

3차원 Multiple-Input Multiple-Output 간섭계 ISAR 영상형성기법

3-D Multiple-Input Multiple-Output Interferometric ISAR Imaging

강병수 · 배지훈 · 양은정* · 김경태

Byung-Soo Kang · Ji-Hoon Bae · Eun-Jung Yang* · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문에서는 다중입력-다중출력(multiple-input, multiple-output: MIMO) 간섭계(interferometric) 레이더 네트워크 시스템을 기반한 MIMO 간섭계 역합성 개구면 레이더(inverse synthetic aperture radar: InISAR) 영상 형성기법에 관해 연구하였다. MIMO 간섭계 레이더 네트워크 시스템 내에서는 여러 바이스테틱 InISAR 영상들이 형성되며, 이들을 인코히리언트(incoherent)하게 합성함으로써 MIMO InISAR 영상을 형성할 수 있다. 여기서, 바이스테틱 InISAR 영상은 바이스테틱 기하구조 내에서의 표적에 대한 산란분포를 3차원의 형태로 도시한다. 상기 MIMO InISAR 영상에서는 다중 각도에서의 바이스테틱 산란 현상을 3차원의 형태로 도시하기 때문에, 표적의 다양한 산란 정보를 제공함과 더불어, 표적 식별 시 유용한 특징 벡터(feature vector)로써 활용될 수 있다. 시뮬레이션을 통해, 제안된 MIMO InISAR 영상 형성 기법을 이용함으로써 표적에 대한 다중각도에서의 바이스테틱 산란분포가 3차원의 형태로 도시되는 것을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we propose a multiple-input, multiple-output(MIMO) interferometric radar network system to generate three-dimensional (3-D) MIMO interferometric inverse synthetic aperture radar(InISAR) image. In the MIMO interferometric radar network system, the MIMO InISAR image can be formed by an incoherent summation of multiple bistatic InISAR images that show 3-D scatterers of a target observed at different bistatic interferometric configurations, respectively. Because bistatic-scattering physics of a target at different viewpoints are visible in the 3-D MIMO InISAR image, it can provide various scattering physics properties of a target, and can be used for target classification as a useful feature vector. Simulations validate that our proposed method successfully finds locations of scatterers of a target in MIMO radar interferometric network system.

Key words: Multiple-Input, Multiple-Output(MIMO) Radar, Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) Image, Interferometric ISAR (InISAR) Image

I. 서 론

역합성 개구면 레이더(Inverse Synthetic Aperture Radar: ISAR) 영상은 고정된 레이더가 광대역 신호를 이용하여 표

적 내 산란원(scatterer)들의 분포를 2차원(two-dimensional: 2D)의 형태로 도시하는 레이더 영상으로써, 표적의 산란 매커니즘(mechanism) 분석 및 레이더 표적식별(Non-Cooperative Target Recognition: NCTR) 분야에서 널리 활용되

「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 March 13, 2015 ; Revised June 11, 2015 ; Accepted June 12, 2015. (ID No. 20150313-019)

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

고 있다^[1].

일반적으로 상기 ISAR 영상 형성에 대해서는 송/수신기가 동일한 위치에 위치한 모노스테틱(monostatic) 레이더 시스템에 기반한다. 그러나 모노스테틱 레이더의 경우, 저피탐(stealth) 표적 관측 시 전자파를 입사된 방향과 다른 방향으로 반사시키는 표적의 구조적 특성으로 인해 레이더 수신 신호의 signal to noise ratio(SNR)이 크게 떨어지게 되고, 이는 저피탐 표적에 대한 ISAR 영상 형성에 큰 어려움을 준다. 상기 문제점을 해결하기 위해 바이스테틱(bistatic) 레이더 시스템에 기반한 ISAR 영상 형성 기법이 소개되었다^[2]. 여기서 바이스테틱 레이더 시스템은 송/수신 기능을 모두 수행하는 두 대의 레이더가 공간적으로 분리되어 분포된 형태로써 정의된다.

바이스테틱 레이더 시스템의 개념을 확장하여 송/수신 기능을 모두 수행하는 여러 대의 레이더들을 분리시켜 분포시킴으로써, statistic 다중입력-다중출력(Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) 레이더 네트워크(network) 시스템을 정의할 수 있다^[1]. 여기서 MIMO 레이더 시스템을 통해 표적을 관측할 경우, 여러 관측각도에서의 바이스테틱 ISAR 영상들을 형성할 수 있다. 만약 상기 형성된 모든 바이스테틱 ISAR 영상들을 인코히리언트(incoherent)하게 합성할 수 있다면, 표적에 대한 다중각도에서의 바이스테틱 산란분포를 하나의 2차원 영상의 형태로 도시하는 MIMO ISAR 영상을 형성할 수 있다^[1]. 상기 MIMO ISAR 영상은 표적 식별 수행 시 높은 정보량을 지닌 유용한 특징 벡터(feature vector)로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 표적에 대한 산란 매커니즘 분석 시 유용한 지표로써 활용될 수 있다. 그러나 MIMO 레이더 환경 내 각각의 바이스테틱 ISAR 영상들은 서로 다른 방향의 2차원 거리-도플러 영상 투영 평면(Image Projection Plane: IPP)에서 형성됨과 더불어, 서로 다른 도플러 스케일링 인자(Doppler scaling factor)를 가진다. 또한, 바이스테틱 ISAR 영상 형성 시 기하학적 왜곡이 발생하기 때문에^{[1],[3]}, 형성된 바이스테틱 ISAR 영상들을 인코히리언트하게 합성하는데 큰 어려움이 있다.

