

바이스태틱 ISAR 영상 형성을 위한 회전운동보상 기법 연구

A Study on Rotational Motion Compensation Method for Bistatic ISAR Imaging

강 병 수 · 유 보 현 · 김 경 태

Byung-Soo Kang · Bo-Hyun Ryu · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문에서는 바이스태틱 역합성 개구면 레이더(Bistatic ISAR: Bi-ISAR) 영상 형성에 적합한 회전운동보상(Rotational Motion Compensation: RMC) 기법을 제안한다. 이를 위해 추적된 표적의 궤적, 송신기, 수신기의 위치정보들을 이용하여 바이스태틱 각도 변화에 의해 기인된 기하학적 왜곡 현상을 보상한다. 다음으로, 관측각도의 변화율을 일정하게 하는 새로운 시간변수를 정의한 후, 보간법을 통해 기 정의된 시간 변수에 대한 레이더 신호를 획득함으로써 RMC를 수행한다. 이에 대한 결과로, Bi-ISAR 기하구조에서 표적의 비균일 회전성분을 적절히 보상함으로써 초점이 맞는 Bi-ISAR 영상을 획득할 수 있다. 바이스태틱 기하구조에서 기동하는 비행기 모델 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안된 Bi-ISAR RMC 기법의 효용성을 검증하였다.

Abstract

In this paper, we propose a rotational motion compensation(RMC) for bistatic inverse synthetic aperture radar(Bi-ISAR) imaging. For this purpose, geometry-error, caused by changes of bistatic-angle, is removed using known position information of a transmitter, a receiver, and target trajectories. Next, RMC is performed to compensate non-uniform rotational motion error by reformatting radar signal in terms of a newly defined slow time variable that converts non-uniform rotational motion into uniform one. Simulation results using an aircraft model composed of ideal point scatterers validate the efficacy of the proposed Bi-ISAR RMC method.

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

I. 서 론

일반적으로 역합성 개구면 레이더(Inverse Synthetic Aperture Radar: ISAR) 영상 시스템의 경우, 송/수신기가 동일한 위치에 위치한 모노스태틱(monostatic) 레이더 시스템을 기반으로 구축된다. 그러나 모노스태틱 ISAR(Mono-

static-ISAR: Mo-ISAR) 시스템에서 표적이 레이더 가시선(Radar Line of Sight: RLOS) 방향으로 이동할 경우, 영상 형성에 필요한 충분한 관측 각도를 확보할 수 없다. 또한 모노스태틱 레이더를 이용하여 저피탐 표적을 관측할 경우, 레이더 수신신호의 신호 대 잡음 비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)가 크게 줄어들기 때문에 표적의 탐지 및 ISAR

「이 연구는 2016학년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2015R1A2A2A01003645).」
포항공과대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)
· Manuscript received July 11, 2017 ; Revised August 2, 2017 ; Accepted August 3, 2017. (ID No. 20170711-064)
· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

영상 형성이 어렵게 된다. 상기 문제점들을 해결하기 위해, 최근 송/수신기가 공간적으로 분리되어 분포된 바이스태틱(bistatic) 레이더 시스템을 기반으로 한 ISAR 영상을 형성하는 연구가 활발히 진행 중에 있다^{[1]-[4]}.

Mo-ISAR 영상 형성 시스템과 마찬가지로, 바이스태틱 ISAR(bistatic-ISAR: Bi-ISAR) 영상 시스템 내 기동하는 표적의 움직임 성분은 1) 병진운동(translational motion) 성분과 2) 회전운동(rotational motion) 성분으로 나뉜다. 여기서, 병진운동과 회전운동은 각각 RLOS 방향으로의 움직임 성분, 그리고 레이더 관측각도의 변화에 기인하는 표적의 회전성분으로써 정의된다. 여기서, 상기 두 운동성분 중 Bi-ISAR 영상 형성에 필요한 운동성분은 관측 각도의 변화율이 일정한 균일 회전운동성분이다.

Bi-ISAR 영상 형성 시스템 내에서의 병진운동성분에 대한 보상은 기존의 Mo-ISAR 시스템에서 사용되던 보상 기법들을 통해 수행될 수 있다^{[1][2]}. 따라서 표적의 관측 각도 변화율이 일정할 경우, Mo-ISAR 시스템에서 사용되던 병진운동 보상 기법들^{[5]-[7]}을 통해 병진운동성분을 보상함으로써 초점이 맞는 Bi-ISAR 영상을 형성할 수 있다. 그러나 표적이 극심한 가속 혹은 감속운동을 겪게 될 경우 레이더 관측 각도의 변화율이 일정하지 않게 된다. 이는 Bi-ISAR 영상 내 도플러 방향으로의 초점을 흐리게 하는 요인이 되므로, 고품질의 Bi-ISAR 영상을 형성하기 위해서는 표적의 병진운동보상 후 회전운동보상(Rotational Motion Compensation: RMC)을 추가적으로 수행하여야 한다.

