

논문 2022-17-09

ISAR 영상을 이용한 효과적인 편대비행 표적식별 연구

(A Study on Effective Identification of Targets Flying in Formation ISAR Images)

차 상 빈, 최 인 오, 정 주 호, 박 상 흥*

(Sang-Bin Cha, In-Oh Choi, Joo-Ho Jung, and Sang-Hong Park)

Abstract : Monostatic/Bistatic inverse synthetic aperture radar (ISAR) images are two-dimensional radar cross section (RCS) distributions of a target. When there are many targets in a single radar beam, ISAR images are generated with targets overlapped, so it is difficult to perform the targets identification using the trained database. In addition, it is inefficient to perform target identification using only single monostatic and bistatic ISAR images separately because each method has its own advantages and weaknesses. Therefore, this paper analyzes multiple targets identification performances using monostatic/bistatic ISAR images and proposes a method of identification through fusion of two ISAR images. To identify multiple targets, we use image combination technique using trained single target images. Simulation results show effectiveness of proposed method.

Keywords : Monostatic ISAR, Bistatic ISAR, Target identification, Imaging fusion, Formation flight

1. 서 론

Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) 영상은 표적의 여러 관측 각도에서 수신된 광대역 레이더 신호를 처리하여 형성된 2차원 산란분포이며 [1], 표적의 기하학적인 정보를 내포하기 때문에 표적 식별에 효율적으로 사용될 수 있다.

하지만 공격 및 방어력의 증가 및 작전을 효율적으로 수행하기 위해 표적이 편대비행으로 기동 할 시, 다수의 표적이 안테나 내부에 들어오게 되고 생성된 ISAR 영상은 그림 1과 같이 다수의 단일표적 ISAR 영상이 겹쳐진 형태로 생성된다. 이로 인해, 표적의 종류 및 대수, 위치에 따라 실시간으로 합성되는 편대비행 표적의 ISAR 영상으로 미리 학습해 두었던 단일 표적 데이터로 식별하기에는 거의 불가능하다.

모노스테틱 레이더는 한 대의 레이더가 송·수신기 역할을 하는 레이더로, 바이스테틱 레이더에 비해 시스템이 간단하며, 추가적인 레이더 링크 구조가 필요하지 않아 ISAR 영상 평면이 잘 형성되어 2차원 공간에 잘 분포된 영상이 확보될 경우, 바이스테틱 레이더에 비하여 모노스테틱 레이더가 훨씬 유용하다. 하지만 레이더의 LOS (Line Of Sight) 방향으로 진행되는 표적의 경우, 영상이 2차원의 좁은 공간에서 분포하므로 모노스테틱 ISAR 영상 성능이 크게 저하된다.

바이스테틱 레이더는 두 대의 레이더가 각각 송신기 및

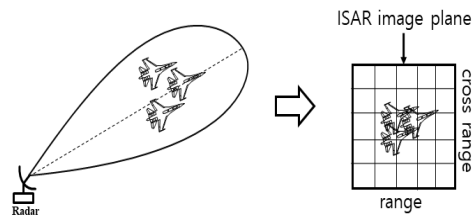


그림 1. 편대비행 ISAR 영상

Fig. 1. Targets flying in formation of ISAR image

수신기 역할을 하는 레이더로, 송신기와 수신기의 공간적 차이를 이용하여 저피탐 (Stealth) 표적을 탐지할 수 있고, 또한 표적이 레이더의 LOS (Line Of Sight) 방향으로 진행할 시 표적의 수직거리 (Cross-range) 방향으로 충분한 해상도를 얻을 수 없는 모노스테틱 ISAR 영상의 단점을 해결 할 수 있기 때문에 [2], 바이스테틱 레이더에 관한 연구가 계속해서 활발히 이루어지고 있다.