이를 해결하기 위해 본 논문에서는 여러 모노스테틱 간섭계(interferometric) 레이더 시스템들을^[4] 공간적으로 분리시켜 분포시킴으로써 MIMO 간섭계 레이더 네트워

크 시스템을 정의하였다. 상기 모노스테틱 간섭계 레이더 시스템들의 조합을 통해 여러 바이스테틱 간섭계 레이더 시스템들이 구성될 수 있다. 이들은 각각의 관측각도에서 표적에 대한 바이스테틱 산란분포를 3차원의 형태로 도시하는 바이스테틱 간섭계 ISAR(Interferometric ISAR: In-ISAR) 영상들을 형성한다^[3]. 여기서, 형성된 3차원 바이스테틱 InISAR 영상들은 모두 공통된 좌표계를 기준하여 도시되기 때문에 이들을 인코히리언트하게 합성함으로써 표적에 대한 다중각도에서의 바이스테틱 산란분포를 하나의 3차원 영상 형태로 도시하는 MIMO InISAR 영상을 형성할 수 있다.

II. MIMO 간섭계 레이더 네트워크 시스템

모노스테틱 간섭계 레이더 시스템은 그림 1(a)와 같이 송/수신 기능을 모두 수행하는 레이더 $T/R_{1,0}$ 와, 이를 중심으로 거리 d 만큼 직교하는 위치에 떨어진 두 개의 수신 레이더 $R_{1,1}$, 그리고 $R_{1,2}$ 들로 구성된다. 여기서, 표적과 레이더들 간의 거리가 d 에 비해 훨씬 더 길다고 가정하였을 때, 각 수신기에서의 수신신호들을 이용하여 모노스테틱 레이더 시스템 내 표적의 산란분포를 3차원의 형태로 도시할 수 있다.

상기 모노스테틱 간섭계 레이더 시스템 내 $T/R_{1,0}$ 을 공간적으로 분리시킴으로써 그림 1(b)와 같이 바이스테틱 간섭계 레이더 시스템을 정의할 수 있다. 이는 바이스테틱 레이더 시스템에서의 표적에 대한 산란분포를 3차원의 형태로 도시하는 바이스테틱 InISAR 영상을 제공한다^[5].

상기 모노스테틱, 바이스테틱 간섭계 레이더 시스템의 개념을 확장하여, 그림 1(c)와 같이 N 개의 모노스테틱 간섭계 레이더 시스템들을 공간적으로 분리시켜 분포시킴으로써 MIMO 간섭계 레이더 네트워크 시스템을 구축할 수 있다. 여기서, N 개의 모노스테틱 간섭계 레이더 시스템들의 조합은 ${}_N C_2 = N(N-1)$ 개의 바이스테틱 간섭계 레이더 시스템들을 구성하며, 이들은 각각의 관측각도에서 바이스테틱 InISAR 영상을 형성한다. MIMO InISAR 영상은 상기 바이스테틱 InISAR 영상들을 인코히리언트하게 합성함으로써 형성되기 때문에, MIMO InISAR 영상

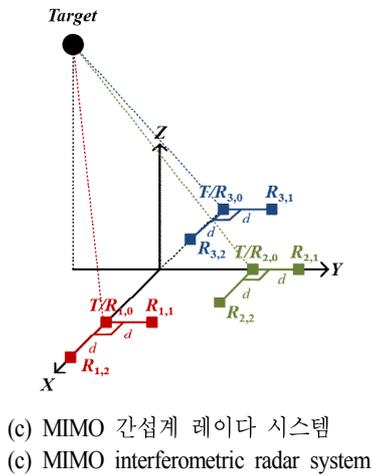
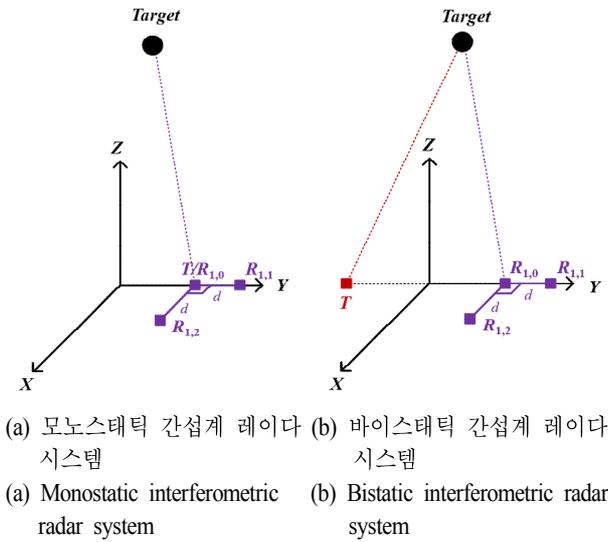