그러나 병진운동보상과는 달리, 기존의 Mo-ISAR 시스템에서 사용되던 RMC 기법들^{[8],[9]}은 Bi-ISAR 시스템에서의 비 균일 회전운동성분을 보상할 수 없다. 기존의 RMC 기법들을 수행함에 있어 가장 중요한 특징은, 표적 내 산란원(scatterer)들의 위상함수가 서로 선형 관계에 있어야 한다는 것이다. Mo-ISAR 시스템의 경우, 영상 합성 시간(Coherent Processing Interval: CPI)동안 영상 투영 평면(Image Projection Plane: IPP)의 방향이 일정하다면, 산란원들의 위상함수들은 서로 선형적인 관계를 가지게 된다. 그러나 Bi-ISAR의 경우, 바이스태틱 각도(bistatic-angle) 변화에 의해 기하학적 왜곡(geometry error) 현상이 발생하게 되고, 이는 산란원들의 위상함수 간 비선형적인 관계를 초래한다. 이는 기존의 Mo-ISAR RMC 기법들을 통해

Bi-ISAR 기하구조에서 표적의 비균일 회전성분을 보상하지 못하게 하므로, 비균일 회전성분을 가지는 표적에 대한 Bi-ISAR 영상의 초점을 저하시키게 된다.

본 논문에서는 Bi-ISAR 시스템에 적합한 RMC 과정을 제안하였다. 제안된 과정에서는 송신기, 수신기 그리고 레이더에 의해 추적된 표적의 위치정보들을 이용하여 시간의 변화에 따른 바이스태틱 각도를 획득하였다. 다음으로, 상기 획득된 정보를 이용하여 Bi-ISAR 내 기하학적 왜곡성분을 보상함으로써, 산란원들 간의 위상이 서로 선형적인 관계가 되도록 하였다. 마지막으로, 관측각도의 변화율을 일정하게 하는 새로운 시간변수를 정의한 후, 보간법을 통해 기 정의된 시간 변수에 대한 레이더 신호를 획득함으로써 관측 각도의 변화율이 일정하지 않은 표적의 비균일 회전운동성분에 대한 문제를 해결하였다.

II. Bi-ISAR 신호 모델

본 절에서는 Bi-ISAR 시스템 내 레이더 수신신호의 수학적 모델링에 관해 기술하며, 그림 1은 Bi-ISAR 영상 형성을 위한 기하구조를 도시한다. 상기 기하구조에서 거리 압축(range compression) 및 거리 정렬(range alignment)이 수행된 후, n 번째 레인지 bin에서의 레이더 수신신호는 아래의 식 (1)과 같이 정의된다^[1].

$$s_n^{BI}(t) = \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp \left[j \frac{2\pi f_c}{c} (R_{BI}(t) + K(t)(x_k + y_k \Omega(t))) \right]. \quad (1)$$

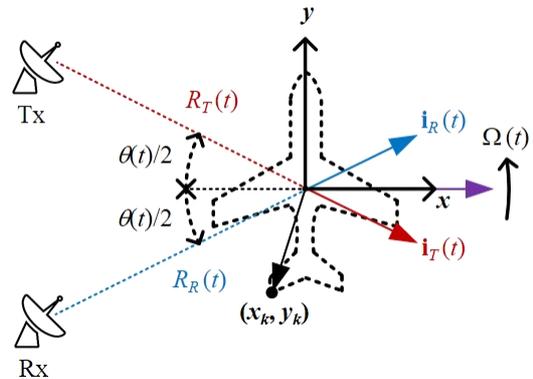


그림 1. Bi-ISAR 영상 형성 기하구조
Fig. 1. Geometry for Bi-ISAR imaging.