그러나, 바이스테틱 레이더는 모노스테틱 레이더에 비해 송·수신기 기하구조에 따른 데이터 수집시간 및 신호처리 등을 포함한 긴 처리시간과 산란 메커니즘이 다양하게 변하며, 일반적으로 두 개의 레이더를 사용하기 때문에, 경제적 측면에서 모노스테틱 레이더보다 좋지 못하고, 송·수신기 사이의 동기화 문제 [3] 및 기하구조로 인한 수직 방향의 고유 왜곡 [4] 등 각종 문제가 발생할 가능성이 높기 때문에 바이스테틱 ISAR 영상만을 이용한 표적 식별 수행이 비효율적일 수 있다. 따라서 보다 효율적인 표적 식별을 위해서는 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상을 융합하는 연구가 필요하다.

*Corresponding Author (radar@pknu.ac.kr)

Received: Oct. 12, 2021, Revised: Nov. 3, 2021, Accepted: Jan. 6, 2022.

S.B. Cha: Pukyong University (Ph.D. Student)

I.O. Choi: Korea Maritime & Ocean University (Assis. Prof)

J.H. Jung: Kookmin University (Res. Prof)

S.H. Park: Pukyong University (Prof)

※ 본 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2021년)에 의하여 연구되었음.

이에, 본 논문에서는 편대비행 표적의 모노스테틱/바이스태틱 ISAR 영상을 획득한 후, 두 영상의 차이를 비교 및 분석하고, 두 영상을 융합하여 보다 효율적인 식별 기법을 제시한다. 편대비행 ISAR 영상을 이용한 식별의 경우, 겹쳐진 영상을 분리하는 방법 대신 기존 학습해 두었던 단일 표적 데이터베이스로 템플릿 매칭을 통해 영상을 합성하는 기법을 사용하여 식별을 수행하였다. 또한, 식별을 위한 특성 벡터로 ISAR 영상의 CM (Center of Mass)을 일정하게 만들기 위한 2D Fourier Transform 특성과 영상의 회전 불변성을 위한 극 사상 변환 (Polar Mapping)을 사용하였으며, NN (Nearest Neighbor) 구분기를 이용해서 표적 식별 성능을 분석하였다. 본 연구에서는 편대비행 표적의 대수를 2~4대로 가정하여 ISAR 영상 생성 및 식별을 수행하였으며, 표적의 종류는 점 산란원으로 구성된 서로 다른 4종류의 표적을 사용하였다. 또한, 보다 효율적인 데이터베이스 구축을 위해 표적의 비행시나리오를 기반으로 훈련 및 시험 데이터베이스를 구축하였으며, 시뮬레이션 결과 제안된 식별 기법의 효율성을 확인할 수 있었다.

II. 기본 이론

1. 모노스테틱 ISAR 신호 모델

모노스테틱 ISAR 영상을 형성하기 위한 기하 구조는 다음 그림 2와 같다. (x_k, y_k) 에 위치한 산란점 으로부터 수신된 신호는 시간-주파수 영역에서 다음과 같이 표현 될 수 있다. 여기서 $k(k=1,2,\dots,K)$ 는 산란점의 개수 나타낸다.

$$s(f,t) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot W(f,t) \cdot \exp[-j\varphi(x_k, y_k, f, t)] \quad (1)$$

$$W(f,t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_{\text{obs}}}\right) \text{rect}\left(\frac{f-f_0}{B}\right).$$

위 식 (1)에서 A_k 는 표적의 RCS, $\varphi(\cdot)$ 는 위상, f_0 는 중심주파수, B 는 대역폭, T_{obs} 는 관측시간, $\text{rect}(\cdot)$ 는 사각함수이며, 작은 각도 근사 및 작은 대역폭 근사에 근거하여 위상은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\varphi(x_k, y_k, f, t) = \frac{4\pi f}{c} [R(t) + x_k + y_k \theta(t)]. \quad (2)$$

여기서 $\theta(t)$ 는 Z축을 중심으로 회전한 표적의 회전 각도, c 는 빛의 속도, $R(t)$ 는 레이더와 표적사이의 거리를 나타낸다. 거리정보 $R(t)$ 와 회전정보 $\theta(t)$ 는 다음 식 (3)과 (4)와 같이 각각 표현될 수 있다.

