상 기법이다. 따라서, 표적의 운동 형태에 관계없이 PPP는 $R_o(t)$ 및 $|\vec{\Omega}_{eff}(t)|$ 에 의해 기인된 고차 다항식 성분을 모두 보상함으로써, RD 과정 수행 시 고 해상도 ISAR 영상을 형성할 수 있게 한다.

IV. 실험절차

해상 표적의 레이더 측정 데이터를 기반한 ISAR 영상 형성 기법들의 성능 분석을 위해 고정된 위치에 위치한 레이더 장비를 이용하여 이동하는 선박에 대한 측정 실험을 수행하였다. 그림 2(a) 및 그림 2(b)는 레이더 장비를 이용하여 측정된 소형 선박과 대형 선박을 각각 도시한다. 여기서, 상기 선박들을 측정하기 위해 사용된 그림 3의 레이더 장비는 칩(chirp) 파형을 송신하는 펄스형 레이더(pulsed radar)이며, 이에 대한 자세한 사양은 표 1에 정리되어 있다.

선진국의 경우, 관심 이동 표적에 대하여 안테나가 지속적인 추적을 수행함으로써 신호를 수신하게 된다. 그러나 본 실험에서 사용된 레이더의 경우 추적기능이 없기 때문에, 참고문헌 [4]에서와 같이 안테나의 빔 방향을 미리 선



(a) 소형 선박
(a) Small ship



(b)대형 선박
(b) Large ship

그림 2. 해상 표적으로써 사용된 선박들
Fig. 2. Ships used as maritime-targets.



(a)안테나
(a) Antenna



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

그림 3. 레이더 장비
Fig. 3. Radar equipment.

표 1. 레이더 파라미터
Table 1. Radar parameters.

Frequency bandwidth	200 MHz
Pulse width	0.125 μ sec
Pulse repetition interval	8 kHz
Range resolution	0.75 m
Sampling frequency	500 MHz
Antenna beamwidth	3°

박의 이동 예상 경로에 지향하여 고정시켜 놓고 측정을 수행하였다. 레이더 측정 시, 이동하는 선박이 안테나의 메인 빔 폭 내에 들어오는 순간 측정이 시작되고, 메인 빔 폭을 빠져나가는 순간 측정이 종료된다. 여기서, 선박이 메인 빔 폭 내에 들어오는지에 대한 여부는 안테나 상단에 특수 제작되어 부착된 망원경을 통하여 확인할 수 있다(그림 3(a)).

레이더 장비를 이용하여 획득된 전체 수신 펄스들 중 특정 CPI 구간 내의 펄스들만을 사용하여 ISAR 영상을 형성하였다. 여기서, 선택된 CPI 구간의 길이에 따라 적게는 수천, 많게는 수만 개의 펄스들이 선택되게 된다. 상기 선택된 모든 펄스들을 이용하여 ISAR 신호처리를 수행하는 경우 연산량이 많아지게 된다. 따라서, 본 실험에서는 선택된 수신 펄스들에 대하여 일정한 펄스 간격으로의 다운 샘플링(down sampling)을 수행한 후, 정합필터링(matched filtering)을 통해 각 펄스별 1차원 고해상도거리측면도(High Resolution Range Profile: HRRP)을 형성하였다. 소형 선박 및 대형 선박의 HRRP들에 대하여 거리정렬 알고리즘^[11]을 적용한 후의 결과는 그림 4(a) 그리고 (b)에 각각 도시되어 있다. 상기의 거리압축 및 거리정렬이 수행된 데이터에 대하여 1) RID 기법^[5], 2) 위상보상^[6]수행 후의 RD 기법, 3) PPP^[7]수행 후의 RD 기법을 각각 적용함으로써, 각 기법들에 대한 성능을 복원된 영상의 품질 및 계산시간의 관점에서 비교 분석하였다.