여기서, c 는 빛의 속도, f_c 는 레이더 중심주파수, $k = 1, 2, \dots, L_n$ 은 n 번째 레인지 bin 내 존재하는 산란원의 인덱스(index), 그리고 L_n 은 n 번째 레인지 bin 내 전체 산란원의 개수를 나타낸다. $R_{BI}(t) = R_T(t) + R_R(t)$ 와 $\Omega(t)$ 는 각각 Bi-ISAR 기하구조 내 표적의 병진운동성분 그리고 회전운동성분이고, t 는 슬로우 타임(slow time) 방향으로의 시간 변수이다. A_k 는 k 번째 산란원에 대한 반사계수(reflectivity), (x_k, y_k) 는 k 번째 산란원의 거리 및 수직 거리 방향으로의 위치정보이다. 상기 식 (1)에 있어서, $K(t)$ 는 아래의 식 (2)와 같이 정의되며, 이는 바이스테틱 각도 $\theta(t)$ 변화에 따른 Bi-ISAR 영상 형성을 위한 기하구조의 변화를 제공한다.

$$K(t) = 2\cos\left[\frac{\theta(t)}{2}\right] \simeq K_0 + K_1t + K_2t^2. \quad (2)$$

여기서, 바이스테틱 각도 $\theta(t)$ 는 송신기(Tx)에 대한 RLOS[$\mathbf{i}_T(t)$]와 수신기(Rx)에 대한 RLOS[$\mathbf{i}_R(t)$] 간의 각도 변화이다.

Mo-ISAR 영상 형성과정과 같이, Bi-ISAR 영상 형성을 위해서는 상기 식 (1)의 병진운동성분 $R_{BI}(t)$ 에 대한 보상이 수행되어야 하며, 이는 기존의 Mo-ISAR 영상 형성을 위해 개발된 병진운동보상 기법들을 통해 수행될 수 있다. 병진운동보상 후의 Bi-ISAR 수신신호는 아래의 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} s_n^{BI}(t) &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp\left[j\frac{2\pi f_c}{c}(K(t)(\Delta x_k + \Delta y_k \Omega(t)))\right] \\ &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp[jh_k^{BI}(t)]. \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $h_k^{BI}(t) = 2\pi f_c(K(t)(x_k + y_k \Omega(t)))/c$ 는 바이스테틱 기하구조 내 k 번째 산란원에 대한 위상신호, $\Delta x_k = x_k - x_{focus}$ 그리고 $\Delta y_k = y_k - y_{focus}$ 는 각각 병진운동보상을 위한 기준점(x_{focus}, y_{focus})에 대한 (x_k, y_k) 의 상대적 위치 정보이다.

Mo-ISAR 레이더 수신신호 모델과 비교했을 때, Bi-ISAR 영상 형성을 위한 레이더 수신신호의 가장 큰 특징은 바이스테틱 각도 변화에 의해 기인된 $2\pi f_c K(t) \Delta x_k / c$

항에 있다. 이는 Bi-ISAR 영상 내 표적의 기하학적 형태의 왜곡을 초래하며, Bi-ISAR 영상 형성을 이용한 표적의 피아 식별 성능을 저하시키는 요인이 된다^{[2],[3]}. 상기 $K(t)$ 에 의한 Bi-ISAR 기하구조의 기하학적 왜곡 보상을 위해 다양한 연구들이 진행되었으며, 개발된 기법들은 Bi-ISAR 영상의 기하 왜곡에 대한 보상을 효율적으로 수행한다.

이와 더불어, $K(t)$ 는 각 산란원들의 도플러 주파수를 t 의 변화에 따라 변화시키기 때문에, 점산란강도함수(Point Spread Function: PSF)의 수직거리 방향에 대한 초점저하 현상을 야기한다. 그러나 문헌 [3]에 따르면 $K(t)$ 에 의한 산란원들의 도플러 주파수 변화는 미비하기 때문에, 일반적인 Bi-ISAR 영상 형성 시나리오에서 PSF의 초점 저하는 무시할 수 있다는 분석 결과를 제시하였다.

병진운동보상 및 $K(t)$ 에 의한 기하 왜곡 보상을 수행한 후, 표적이 균일 회전운동 [$\Omega(t) = \omega_1 t$]을 가진다면, 식 (3)의 t 에 대한 푸리에 변환(Fourier transform: FT)을 수행함으로써 초점이 맞는 Bi-ISAR 영상을 형성할 수 있다. 그러나 표적이 비균일 회전운동을 겪게 될 경우, [$\Omega(t) = \omega_1 t + \omega_2 t^2 / 2$], 각 산란원에 대한 도플러 주파수가 t 에 따라 변하기 때문에, t 에 대한 FT를 수행할 경우, Bi-ISAR 영상의 초점이 흐려지게 된다. 이를 해결하기 위해 TMC 수행 후, 추가적인 RMC 과정을 통해 비균일 회전운동성분을 보상해야 하지만, Mo-ISAR 영상 형성을 위해 개발된 기존의 RMC 기법들은 Bi-ISAR 기하구조 내에서의 표적의 비균일 회전운동성분을 보상할 수 없다.