그림 1. 간섭계 레이더 시스템들
Fig. 1. Interferometric radar systems.

을 형성하기 위해서는 먼저 각 관측각도에서의 바이스테틱 InISAR 영상을 형성해야 한다.

III. MIMO InISAR 영상 형성

3-1 바이스테틱 InISAR 영상 형성

3-1-1 세 개의 바이스테틱 ISAR 영상들 형성

그림 2는 바이스테틱 InISAR 영상 형성을 위한 기하구조로써, 송신기 T 와 세 개의 수신기 R_0, R_1 , 그리고 R_2

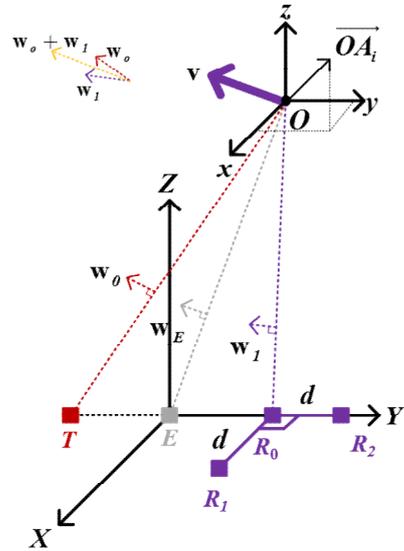


그림 2. 바이스테틱 InISAR 영상 형성을 위한 기하구조
Fig. 2. Geometry for the bistatic InISAR imaging.

로 구성된다. 여기서 E 는 바이스테틱 각도 $\angle TOR_0$ 을 이등분하는 선과 $|TR_0|$ 간의 교점, v 는 표적의 기동 속도를 나타낸다. 표적 내 i 번째 산란원 A_i 의 위치벡터 $\overrightarrow{OA_i} = \mathbf{a}_i = (x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i})$ 는 표적의 회전 중심 O 를 원점으로 한 좌표계 (x, y, z) 를 기준하여 표기되며, 이 좌표계는 전역 좌표계 (X, Y, Z) 에 평행한다. 바이스테틱 InISAR 영상을 형성하기 위해서는 먼저 바이스테틱 간섭계 레이더 시스템 내 세 개의 수신기들에서의 바이스테틱 ISAR 영상들을 각각 형성하는 것으로부터 시작한다.

T 의 송신신호에 대한 표적의 반사 신호는 R_0, R_1 , 그리고 R_2 로 각각 수신되며, 각 수신신호에 대한 신호처리 과정을 통해 세 개의 바이스테틱 ISAR 영상들을 형성할 수 있다. 아래는 참고문헌 [3]을 기반으로 T 와 R_0 에 대한 바이스테틱 ISAR 영상 형성 과정을 기술한다.

일반적으로 바이스테틱 ISAR 영상은 모노스테틱의 경우와 같이 거리-도플러(range-Doppler: RD) 기법을 기반으로 형성된다. 먼저, T 로부터 송신된 처프신호(chirp-signal)에 대한 표적의 반사 신호를 R_0 에서 수신한 후, 디램핑(de-ramping)을 기반한 펄스 압축(pulse compression) 과정을 통해 각 버스트(burst) 별 1차원 high resolution range profile(HRRP)를 획득한다. 다음으로, 표적의 병진운동성

분을 보상한 후^[5], 도플러 방향으로의 압축을 통해 식 (1) 과 같이 RD 방향에서의 T 와 R_0 에 대한 2차원 바이스테틱 ISAR 영상 $S_{R_0}(r, f)$ 을 형성한다.

$$S_{R_0}(r, f) = T_p \sum_{i=1}^K \rho_{A_i} u(r - r_{A_i}) \exp\left(-j2\pi \frac{TA_i + A_i R_0 - OT - OR_0}{\lambda_0}\right) \text{sinc}\left(\left(f + \frac{\mathbf{a}_i^T (\mathbf{w}_0 + \mathbf{w}_1)}{\lambda_0}\right) T_p\right) \quad (1)$$