$$R(t) = R_0 + vt + \frac{1}{2!} \nu t^2 + \dots \quad (3)$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \Omega t + \frac{1}{2!} \Omega^2 t^2 + \dots \quad (4)$$

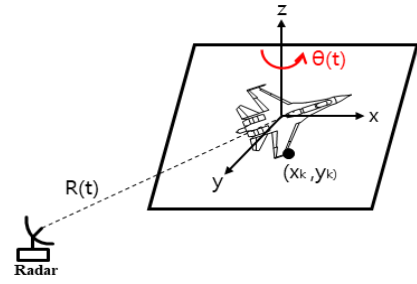


그림 2. 모노스테틱 ISAR 영상의 기하구조
Fig. 2. Geometry of the monostatic ISAR image

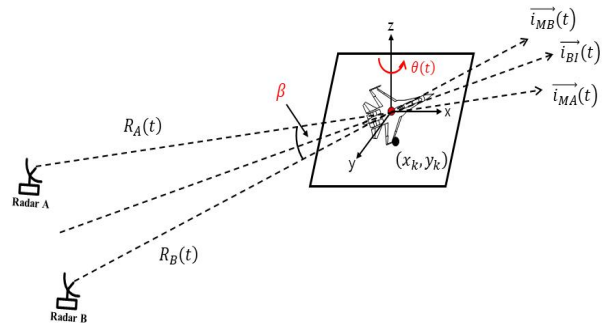


그림 3. 바이스태틱 ISAR 영상의 기하구조
Fig. 3. Geometry of the bistatic ISAR image

여기서 R_0 , θ_0 는 표적과 레이더 사이의 초기 거리 및 각도, v , Ω 는 표적의 속도 및 각속도를 나타낸다. RP (Range Profile)는 수신된 신호를 f 축 방향으로 역 푸리에 변환을 통해서 얻을 수 있으며, 수식은 다음과 같다.

$$S_r(\tau, t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(f, t) \exp(j2\pi f \tau) df \quad (5)$$

$$= AB \cdot \text{sinc} B \left(\tau - \frac{2}{c} [R(t) + x_k + y_k \theta(t)] \right) \exp(j2\pi f_0 \tau)$$

$$\cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_{\text{obs}}}\right) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi f_0}{c} (R(t) + x_k + y_k \theta(t))\right].$$

여기서 τ 는 fast-time으로 정의한다. 이동하는 표적에 의한 병진운동을 보상하기 위해 TMC (Translational Motion Compensation) 기법 [5]을 이용하여 $R(t)$ 성분과 $\exp[-j \frac{4\pi f_0}{c} R(t)]$ 성분이 제거되면 최종적인 모노스테틱 ISAR 영상은 t 축 방향으로 역 푸리에 변환을 통해서 얻을 수 있다.

$$I_{\text{Mono}}(\tau, \nu, x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} S_r(\tau, t) \exp(-j2\pi \nu t) dt. \quad (6)$$

여기서 ν 는 slow-time을 나타낸다.

2. 바이스테틱 ISAR 신호 모델

바이스테틱 ISAR 영상을 형성하기 위한 기하 구조는 다음 그림 3과 같다. 여기서 β 는 송신기 및 수신기와 표적이 이루는 각도를 나타내며, 바이스테틱 기하구조로부터 획득할 수 있는 산란점 (x_k, y_k) 에 대한 수신 신호는 시간-주파수 영역에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$s(f, t) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot W(f, t) \cdot \exp[-j\varphi(x_k, y_k, f, t)] \quad (7)$$

$$W(f, t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_{obs}}\right) \text{rect}\left(\frac{f-f_0}{B}\right).$$

위 수식에서 $k(k=1, 2, \dots, K)$ 는 표적을 구성하는 산란점의 개수를 나타내며, A_k 는 표적의 RCS, $\varphi(\cdot)$ 는 위상, f_0 는 중심주파수, B 는 대역폭, T_{obs} 는 관측시간, $\text{rect}(\cdot)$ 는 사각함수이다. 위 그림 3에서 레이더 A, B가 각각 모노스테틱 구조로 수신 할 경우, 각각의 신호의 위상함수는 다음과 같다.