III. Mo-ISAR 영상 형성을 위한 RMC

본 절에서는 Mo-ISAR 영상 형성을 위해 개발된 기존의 RMC 기법들이 Bi-ISAR 기하구조에서 적용될 수 없는 이유에 관해 기술하며, 이를 위해 먼저 Mo-ISAR RMC의 기본 원리를 설명한다.

Mo-ISAR 영상 형성을 위한 기하구조는 그림 1에서 Tx 및 Rx를 공간적으로 동일한 위치에 위치시킴으로써 구축될 수 있다. 상기 Mo-ISAR 기하구조에서는 $\theta(t) = 0$, 그리고 $K(t) = 2$ 가 되므로, TMC 수행 후 n 번째 레인지 bin에서의 레이더 신호는 다음의 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 s_n^{MO}(t) &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp \left[j \frac{4\pi f_c}{c} (\Delta x_k + \Delta y_k \Omega(t)) \right] \\
 &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp \left(j \frac{4\pi f_c}{c} \Delta x_k \right) \\
 &\quad \exp \left[j \frac{4\pi f_c}{c} (\Delta y_k \Omega(t)) \right] \\
 &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp \left(j \frac{4\pi f_c}{c} \Delta x_k \right) \exp [j h_k^{MO}(t)].
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, $h_k^{MO}(t) = 4\pi f_c \Delta y_k \Omega(t) / c$ 는 모노스테틱 기하구조 내 k 번째 산란원에 대한 위상신호이다. 식 (4)에서 Mo-ISAR 기하구조 내 산란원들의 위상신호 $h_k^{MO}(t)$ ($k = 1, 2, \dots, L_n$)들 간에는 식 (5)와 같이 서로 선형관계를 가진다.

$$\frac{1}{\Delta y_1} h_1^{MO}(t) = \dots = \frac{1}{\Delta y_k} h_k^{MO}(t) = \dots = \frac{1}{\Delta y_{L_n}} h_{L_n}^{MO}(t). \tag{5}$$

식 (5)에 대하여 $k = q$ 번째 산란원에 대한 위상신호 [$h_q^{MO}(t)$]를 획득한 후, 이를 시간의 변화에 따라 선형적으로 만들 경우, 위상신호들 간의 선형관계로 인해 그림 2와 같이 표적 내 존재하는 모든 산란원들의 위상신호가 자동적으로 시간에 따라 선형적으로 변하게 된다. 이는 기존의 Mo-ISAR RMC의 수행에 대한 기본 원리로써^[10], 상기 식 (5)의 위상 신호들 간 선형 관계는 산란원들의 비균일 회전운동 [$\Omega(t) = \omega_1 t + \omega_2 t^2 / 2$]을 균일 회전운동 [$\Omega(t) = \omega_1' t$]으로 변환시키는 중요한 요소이다.

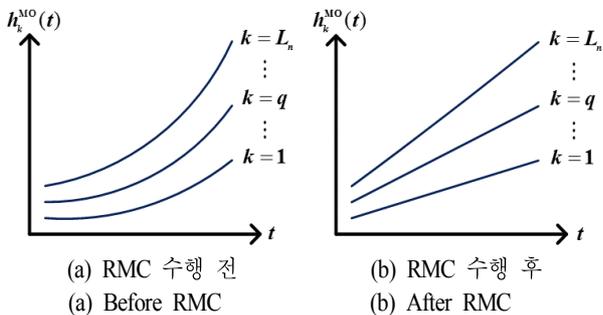


그림 2. Mo-ISAR 기하구조에서 RMC 수행 전, 후의 위상함수

Fig. 2. Phase signal in Mo-ISAR configuration.