여기서 r 은 거리방향 변수, f 는 도플러 방향 변수, K 는 저피탐 표적을 구성하는 산란원의 개수, ρ_i 는 산란원 A_i 의 반사계수, λ_0 는 중심 주파수에 대한 파장(wave length), T_p 는 영상 합성 시간(Coherent Processing Interval: CPI), $u(r)$ 은 디램핑 과정을 기반한 펄스 압축 후의 거리 방향에 대한 point spread function(PSF)이다. 슬로우 타임(slow time) $t=0$ 일 때, T 와 A_i 간, 그리고 A_i 와 R_0 간의 거리는 각각 $TA_i = |\overrightarrow{TA_i}(0)|$, 그리고 $A_i R_0 = |\overrightarrow{A_i R_0}(0)|$ 으로써 정의되며, $OT = |\overrightarrow{OT}(0)| = r_0$, 그리고 $OR_0 = |\overrightarrow{OR_0}(0)| = r_1$ 는 각각 $t=0$ 일 때 T 와 O , 그리고 O 와 R_0 간의 거리를 나타낸다. \overrightarrow{EO} 에 대한 단위벡터는 $\mathbf{n}_{01} = \mathbf{n}_0 + \mathbf{n}_1 = (n_{01x}, n_{01y}, n_{01z})$ 이고, \mathbf{n}_{01} 에 대한 \mathbf{a}_i 의 투사 성분은 $r_{A_i} = \mathbf{a}_i^T \mathbf{n}_{01}$ 으로써, 이는 바이스테틱 기하구조 내 산란원의 거리방향 성분에 해당된다. $\mathbf{n}_0 = \overrightarrow{OT}(0)/r_0 = (n_{0x}, n_{0y}, n_{0z})$ 는 T 에 대한 레이더 가시선(Radar Line of Sight: RLOS) 방향으로의 단위벡터, $\mathbf{n}_1 = \overrightarrow{OR_0}(0)/r_1 = (n_{1x}, n_{1y}, n_{1z})$ 는 R_0 에 대한 RLOS 방향으로의 단위벡터, $\mathbf{w}_0 = ((\mathbf{v} - \mathbf{n}_0^T \mathbf{v} \mathbf{n}_0)/r_0)$ 는 T 에 대한 도플러방향 투사 벡터, $\mathbf{w}_1 = ((\mathbf{v} - \mathbf{n}_1^T \mathbf{v} \mathbf{n}_1)/r_1)$ 는 R_0 에 대한 도플러방향 투사 벡터이다. 상기와 동일한 과정으로, T 와 R_1 에 대한 바이스테틱 ISAR 영상 $S_{R_1}(r, f)$ 과 T 와 R_2 에 대한 바이스테틱 ISAR 영상 $S_{R_2}(r, f)$ 를 각각 형성할 수 있다.

3-1-2 3차원 바이스테틱 InISAR 영상 형성

상기 각 수신 레이더 간의 거리에 비해 표적이 훨씬 더

멀리 떨어져 있기 때문에, 세 개의 바이스테틱 레이더 시스템에서 관측한 표적의 산란분포는 모두 동일하다. 각 바이스테틱 ISAR 영상 내 주요 산란원 A_i 에 대한 신호 값을 각각 $S_{R_0}(r_{A_i}, f_{A_i})$, $S_{R_1}(r_{A_i}, f_{A_i})$, 그리고 $S_{R_2}(r_{A_i}, f_{A_i})$ 으로 정의한다면, 이들을 활용하여, A_i 의 위치벡터 $\mathbf{a}_i = (x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i})$ 에 대한 추정이 가능하다. 여기서 각 영상 내 A_i 에 대한 신호 값을 획득하기 위해서는, RELAX, CLEAN, multiple signal classification(MUSIC) 등과 같은 스펙트럼 추정론(spectral estimation) 기반 알고리즘, 혹은 orthogonal matching pursuit(OMP), basis pursuit(BP) 등과 같은 압축 센싱(compressive sensing) 기반 알고리즘 등을 활용할 수 있다^{[6][7]}. 아래는 $S_{R_0}(r_{A_i}, f_{A_i})$, $S_{R_1}(r_{A_i}, f_{A_i})$, 그리고 $S_{R_2}(r_{A_i}, f_{A_i})$ 들을 활용한 $\mathbf{a}_i = (x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i})$ 의 추정에 관한 것이다.

먼저 $S_{R_0}(r_{A_i}, f_{A_i})$ 와 $S_{R_1}(r_{A_i}, f_{A_i})$ 간의 위상차이 φ_1 , 그리고 $S_{R_0}(r_{A_i}, f_{A_i})$ 와 $S_{R_2}(r_{A_i}, f_{A_i})$ 간의 위상 차이 φ_2 를 식 (2), (3)을 통해 각각 구한다.