$$\varphi_{MA}(x_k, y_k, f, t) = \frac{4\pi f}{c} [R_A(t) + (x_k, y_k) \cdot \vec{i}_{MA}(t)], \quad (8)$$

$$\varphi_{MB}(x_k, y_k, f, t) = \frac{4\pi f}{c} [R_B(t) + (x_k, y_k) \cdot \vec{i}_{MB}(t)]. \quad (9)$$

위 식 (9), (10)에서 \cdot 는 벡터간의 내적 연산자, c 는 빛의 속도, $R_A(t), R_B(t)$ 는 표적과 레이더 A, B 사이의 거리, $\vec{i}_{MA}(t), \vec{i}_{MB}(t)$ 는 레이더 A, B의 LOS 방향의 단위 벡터를 나타낸다.

바이스테틱 구조로 레이더 A가 송신레이더, 레이더 B가 수신레이더로 가정할 때, 수신되는 바이스테틱 위상함수는 $\varphi_{BI}(x_k, y_k, t)$ 는 다음과 같다.

$$\varphi_{BI}(x_k, y_k, f, t) = \frac{(\varphi_{MA}(x_k, y_k, f, t) + \varphi_{MB}(x_k, y_k, f, t))}{2}$$

$$= \frac{4\pi f}{c} [R(t) + K(t)(x_k, y_k) \cdot \vec{i}_{BI}(t)]$$

$$K(t) = \left| \frac{\vec{i}_{MA}(t) + \vec{i}_{MB}(t)}{2} \right| = \cos \frac{\beta(t)}{2} \quad (10)$$

$$\vec{i}_{BI}(t) = \frac{\vec{i}_{MA}(t) + \vec{i}_{MB}(t)}{|\vec{i}_{MA}(t) + \vec{i}_{MB}(t)|}.$$

여기서 $\vec{i}_{BI}(t)$ 는 바이스테틱 레이더 LOS 방향의 단위벡터, $R(t)$ 는 표적과 두 레이더 A, B사이의 거리의 평균을 나타낸다. 모노스테틱 ISAR 영상과 같이 TMC 기법을 통해 $R(t)$ 성분 제거와 작은 각도 근사 및 작은 대역폭 근사에 근거하여 위상은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\varphi_{BI}(x_k, y_k, f, t) \approx \frac{4\pi f}{c} [K(t)(x_k + y_k \theta(t))]. \quad (11)$$

위 식 (11)에서 $K(t)$ 는 테일러 급수 전개를 이용해 1차

다항식의 형태로 근화 할 수 있으며 이는 식 (12)와 같다.

$$K(t) \approx K(0) + K'(0)t$$

$$= \cos\left[\frac{\beta(0)}{2}\right] - \frac{\beta'(0)}{2} \sin\left[\frac{\beta(0)}{2}\right]t = K_0 + K_1 t. \quad (12)$$

식 (12)를 이용해 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varphi(x_k, y_k, f, t) \approx \frac{4\pi f}{c} [(K_0 + K_1 t)x_k]$$

$$+ \frac{4\pi f}{c} [(K_0 + K_1 t)\theta(t)y_k]. \quad (13)$$

RP (Range Profile)는 위상함수 식 (13)을 식 (7)에 대입한 수신 신호에 f 축 방향으로 역 푸리에 변환을 통해서 얻을 수 있다.

$$S_r(\tau, t) = A \int_{-\infty}^{\infty} s(f, t) \exp(j2\pi f \tau) df$$

$$= AB \text{sinc} B \left[\left(\tau - \frac{2}{c} [K_0 y_k + \delta r(t)] \right) \right] \times \exp(j2\pi f_0 \tau) \quad (14)$$

$$\times \text{rect}\left(\frac{t}{T_{obs}}\right) \exp(-j \frac{4\pi f_0}{c} [K_0 + K_1 t] [x_k + y_k \theta(t)]).$$