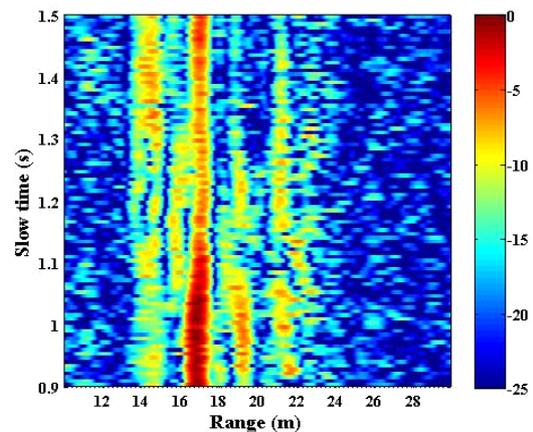
V. 실험결과

5-1 소형 선박의 ISAR 영상 형성 결과

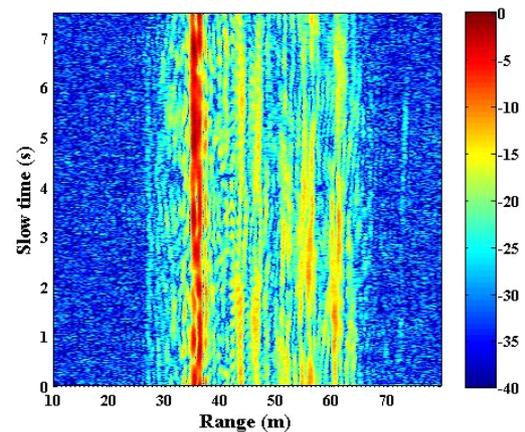
그림 5는 소형 선박의 레이더 측정 데이터에 대하여 1)

RID 기법, 2) 위상보상 수행 후의 RD 기법, 3) PPP 수행 후의 RD 기법을 적용한 ISAR 영상들을 각각 도시한다. 여기서, 표적의 움직임에 의한 고차 위상성분의 보상기법에 따라 도플러 방향으로의 초점중심(focusing center)이 달라지기 때문에, 각 영상이 서로 다른 도플러 구간에서 형성됨을 확인할 수 있다^{[11],[12]}.

RID는 전체 CPI 내에서의 일부 구간에 대한 데이터를 이용하여 각 산란원의 순시 도플러 주파수 특성을 도시하기 때문에, 그림 5(a)와 같이 도플러 방향으로 낮은 해상도를 가지게 된다. 이와 반대로 RD 기법의 경우 CPI 구

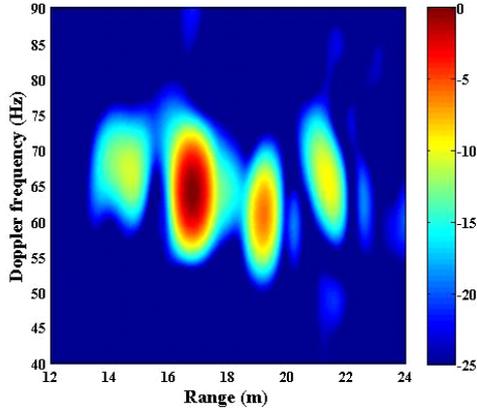


(a) 소형 선박의 HRRP 데이터
(a) HRRP data for small ship

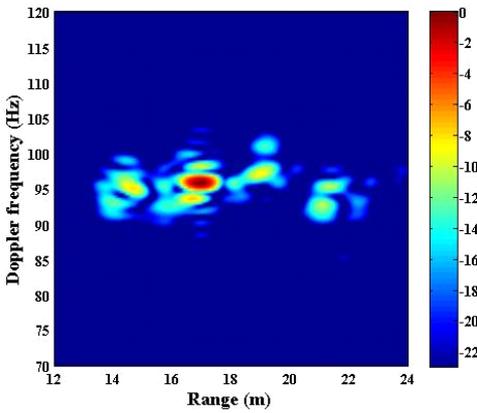


(b)대형 선박의 HRRP 데이터
(b) HRRP data for large ship

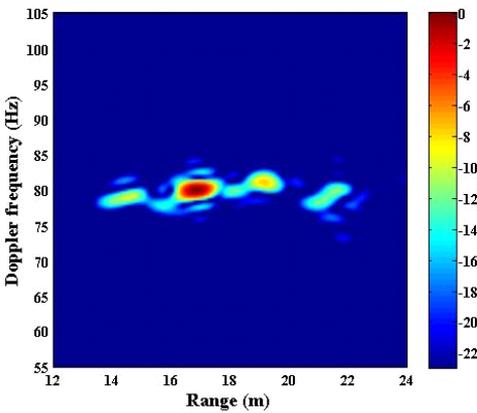
그림 4. 해상표적의 HRRP
Fig. 4. HRRPs for maritime target.