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \text{phase}(S_{R_1}(r_{A_i}, f_{A_i}) \times \text{conj}(S_{R_0}(r_{A_i}, f_{A_i}))) \\ &\approx 2\pi \frac{\tilde{\mathbf{a}}^T \mathbf{d}_1}{\lambda_0 r_1} = 2\pi \frac{\tilde{x}_{A_i} d_1}{\lambda_0 r_1}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \text{phase}(S_{R_2}(r_{A_i}, f_{A_i}) \times \text{conj}(S_{R_0}(r_{A_i}, f_{A_i}))) \\ &\approx 2\pi \frac{\tilde{\mathbf{a}}^T \mathbf{d}_2}{\lambda_0 r_1} = 2\pi \frac{\tilde{y}_{A_i} d_2}{\lambda_0 r_1}, \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{d}_1 = \overrightarrow{R_0 R_1} = (d_1, 0, 0)$, $\mathbf{d}_2 = \overrightarrow{R_0 R_2} = (0, d_2, 0)$, 그리고 $\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{a}_i - \mathbf{n}_1^T \mathbf{a}_i \mathbf{n}_1 = (\tilde{x}_{A_i}, \tilde{y}_{A_i}, \tilde{z}_{A_i})$ 이다. 상기 φ_1 과 φ_2 를 통해 \tilde{x}_{A_i} 그리고 \tilde{y}_{A_i} 를 구하면 각각 식 (4), (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{A_i} &= (1 - n_{1x}^2)x_{A_i} - n_{1x}n_{1y}y_{A_i} - n_{1x}n_{1z}z_{A_i} \\ &= \frac{\lambda_0 \varphi_1 r_1}{2\pi d_1} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{A_i} &= -n_{1x}n_{1y}x_{A_i} + (1 - n_{1y}^2)y_{A_i} + n_{1y}n_{1z}z_{A_i} \\ &= \frac{\lambda_0 \varphi_2 r_1}{2\pi d_2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 식 (2), (3) 내 φ_1 그리고 φ_2 는 모두 $[0 \ 2\pi]$ 범위 내에 있어야 하므로, d_1 그리고 d_2 는 식 (6)을 만족하여야 한다.

$$\lambda_0 r_1 / \tilde{x}_{A_i} \geq d_1, \quad \lambda_0 r_1 / \tilde{y}_{A_i} \geq d_2. \quad (6)$$

다음으로, 식 (4), (5), 그리고 A_i 에 대한 바이스테틱 거리방향성분 $r_{A_i} = \mathbf{a}_i^T \mathbf{n}_{01} = n_{01x}x_{A_i} + n_{01y}y_{A_i} + n_{01z}z_{A_i}$ 을 이용하여 $(x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i})$ 을 변수로 가지는 3차 선형방정식(linear equation)을 수립할 수 있고(식 (6)), 이에 대한 해를 구함으로써 산란원 A_i 에 대한 3차원 위치정보를 추정할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 1 - n_{1x}^2 & -n_{1x}n_{1y} & -n_{1x}n_{1z} \\ -n_{1x}n_{1y} & 1 - n_{1y}^2 & -n_{1y}n_{1z} \\ n_{01x} & n_{01y} & n_{01z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{A_i} \\ y_{A_i} \\ z_{A_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_{A_i} \\ \tilde{y}_{A_i} \\ r_{01} \end{pmatrix} \quad (7)$$

상기 과정을 통해 추출된 모든 주요 산란원들에 대한 3차원 위치정보를 추출함으로써, 식 (7)과 같이 바이스테틱 기하구조 내 주요 산란원들의 분포를 3차원의 형태로 도시하는 바이스테틱 InSAR 영상을 형성할 수 있다.

$$B(x, y, z) = \sum_{i=1}^K \rho_{A_i} \delta(x - x_{A_i}, y - y_{A_i}, z - z_{A_i}). \quad (8)$$

여기서, $\rho_{A_i} = |S_{R_0}(r_{A_i}, f_{A_i})| = |S_{R_1}(r_{A_i}, f_{A_i})| = |S_{R_2}(r_{A_i}, f_{A_i})|$ 는 바이스테틱 ISAR 영상 내 산란원 A_i 의 크기 성분이다.

3-2 MIMO InSAR 영상 형성

MIMO 간섭계 레이더 네트워크 환경에서 형성된 $N(N-1)$ 개의 바이스테틱 InSAR 영상들은 모두 (x, y, z) 좌표계를 기반으로 표적의 바이스테틱 산란분포를 도시한다. 따라서, 형성된 모든 바이스테틱 InSAR 영상들을 인코히런트하게 합성함으로써, 표적에 대한 다중각도에서의 바이스테틱 산란분포를 3차원의 형태로 도시하는 MIMO InSAR 영상 $M(x, y, z)$ 을 형성할 수 있다(식 (9)).

$$M(x, y, z) = \sum_{k=1}^{N(N-1)} B_k(x, y, z). \quad (9)$$

여기서, k 는 MIMO 간섭계 레이더 네트워크 환경 내 바이스테틱 간섭계 레이더의 인덱스(index)를 나타낸다.