여기서 $\delta r(t)$ 성분은 range-migration을 발생시키는 성분으로, 해상도의 절반보다 작을 경우 무시될 수 있고 일반적으로 ISAR 영상 형성 시 만족되기 때문에 제거될 수 있다. 따라서, 최종적인 바이스테틱 ISAR 영상은 t 축 방향으로 역 푸리에 변환을 통해 얻을 수 있다.

$$I_{BI}(\tau, \nu, x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} S_r(\tau, t) \exp(-j2\pi t \nu) dt. \quad (15)$$

수식 (14)에서 볼 수 있듯이, $[K_0 + K_1 t]$ 성분은 표적의 ISAR 영상의 거리와 도플러 방향의 왜곡을 발생시킴을 알 수 있고, 이는 송신기 및 수신기와 표적이 이루는 각도 β 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

3. 템플릿 매칭을 이용한 영상 합성

표적이 편대비행 하는 경우, 레이더 빔 내부에 다수의 표적이 들어오게 되고, 생성된 ISAR 영상은 다수의 단일표적의 ISAR 영상이 겹쳐진 상태로 생성된다. 각각의 단일 표적들은 서로 다른 속도, 가속도, 관측각도 등으로 인한 위상차로 인해 ISAR 영상을 각각의 표적으로 분리하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서 편대비행 표적의 ISAR 영상을 이용한 식별을 위해 학습된 단일 표적의 데이터베이스를 이용해 실시간으로 영상을 합성하는 기법을 수행한다 [6]. 편대비행 표적의 ISAR 영상을 다음과 같다.

$$ISAR_{r_o}(x, y) = \sum_{n=1}^N a_n ISAR_n(x - r_n, y - c_n). \quad (16)$$

위 식에서 $ISAR_{f_o}(x,y)$ 는 편대비행 표적의 ISAR 영상을, $n(n=1,2,\dots,N)$ 은 편대를 구성하는 표적의 수, $ISAR_n(x,y)$ 은 단일표적의 ISAR 영상, a_n 는 단일표적의 ISAR 영상의 합성 척도, (r_n, c_n) 는 합성 위치를 나타낸다. 레이더와 표적사이의 거리가 상황에 따라 달라지기 때문에 진폭에 대한 정규화 과정이 필요하며, 이는 $ISAR_{f_o}(x,y)$, $ISAR_n(x,y)$ 에 모두 적용하여야 하며 수식은 다음과 같다.

$$\overline{ISAR}_{f_o}(x,y) = \frac{ISAR_{f_o}(x,y)}{\sqrt{\sum_{y=1}^R \sum_{x=1}^W ISAR_{f_o}(x,y) ISAR_{f_o}^*(x,y)}}, \quad (17)$$

$$\overline{ISAR}_n(x,y) = \frac{ISAR_n(x,y)}{\sqrt{\sum_{y=1}^R \sum_{x=1}^W ISAR_n(x,y) ISAR_n^*(x,y)}}.$$

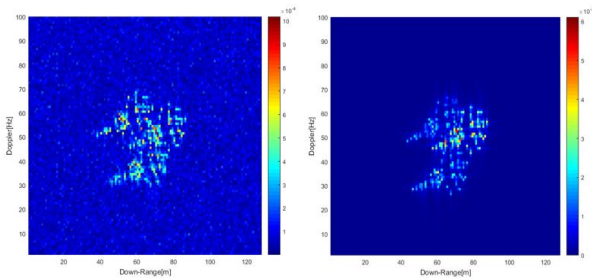
위 식에서 W, R 은 영상의 크기를 나타내며, $*$ 은 Conjugate를 나타낸다. $ISAR_n(x,y)$ 이 합성되는 위치는 $ISAR_{f_o}(x,y)$ 를 구성하는 2차원 픽셀들이 그 후보가 되며, 후보 위치를 예측하기 위해 템플릿 매칭을 이용한다. $ISAR_n(x,y)$ 에서 표적의 윤곽이 들어나는 부분만을 추출하여 $ISAR_{f_o}(x,y)$ 와 상관관계 (correlation)를 계산하며, 이러한 과정은 영상의 수평, 수직방향에 관해서 모두 수행한다.