(a) RID 수행 결과
(a) Result for RID method



(b) 위상보상 후 RD 기법 수행 결과
(b) Result for RD method with phase adjustment



(c) PPP 후 RD 기법 수행 결과
(c) Result for RD method with PPP

그림 5. 소형 선박의 ISAR 영상 결과
Fig. 5. Results for small ship.

간의 모든 데이터를 사용하여 각 산란원의 도플러 주파수 특성을 도시하기 때문에, RID 기법에 비해 도플러 방향으로의 해상도가 높다(그림 5(b), 그림 5(c)).

그림 5(b)는 위상보상 후 RD 기법의 적용 결과이며, 그림 5(c)는 PPP 후 RD 기법의 적용 결과이다. 두 영상의 결과들 모두에서 소형 표적의 전자기적 특성 정보가 2차원 거리-도플러 평면에 도시되어 있다. 비록 본 실험에서 ISAR 영상의 경우, 위상보상 후 비균일 회전운동에 대한 극심한 블러링 현상이 나타나지는 않는다(그림 5(b)). 그러나 상기 비균일 회전성분은 ISAR 영상의 품질을 저하시키기 때문에, 그림 5(b)에 비해 그림 5(c)의 ISAR 영상 결과가 도플러 방향으로 초점이 더 잘 맞추어진 것을 확인할 수 있다.

형성된 영상의 ISAR 영상의 품질을 정량적으로 평가하기 위해 아래의 식 (6)의 영상 엔트로피(entropy)를 정의하였다.

$$E = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{|I(m,n)|^2}{S} \ln \left(\frac{S}{|I(m,n)|^2} \right). \quad (6)$$

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

$$S = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |I(m,n)|^2, \quad (7)$$

m 은 도플러 빈 인덱스, M 은 전체 도플러 빈 개수, n 은 레인지 빈 인덱스, 그리고 N 은 전체 레인지 빈 개수이다. 일반적으로, 상기 식 (6)에 정의된 ISAR 영상의 엔트로피가 낮을수록 초점이 잘 맞는 고품질 ISAR 영상으로써 평가된다^[6]. 표 2에는 그림 5의 ISAR 영상들에 대한 엔트로피들이 표기되어 있다. 대공표적과는 달리 해상 표적의 특성상 과도에 의해 식 (3)과 같이 고차항 성분이 포함된 비균일 회전운동을 겪게 된다. 따라서, 세 가지 기법들 중 병진운동 및 회전운동 보상을 모두 수행하는 PPP 기반의 RD 기법의 엔트로피 값이 가장 낮다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5의 결과들에 대한 계산 시간은 표 2에 각각 표기되어 있다. RID 기법의 경우, CPI 구간 내에서 시간의 변화에 따라 순차적으로 RID 영상들을 형성함으로써 3차원 영상 큐브를 제공한다. 이는 FT를 기반으로 수행되는 RD 기법에 비해 높은 연산량을 가지므로, 그림 5(a)에 대한

표 2. 소형 선박의 실험결과

Table 2. Experiment results for small ship.

	RID method	RD method after phase adjustment	RD method after PPP
Entropy	9.2733	8.9121	7.8912
Computation time	9.5996 s	0.1254 s	0.1430 s

표 3. 대형 선박의 실험결과

Table 3. Experiment results for large ship.

	RID method	RD method after phase adjustment	RD method after PPP
Entropy	9.6695	10.1226	9.3226
Computation time	222.0215 s	1.6611 s	0.3495 s

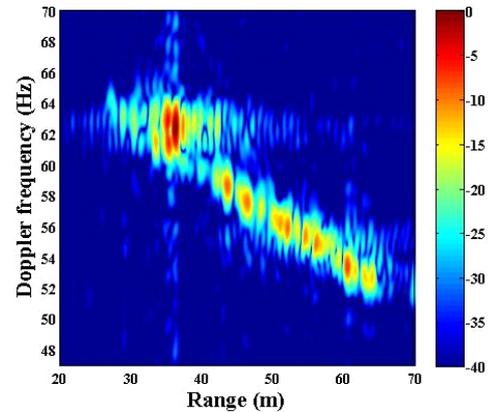
계산시간이 가장 느리다는 것을 확인할 수 있다. 반면, RD 기법을 기반으로 수행되는 그림 5(b), 그림 5(c)의 ISAR 영상 형성 기법들의 경우, 빠른 연산시간 내 ISAR 영상의 생성이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