IV. 시뮬레이션 결과

초기위치 $(0, -10, 10)$ km에서 $\mathbf{v} = (100, 100, 0)$ m/sec로 이동하는 표적에 대한 MIMO InSAR 영상을 형성하기 위해, 그림 3과 같이 세 개의 모노스테틱 간섭계 레이더 시스템들로(표 1) 구성된 MIMO 간섭계 레이더 네트워크 시스템을 구축하였다. 여기서, MIMO 간섭계 레이더 네트워크 시스템 내 조합 가능한 바이스테틱 간섭계 레이더 시스템들은 표 2와 같으며, 각 바이스테틱 간섭계 시스템에서 관측한 표적의 바이스테틱 산란분포는 그림 4와 같다. 여기서 상기 모든 산란원들의 반사율(reflectivity)은 동일하다고 가정하였다.

먼저, 각 바이스테틱 간섭계 레이더 시스템 별로 세 개의 바이스테틱 ISAR 영상들을 형성하였다. 여기서, 사용된 송신 처프 레이더 파라미터는 표 3과 같다. 다음으로,

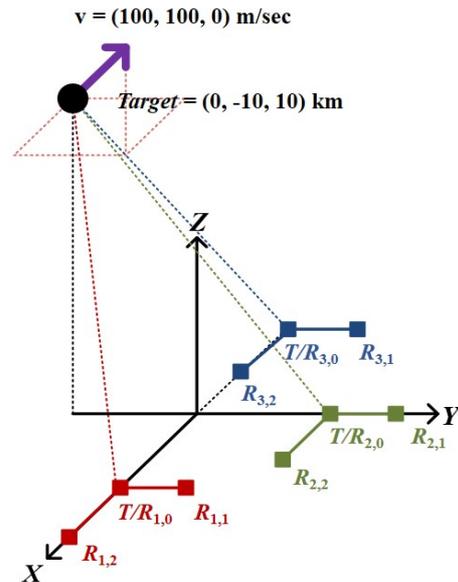


그림 3. MIMO InSAR 영상 형성을 위한 기하구조
Fig. 3. Geometry for the MIMO InSAR imaging.

표 1. Fig. 3 내 레이더들의 위치

Table 1. Locations of radars in Fig. 3.

모노스테틱 간섭계 레이더 1	모노스테틱 간섭계 레이더 2	모노스테틱 간섭계 레이더 3
$T/R_{1,0}$ = $(5, 0, 0)$ km	$T/R_{2,0}$ = $(0, 5, 0)$ km	$T/R_{3,0}$ = $(-5, 0, 0)$ km
$R_{1,1}$ = $(5, d_2, 0)$ km	$R_{2,1}$ = $(0, 5+d_2, 0)$ km	$R_{1,1}$ = $(-5, d_2, 0)$ km
$R_{1,1}$ = $(5+d_1, 0, 0)$ km	$R_{1,1}$ = $(d_1, 5, 0)$ km	$R_{1,1}$ = $(-5+d_1, 0, 0)$ km

표 2. 그림 3 내 조합 가능한 바이스테틱 간섭계 레이더 시스템들

Table 2. Bistatic interferometric radar systems associated with a MIMO interferometric radar system shown in Fig. 3.

구분	송신기(T)	세 대의 수신기(R_0, R_1, R_2)
바이스테틱 간섭계 레이더 1	$T/R_{1,0}$	$T/R_{2,0}, R_{2,1}, R_{2,2}$
바이스테틱 간섭계 레이더 2	$T/R_{2,0}$	$T/R_{1,0}, R_{1,1}, R_{1,2}$
바이스테틱 간섭계 레이더 3	$T/R_{1,0}$	$T/R_{3,0}, R_{3,1}, R_{3,2}$
바이스테틱 간섭계 레이더 4	$T/R_{3,0}$	$T/R_{1,0}, R_{1,1}, R_{1,2}$
바이스테틱 간섭계 레이더 5	$T/R_{2,0}$	$T/R_{3,0}, R_{3,1}, R_{3,2}$
바이스테틱 간섭계 레이더 6	$T/R_{3,0}$	$T/R_{2,0}, R_{2,1}, R_{2,2}$

표 3. 송신 레이더 파라미터

Table 3. Chirp-radar parameters.