$$C_k(r,c) = \sum_{y=1}^Q \sum_{x=1}^P \left| \overline{ISAR}_{f_o}(x,y) \overline{ISAR}_n^*(x-r, y-c) \right|. \quad (18)$$

여기서 (r,c) 는 correlation이 수행된 위치이며, C_k 는 (r,c) 에서 계산된 correlation value, P, Q 는 표적의 윤곽만 들어난 $ISAR_n(x,y)$ 의 영상의 크기를 나타낸다. 위 과정을 통해 합성 위치 후보군은 다음과 같이 선정할 수 있다.

$$\overline{r}_k, \overline{c}_k = \begin{bmatrix} r_1 & c_1 \\ r_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} = \text{find}\{C_k(r,c) \geq a \times \max\{C_k(r,c)\}\}. \quad (19)$$

a 는 0과 1사이의 실수 값을 갖는 상수이며, 0에 가까울수록 실제 투영된 위치가 산정된 위치에 포함될 확률이 높아



(a) ISAR 영상 (b) 합성된 ISAR 영상

그림 4. 편대비행 표적 ISAR 영상

Fig. 4. ISAR images of formation targets

지나 위치 후보가 많아짐에 따라 합성될 수 있는 경우의 수가 증가하기 때문에 계산의 부담감 또한 커지게 된다. 훈련된 단일표적 ISAR 영상 범위 내에서 식 (19)를 통해 산정된 후보 위치벡터 $(\overline{r}_1, \overline{c}_1, \overline{r}_2, \overline{c}_2, \dots, \overline{r}_k, \overline{c}_k)$ 를 이용해 ISAR 영상 합성을 수행한다.

$$X = \begin{bmatrix} \widehat{r}_1 & \widehat{r}_2 & \dots & \widehat{r}_N \\ \widehat{c}_1 & \widehat{c}_2 & \dots & \widehat{c}_N \\ a_1 & a_2 & \dots & a_N \end{bmatrix}$$

$$= \underset{X}{\operatorname{argmax}} \sum_{y=1}^R \sum_{x=1}^W \left| \overline{ISAR}_{f_o}(x,y) \right| \left| \overline{ISAR}_{com}(x,y) \right| \quad (20)$$

$$ISAR_{com}(x,y) = \sum_{n=1}^N X[3,n] ISAR_n(x-X[1,n], y-X[2,n]).$$

$$\overline{ISAR}_{com}(x,y) = \frac{ISAR_{com}(x,y)}{\sqrt{\sum_{y=1}^L \sum_{x=1}^K ISAR_{com}(x,y) ISAR_{com}^*(x,y)}}.$$

이와 같이 표적이 선택되어지는 조합, 합성 위치 및 합성 척도를 최적화하기 위해 식 (20)을 cost function으로 하는 PSO 알고리즘을 적용하여 최적화 한다.

$$v_p^{i+1} = v_p^i + r_1(p_i - x_p^i) + r_2(g - x_p^i) \quad (21)$$

$$x_p^{i+1} = x_p^i + v_p^{i+1}.$$

위 식에서 r_1, r_2 는 0과 1사이의 임의의 실수이며, p_i 는 i 번째 입자가 현재의 시간 k 까지 위치를 탐색하면서 찾았던 최고의 위치이며, g 는 군집 전체에서 현재까지 찾았던 최고의 위치를 나타낸다. 위 같은 PSO 알고리즘을 통해 p 번째 위치는 v_p^{i+1} 이 더해진 위치로 이동되며, 최고의 매칭 점수가 나올 때 까지 반복적으로 수행된다.