그러나 Bi-ISAR 시스템의 경우, 바이스태틱 각도 변화에 의해 기인된 $2\pi f_c K(t) \Delta x_k / c$ 항에 의해 산란원들이 식 (6)과 같이 서로 선형관계를 가지지 않게 된다.

$$\frac{1}{\Delta y_1} h_1^{BI}(t) \neq \dots \neq \frac{1}{\Delta y_k} h_k^{BI}(t) \neq \dots \neq \frac{1}{\Delta y_{L_n}} h_{L_n}^{BI}(t). \tag{6}$$

이로 인해, Bi-ISAR 시스템 내에서는 그림 3과 같이 $h_q^{BI}(t)$ 를 시간에 따라 선형적으로 변환시키더라도, 나머지 산란원들에 대한 비균일 회전운동 성분들은 보상될 수 없다. 이에 대한 결과로, 그림 3(b)와 같이 $h_q^{BI}(t)$ 를 제외한 나머지 산란원들의 위상 신호는 시간의 변화에 따라 비선형적으로 변하게 된다. 따라서, Bi-ISAR 기하구조 내 표적의 비균일 회전운동 성분은 기존의 Mo-ISAR RMC를 통해 보상할 수 없으며, Bi-ISAR 레이다 신호 특성에 맞는 새로운 RMC 기반 체계가 확립되어야 한다.

IV. Bi-ISAR RMC

Bi-ISAR 기하구조에서 Mo-ISAR RMC가 수행될 수 없는 이유는 바이스태틱 기하 왜곡 항 $2\pi f_c K(t) \Delta x_k / c$ 에 의한 산란원의 위상들 간 비선형 관계 때문이다(식 (6)). 따라서, 제안된 RMC 기법에서는 $2\pi f_c K(t) \Delta x_k / c$ 항에 대한 보상을 먼저 수행한 후, 표적의 비균일 회전운동을 회전운동으로 변환시키는 과정을 수행한다.

일반적으로 레이다 시스템에서는 표적의 이동 궤적에 대한 추적이 가능하다. 또한 Tx 및 Rx의 위치는 고정되어

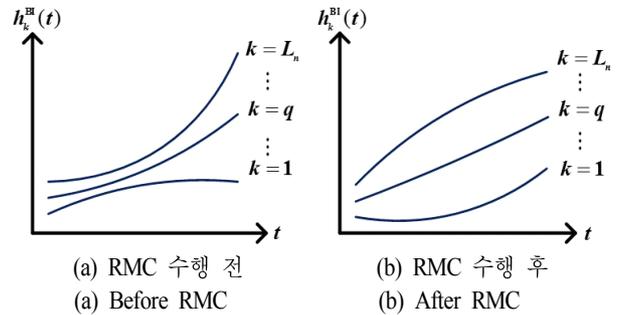


그림 3. Bi-ISAR 기하구조에서 RMC 수행 전, 후의 위상함수

Fig. 3. Phase signal in Bi-ISAR configuration.

있으므로, 추적된 표적의 궤적, Tx, 그리고 Rx의 위치정보들을 이용함으로써, 시간의 변화에 따른 바이스태틱 각도 변화 $\theta(t)$ 를 획득할 수 있다. 이는 $2\pi f_c K(t)\Delta x_k/c$ 항 내 $K(t)$ 항을 식 (2)를 통해 획득 가능하게 한다. 또한 병진운동 수행 후 n 번째 레인지 bin에 존재하는 산란원들의 거리 정보 $\Delta x_k = x_k - x_{focus}$ 는 이산 레인지 bin의 형태로 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\Delta x_k = x_k - x_{focus} = (n - n_{focus})dx. \quad (7)$$

여기서, $dx = c/(K(0)f_{bw})$ 는 바이스태틱 기하구조 내 거리 방향 해상도, f_{bw} 는 레이다 대역폭, n_{focus} 는 병진운동보상 시 사용되는 기준 레인지 bin 이다. 상기 식 (7)에 있어서 n , n_{focus} , 그리고 f_{bw} 모두 사용자에게 주어지는 정보이므로, 각 레인지 bin 별 산란원들의 거리 Δx_k 를 획득할 수 있다. 따라서, 주어진 $K(t)$, 그리고 Δx_k 를 통해 식 (8)과 같이 바이스태틱 기하 왜곡 항에 대한 보상을 수행할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{s}_n^{BI}(t) &= s_n^{BI}(t) \exp[-j \frac{2\pi f_c}{c} K(t) \Delta x_k] \\ &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp[j \frac{2\pi f_c}{c} K(t) \Delta y_k \Omega(t)] \\ &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp[j \bar{h}_k^{BI}(t)]. \end{aligned} \quad (8)$$

상기 식 (8)에서 기하왜곡이 보상된 후의 산란원들 간 위상 신호는 식 (9)와 같이 서로 선형 관계를 가지고, 이는 비균일 회전운동성분의 보상을 수행 가능하게 한다.