중심 주파수	9.25 GHz
주파수 대역폭	500 MHz
펄스 반복 주파수	1 kHz
펄스 폭	10 μ sec
영상 합성 시간	1 sec

OMP를 이용하여 바이스테틱 ISAR 영상 내 주요 산란원들을 추출한 후^[6], 추출된 산란원들의 신호 및 거리 정보

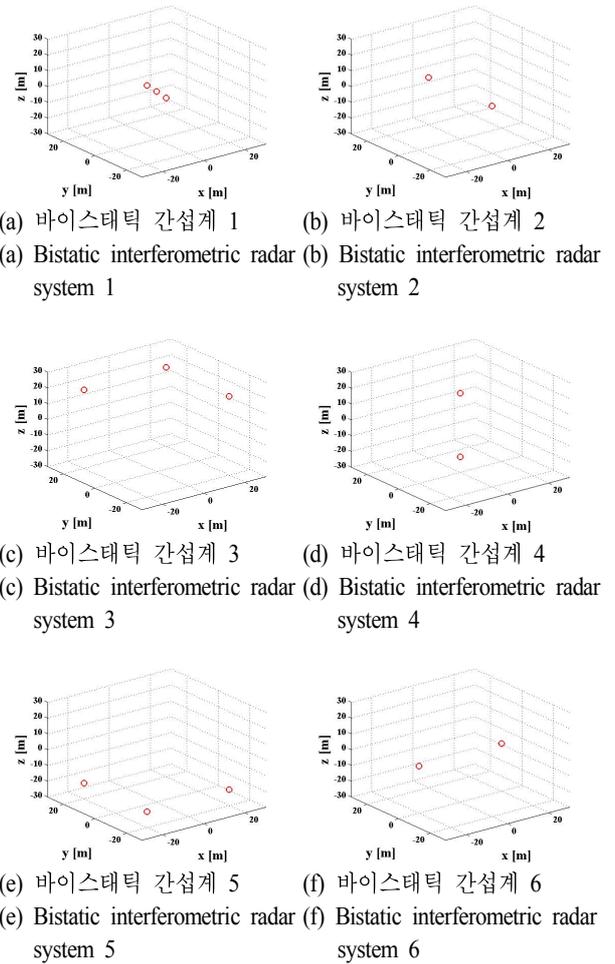


그림 4. 각 바이스테틱 간섭계 레이더 시스템에서 관측한 표적의 산란분포

Fig. 4. Scatterer's distribution of a target viewed at each bistatic radar network system.

를 이용하여 바이스테틱 InSAR 영상을 형성하였다. 마지막으로, 형성된 바이스테틱 InSAR 영상들을 인코히런트하게 합성함으로써, 표적에 대한 다중각도에서의 바이스테틱 산란분포를 3차원의 형태로 도시하는 MIMO InSAR 영상을 형성하였다.

각 수신기 간 거리 d_1 , 그리고 d_2 가 식 (6)을 만족하지 못 한다면, φ_1 , 그리고 φ_2 가 2π 범위를 넘어가게 되므로, 산란원의 위치를 정확하게 추정할 수 없다. 본 시뮬레이션에서는 d_1 , 그리고 d_2 가 d 으로 같은 상황 하에서, d 의 변화에 대한 추정오차(식 (10))를 계산하였다(그림 5).

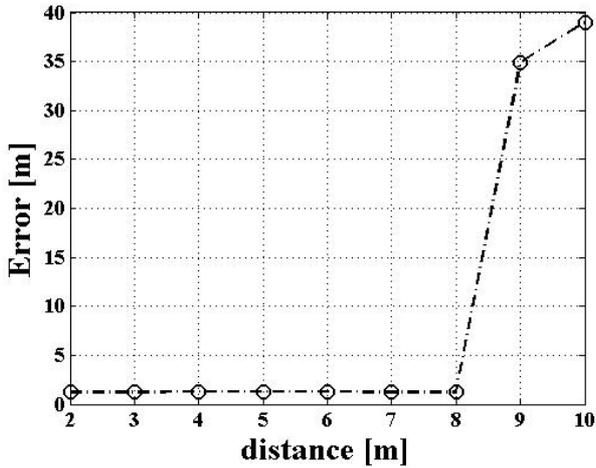


그림 5. 수신기 간 거리(d) vs. 추정오차
Fig. 5. d vs. estimation error.

$$Error = \sum_{i=1}^M \| \mathbf{a}_i - \hat{\mathbf{a}}_i \|_2. \quad (10)$$

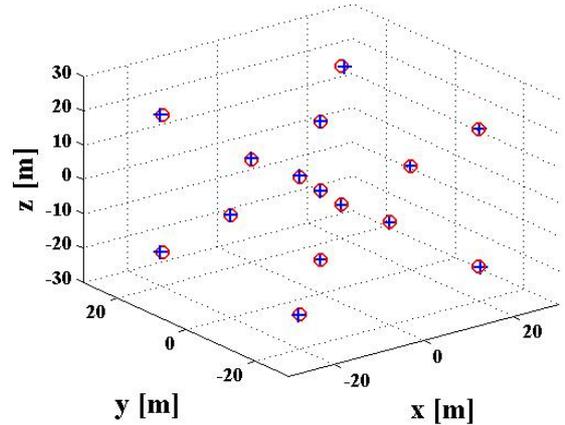
여기서, \mathbf{a}_i , 그리고 $\hat{\mathbf{a}}_i$ 는 각각 MIMO 환경 내 i 번째 산란원에 대한 원래의 위치, 그리고 추정된 위치를 나타낸다.