5-2 대형 선박의 ISAR 영상 형성 결과

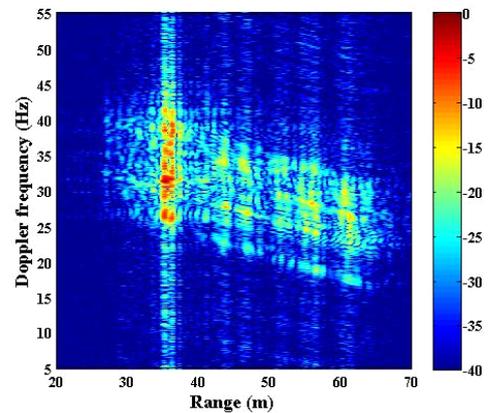
그림 6은 대형 선박의 레이다 측정 데이터에 대하여 상기 절에서 사용된 세 가지 기법들의 ISAR 영상 결과들을 도시하며, 이에 대한 결과는 표 3에 정리되어 있다.

소형 선박의 결과와 마찬가지로, 그림 6(a)의 RID ISAR 영상 결과는 도플러 방향으로의 해상도가 낮다는 것을 확인할 수 있다(엔트로피 9.6695). 그러나 대형 표적에 대한 위상보상 후 RD 기법 수행 결과는 그림 6(b)과 같이 도플러 방향으로의 극심한 블러링을 발생시킨다는 것을 확인할 수 있다(엔트로피 10.1226). 이는 본 대형 표적과 관련된 회전운동성분에 의한 고차 항 성분의 영향이 매우 크기 때문에, 병진운동 보상만을 수행하는 위상보상과정으로 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성할 수 없기 때문이다. PPP의 경우, 병진운동 및 회전운동 성분을 모두 보상하기 때문에, 세 가지 기법들 중 가장 좋은 품질의 ISAR 영상을 형성함을 확인할 수 있다(엔트로피: 9.3226).

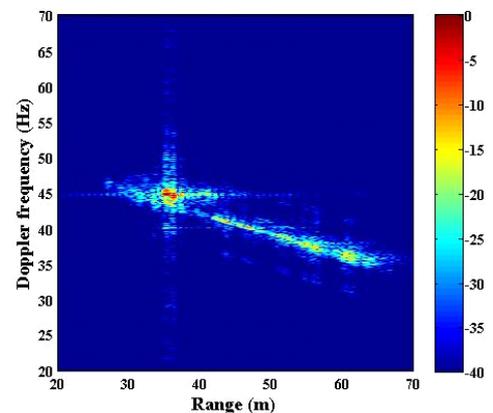
대형 선박의 실험에서 사용된 측정 데이터의 크기는 600×



(a) RID 수행 결과
(a) Result for RID method



(b) 위상보상 후 RD 기법 수행 결과
(b) Result for RD method with phase adjustment



(c) PPP 후 RD 기법 수행 결과
(c) Result for RD method with PPP

그림 6. 대형 선박의 ISAR 영상 결과

Fig. 6. Results for large ship.

700으로, 소형 선박의 데이터 크기 200×80보다 훨씬 더 크다. 상기 데이터 크기의 증가로 인해 표 3과 같이 ISAR 영상 생성 계산시간 또한 증가하게 된다. 특히 RID의 경우, 데이터 크기의 증가로 인해 3차원 RID 영상 큐브 형성을 위한 계산시간이 매우 느려짐으로써, 실시간 ISAR 영상 생성에서의 활용이 어렵다는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 X-밴드 대역에서 운영되는 레이더 장비를 이용하여 실제 이동하는 해상 표적을 대상으로 ISAR 영상 생성 기법들의 성능을 비교하였다. 성능 비교에 사용된 ISAR 영상 생성 기법들은 1) RID 기법, 2) 위상보상수행 후의 RD 기법, 그리고 3) PPP 수행 후의 RD 기법들이 있다.