$$\frac{1}{\Delta y_1} \bar{h}_1^{BI}(t) = \dots = \frac{1}{\Delta y_k} \bar{h}_k^{BI}(t) = \dots = \frac{1}{\Delta y_{L_n}} \bar{h}_{L_n}^{BI}(t). \quad (9)$$

다음으로 크기-정규화 분산(amplitude normalized variance)를 이용하여 주요 산란원(prominent scatterer)이 존재하는 레인지 bin을 선택한 후, 선택된 레인지 bin에 대하여 위상정렬(phase unwrapping) 기법을 적용함으로써 주요 산란원에 대한 위상신호 $\bar{h}_{prmnt}^{BI}(t)$ 를 획득한다^[7]. 여기서, Bi-ISAR 기하왜곡 항이 보상되었기 때문에 $\bar{h}_{prmnt}^{BI}(t)$ 와 $\bar{h}_k^{BI}(t)$ 는 서로 선형적인 관계에 있게 된다($\bar{h}_{prmnt}^{BI}(t)/$

$\Delta y_{prmnt} = \bar{h}_k^{BI}(t)/\Delta y_k$). 따라서 획득된 $\bar{h}_{prmnt}^{BI}(t)$ 에 대한 역함수 $\tau = [\bar{h}_{prmnt}^{BI}(t)]^{-1}$ 를 정의한 후, $\bar{s}_n^{BI}(t)$ 를 τ 에 대하여 재구성(reformatting)할 경우, 식 (10)과 같이 모든 산란원들의 위상신호는 시간에 따라 선형적으로 변하게 된다.

$$\begin{aligned} \bar{s}_n^{BI}(\tau) &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp[j \bar{h}_k^{BI}(\tau)] \\ &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp\left[j \frac{\Delta y_k}{\Delta y_{prmnt}} \bar{h}_{prmnt}^{BI}(\tau)\right] \\ &= \sum_{k=1}^{L_n} A_k \exp\left[j \frac{\Delta y_k}{\Delta y_{prmnt}} t\right]. \end{aligned} \quad (10)$$

이에 대한 결과로, t 에 대한 푸리에 변환(Fourier Transform: FT) 수행 시 초점이 맞는 Bi-ISAR 영상을 획득할 수 있다.

V. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 Bi-ISAR 기하구조에서 관측 각도의 변화율이 일정하지 않은 표적에 대한 RMC 수행 결과를 보인다. 이를 위해 본 시뮬레이션에서는 그림 4에 도시된 Bi-ISAR 기하구조에서 이동하는 점 산란 비행기 모델(그림 5)의 레이다 수신신호를 획득하였으며, 이에 대한 시뮬레이션 파라미터들은 표 1에 정리되어 있다.

표적에 대한 Bi-ISAR 수신 신호에 대하여, 각 버스트별 1차원 고해상도 거리측면도(High Resolution Range Pro-

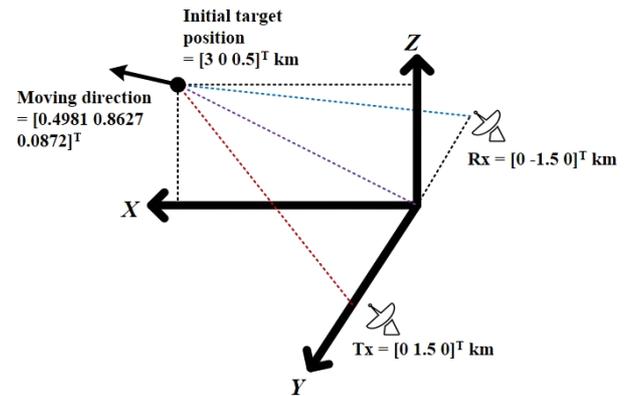


그림 4. 이동 표적에 대한 Bi-ISAR 영상 형성 기하구조
Fig. 4. Geometry for Bi-ISAR imaging for a moving target.

file: HRRP)을 형성한 후, 거리정렬 및 자동초점 기법을 수행함으로써 병진운동성분을 보상하였다. 여기서, 표적은 그림 6과 같이 비균일 회전운동성분을 가지기 때문에, RMC를 수행하지 않을 경우, 그림 7과 같이 도플러 방향으로 블러링된 Bi-ISAR 영상이 형성된다. 또한 Mo-ISAR 영상 형성을 위해 개발된 RMC 기법을 수행할 경우, 산란원들의 위상 간 비선형 관계에 의해 비균일 회전운동성분의 보상이 적절히 이루어지지 못하게 되기 때문에, 그림 8과 같이 Bi-ISAR 영상의 블러링을 적절히 보상할 수 없게 된다. 반면에, 제안된 Bi-ISAR RMC 기법을 수행할 경우, 바이스태틱 기하왜곡 항에 대한 보상을 수행하므로