그림 3에서, d 가 8 m 이상일 경우, 추정 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 d 가 식 (6)을 만족하는 상황의 시뮬레이션에서(일반적으로 $r_1 \gg d$ 인 상황) 산란원의 위치 추정이 정확히 이루어진다는 것을 알 수 있다.

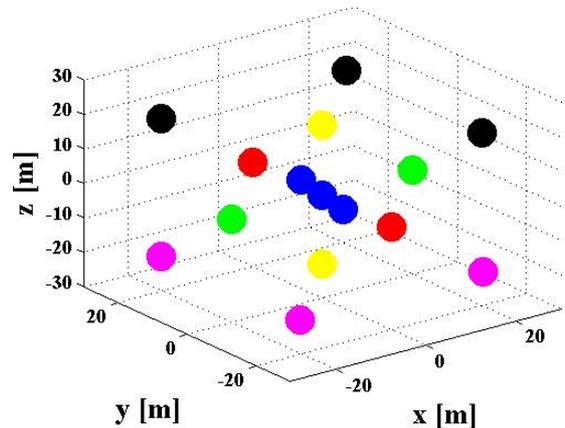
그림 6은 $d_1 = d_2 = 2$ m일 때 형성된 MIMO InSAR 영상을 도시한다. 그림 6(a) 내 빨간색 원 표시는 MIMO 환경 내 표적에 대한 산란분포(다중각도에서의 바이스테틱 산란분포)를, 파란색 십자가 표시는 MIMO InSAR 영상 형성 기법을 통해 추정한 표적 내 산란원들의 위치이다. 그림 6(b) 내 파란색, 빨간색, 검정색, 노란색, 분홍색, 녹색으로 도시된 구들은 각각 바이스테틱 간섭계 레이더 1, 2, 3, 4, 5, 6에서의 바이스테틱 InSAR 영상들이다.

V. 결 론

본 논문은 MIMO 간섭계 레이더 시스템을 기반한 MIMO InSAR 영상 형성에 관한 것이다. MIMO 간섭계 레이더 네트워크 시스템은 다중각도에서의 바이스테틱



(a) MIMO 레이더 네트워크 시스템 내 표적의 산란원들의 위치(o: 원래의 위치, +: 추정된 위치, 추정오차: 1.2059 m)
(a) Locations of scatterers distributed on a target in MIMO radar network system(o: original locations, +: estimated locations, estimation error: 1.2059 m)



(b) MIMO InSAR 영상
(b) MIMO InSAR image

그림 6. 3차원 MIMO InSAR image
Fig. 6. Three-dimensional(3D) MIMO InSAR image.

간섭계 레이더 시스템들로 구성되며, 각 바이스테틱 간섭계 레이더는 3차원 바이스테틱 InSAR 영상들을 형성한다. 여기서, 모든 바이스테틱 InSAR 영상들은 공통된 좌표를 기준하여 3차원의 형태로 도시되기 때문에, 이들의 인코히런트한 합성을 통해 표적에 대한 다중각도에서의 바이스테틱 산란분포를 3차원의 형태로 도시하는 MIMO InSAR 영상을 형성할 수 있다. 시뮬레이션에서는 제안된 방법을 통해 MIMO 환경 내 산란원들의 위치 추정이

성공적으로 수행됨으로써 MIMO InISAR 영상이 형성됨을 확인할 수 있다.

References

[1] V. Chen, M. Martorella, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging*, Edison, NJ: SciTech, 2014.
 [2] M. Martorella, J. Palmer, J. Homer, B. Littleton, and I. D. Lningstaff, "On bistatic inverse synthetic aperture radar," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 43, no. 3, pp. 1125-1134, Jul. 2007.
 [3] C. Ma, T. S. Yeo, and P. Wei, "Bistatic ISAR imaging incorporating interferometric 3-D imaging technique," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 10, pp. 3859-3867, Mar. 2012.
 [4] G. Y. Wang, X. G. Xia, and V. C. Chen, "Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 10, no. 3, pp. 436-447, Mar. 2001.
 [5] 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.
 [6] M. Elad, *Sparse and Redundant Representations*, Springer, 2010.
 [7] P. Stoica, R. Moses, *Introduction to Spectral Analysis*, Prentice-Hall, 1997.

강 병 수



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

식

양 은 정



2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 2006년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2011년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2011년 1월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더 신호처리, ISAR 이동보상

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] 레이더 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: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리, 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정