RID의 경우, 각 산란원들의 순시 도플러 주파수를 이용하여 ISAR 영상을 생성함으로써, 시간이 변함에 따라 도플러 주파수가 변하는 문제를 해결하였다. 그러나, RID 기법을 이용하여 형성된 ISAR 영상의 경우, 도플러 방향으로의 해상도가 낮고(그림 5, 6(a)), 3차원 영상 큐브를 형성하는데 높은 연산량을 보이는 것을 확인할 수 있었다(표 2, 3). 위상보상 후 RD 기법을 수행한 결과의 경우, 표적이 일정한 변화량을 가지는 균일 회전운동을 겪는다면, 병진운동 성분의 보상을 통해 빠른 연산시간 내 고해상도의 ISAR 영상을 형성할 수 있었다. 일반적으로 대공 표적의 경우, 짧은 CPI 동안 표적은 균일 회전운동을 겪기 때문에, 병진운동 보상만을 수행함으로써 고품질 ISAR 영상을 형성할 수 있다. 그러나 해상표적의 경우, 과도에 의해 심한 자가-회전운동을 겪게 되고, 이는 표적의 극심한 비균일 회전운동을 초래하기 때문에, 위상보상 과정의 병진운동 보상만을 통해 고품질 ISAR 영상을 형성할 수 없다(그림 5, 6(b)). PPP는 주요 산란원들의 위상 정보를 이용하여 병진운동 및 회전운동 보상을 모두 수행함으로써, RD 기법 수행 후의 고품질 ISAR 영상을 형성 가능하게 한다. 해상표적이 비균일 회전운동을 겪게 되는 경우가 많다는 점을 고려해 보았을 때, PPP 후 RD 기법을 수행하는 것이 고품질 해상표적의 ISAR 영상을 효과적으로 형성 가능하게 한다는 것을 알 수 있었다(그림 5, 6(c)). 상기의 실험 결과는 향후 해상 표적의 ISAR 영상 생성을 위한 기반 기술 확보 및 기본 프레임워크 구축을 위한 지표

제공한다는 데 큰 의의가 있다.

References

- [1] V. C. Chen, M. Martorella,, "On bistatic inverse synthetic aperture radar", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 43, no. 3, pp. 1125-1134, Jul. 2007.
- [2] C. Ozemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*, New York: Wiley, 2012.
- [3] 배준우, 김경태, 이진호, 이정흠, "엔트로피 기반의 ISAR 자동초점기법에 대한 성능 분석", *한국전자과학회논문지*, 17(12), pp. 1249-1258, 2006년 12월.
- [4] 김경태, 정호령, "KOMSAR를 이용한 실제 항공기 ISAR 영상 제작", *한국전자과학회논문지*, 18(7), pp. 717-722, 2007년 7월.
- [5] V. C. Chen, W. J. Miceli, "Time-varying spectral analysis for radar imaging of maneuvering targets", *IEE Proc. Radar, Sonar Navigat.*, vol. 145, no. 5, pp. 262-268, Oct. 1998.
- [6] Z. Bao, C. Sun, and M. D. Xing, "Time-frequency approaches to ISAR imaging of maneuvering targets and their limitations," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 37, no. 7, pp. 1091-1099, Jul. 2001.
- [7] 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.
- [8] X. Li, G. Liu, and J. Ni, "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 35, no. 4, pp. 1240-1251, Oct. 1999.
- [9] S. Werness, W. Carrara, L. Joyce, and D. Franczak, "Moving target imaging algorithm for SAR data", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 26, no. 11, pp. 57-67, Jan. 1990.
- [10] Y. Wang, H. Ling, and V. C. Chen, "ISAR motion compensation via adaptive joint time-frequency technique", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 670-677, Apr. 1998.
- [11] D. Zhu, L. Wang, Q. Tao, and Z. Zhu, "ISAR range alignment by minimizing the entropy of the average range profile", *In Proceedings of IEEE Radar Conference 2006*, NY, USA, pp. 813-818, 2006.

강 병 수



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

백 진 혁



2015년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2015년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2017년 3월~현재: 포항공과대학교 창의 IT 융합공학과 연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리

이 명 준



2014년 8월: 한동대학교 전산전자공학부 (공학사)
2017년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2017년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 레이더 탐지 및 식별

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] 레이더 시스템, 위상배열안테나, 레이더 표적 특성

유 보 현



2015년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
2015년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 통합과정
[주 관심분야] 레이더 영상

김 경 태



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

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
2012년 9월~현재: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장
[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리, 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정