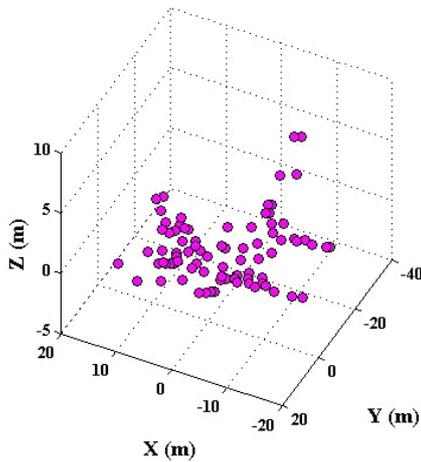


그림 5. 비행기 모델
Fig. 5. An aircraft model.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters.

Carrier frequency	10 GHz
Frequency bandwidth	500 MHz
Signal to noise ratio	30 dB
Location of Tx	$[0 \ 1.5 \ 0]^T$ km
Location of Rc	$[0 \ -1.5 \ 0]^T$ km
Initial location of the target	$[3 \ 0 \ 0.5]^T$ km
Target moving direction	$[0.4981 \ 0.8627 \ 0.0872]^T$
Target moving velocity	100 m/s
Target moving acceleration	20 m/s ²
Target moving jerk	10 m/s ³

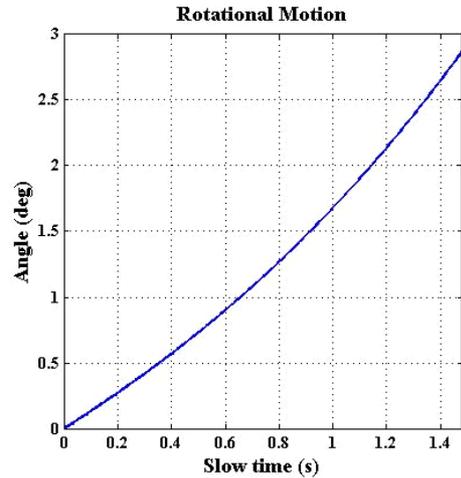


그림 6. 표적의 비균일 회전운동성분
Fig. 6. Non-uniform rotational motion of a target.

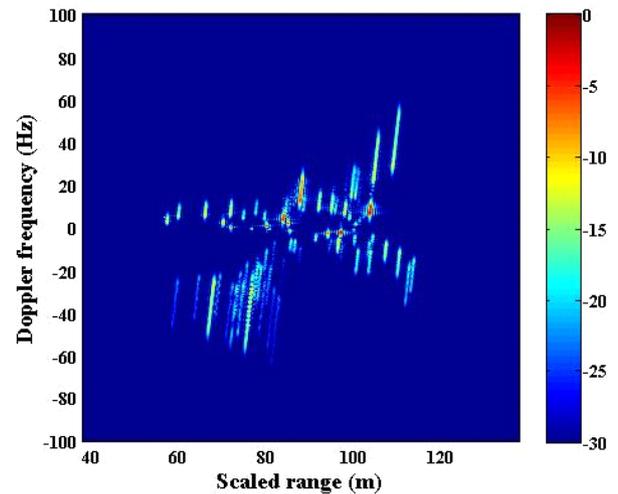


그림 7. RMC 수행 전 Bi-ISAR 영상
Fig. 7. A Bi-ISAR image before RMC.

써 비균일 회전운동성분에 대한 보상을 정확히 수행 가능하게 한다. 따라서, 제안된 RMC 기법을 수행할 경우, 그림 9와 같이 초점이 맞는 Bi-ISAR 영상이 형성됨을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

기존의 Mo-ISAR RMC를 이용할 경우, 산란원들의 위상 간 비선형 관계에 의해 Bi-ISAR 기하구조에서 표적의

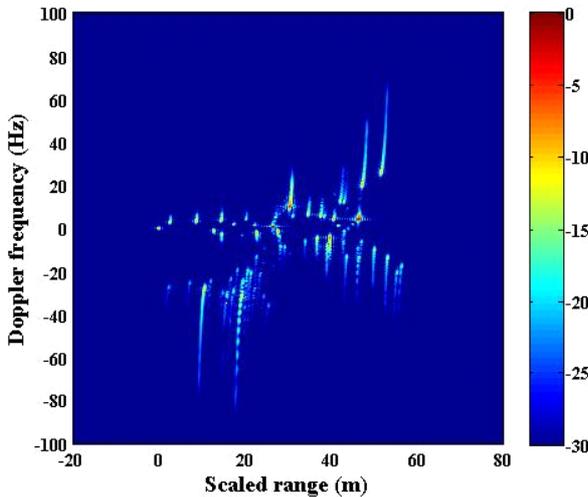


그림 8. Mo-ISAR RMC 수행 후 Bi-ISAR 영상
Fig. 8. A Bi-ISAR image after Mo-ISAR RMC.

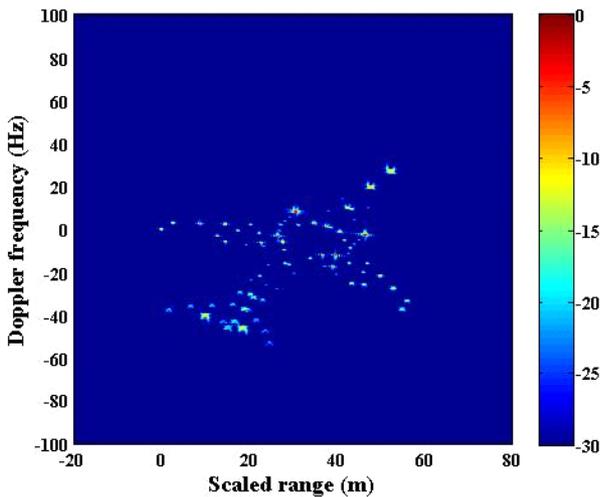


그림 9. 제안된 RMC 수행 후 Bi-ISAR 영상
Fig. 9. A Bi-ISAR image after proposed RMC.

비균일 회전운동성분을 보상할 수 없다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 Bi-ISAR 영상 기하구조에서 표적의 비균일 회전운동문제를 해결하는 Bi-ISAR RMC 기법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 표적의 궤적, Tx, 그리고 Rx의 위치정보들을 이용하여 바이스테틱 각도 변화를 획득한 후, Bi-ISAR 영상의 기하 왜곡 현상을 보상하였다. 상기 기하 왜곡 보상은 산란원들의 위상 간에 선형관계를 가지게 하기 때문에, 비균일 회전운동성분을 균일 회전운

동성분으로 만들어주는 새로운 시간변수를 정의함으로써 Bi-ISAR RMC를 성공적으로 수행 가능하게 한다. 비균일 회전운동을 겪는 기동 표적에 대한 시뮬레이션 결과를 통해, 본 논문에서 제안된 Bi-ISAR RMC 기법이 기존의 Mo-ISAR RMC 기법과는 달리 초점이 맞추어진 Bi-ISAR 영상을 제공한다는 것을 확인할 수 있었다.

References

- [1] M. Martorella, "On bistatic inverse synthetic aperture radar", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 43, no. 3, pp. 1125-1134, Jul. 2007.
- [2] B.-S. Kang, J.-H. Bae, M.-S. Kang, and K.-T. Kim, "Bistatic ISAR cross-range scaling", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 53, no. 4, pp. 1962-1973, Aug. 2017.
- [3] Y. Jiang, S. Sun, T. S. Yeo, and Y. Yuan, "Bistatic ISAR distortion and defocusing analysis", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 52, no. 3, pp. 1168-1182, Jun. 2016.
- [4] 한승구, 양은정, 김경태, "바이스테틱 ISAR 영상 생성 시뮬레이션", *한국전자과학회논문지*, 25(4), 451-458, 2014년 4월.
- [5] 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.
- [6] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-entropy phase adjustment for ISAR", *IEEE Proc. Radar, Sonar Navigat.*, vol. 151, no. 4, pp. 203-209, Aug. 2004.
- [7] 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.
- [8] Y. Wang, B. Zhao, "ISAR motion compensation via adaptive joint time-frequency technique", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 670-677, Apr. 1998.
- [9] 강병수, 배지훈, 정성은, 김찬홍, 김경태, "ISAR 영상 형성을 위한 회전운동보상 기법 연구", *한국전자과학회논문지*, 27(1), pp. 69-75, 2016년 1월.

[10] W. Brinkman, "An algorithm to detect the presence of 3D target motion from ISAR data", *Multidimensional*

Syst. Signal Process., vol. 14, no. 1-3, pp. 223-240, Jan. 2003.

강 병 수



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

유 보 현



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