합성된 ISAR 영상은 다음 그림 4와 같으며, 그림 (a)의 경우, SNR=0 환경에서 생성된 편대비행 표적의 ISAR 영상을, (b)의 경우 훈련된 단일표적 ISAR 영상으로 합성된 ISAR 영상을 나타낸다.

III. 시뮬레이션 결과

1. 시뮬레이션 조건

본 편대비행 표적식별에 사용된 학습데이터는 시간과 메모리 측면에서 효율적이고, 또한 적은 데이터베이스 양으로도 높은 표적식별 성능을 가지고 있는 기동 시나리오 바탕으로 구성된 ISAR 영상 데이터베이스 [7]를 사용하였다. 기동 시나리오 기반 훈련DB 구축을 위해, 그림 5와 같이 송·수신기 위치를 설정하고 3차원 공간에서의 비행 시작점에서 비행 표적은 일정한 방향과 일정한 속도로 기동한다. 이때 표적의 레이더 신호는 ISAR 영상의 세로방향의 해상도와 가로방향의 해상도가 같아지도록 처리되었다. 훈련 DB 구축

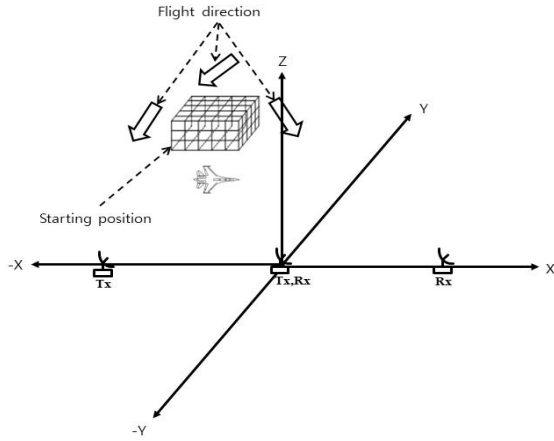


그림 5. 기동 시나리오 기반 학습 DB 구축
Fig. 5. Building a training database based on flight scenario

표 1. 학습 DB 파라미터

Table 1. Parameters for training DB

Monostatic	$T_x, R_x = [0 \ 0 \ 0] \text{km}$
Bistatic	$T_x = [-15 \ 0 \ 0] \text{km}, R_x = [15 \ 0 \ 0] \text{km}$
Direction	$[1 \ -1 \ 0], [0 \ -1 \ 0], [-1 \ -1 \ 0]$
Velocity	300m/s
Flight Starting Position	
x position	-5, -3, 0, 3, 5km
y position	100, 110, 120, 130, 140km
z position	3, 4, 5km

표 2. 레이더 파라미터

Table 2. Parameters of radars

Center Frequency	10GHz
Bandwidth	200MHz
Pulse Repetition	2000Hz
Pulse width	$30 \mu\text{sec}$
Number of Pulse	100

을 위한 시뮬레이션 파라미터와 레이더 파라미터는 다음 표 1, 2와 같다.

훈련에 사용된 표적은 총 4종류로, 점 산란원으로 구성된 F-18, F-14, Su-35, Rafal을 사용하였으며, 훈련 DB를 구성하는 ISAR 영상의 총 개수는 4(표적의 종류) \times 75(비행 시작점) \times 3(비행방향)=900개 이다. 각 표적의 바이스태틱 ISAR 영상은 다음 그림 6과 같다.

시험데이터의 경우, 모노스태틱 ISAR 영상과 바이스태틱 ISAR 영상의 차이점을 확인하기 위해 표적이 그림 7과 같이 레이더의 LOS 방향으로 접근하는 경우를 구성하였다. 편대비행 표적의 대수는 1~4대 범위에서 임의로 선택되며, 표적의 비행 시작점은 x좌표는 $x=0$, y, z 좌표는 설정된 3차원 공간범위 내에서 임의의 시작점을 선택 후, 선택된 시작점 중심으로 각각의 표적 사이 거리가 20~30m 떨어지게 되도록 3차원 공간 내 표적을 배치하여 편대비행을 구성하였다.

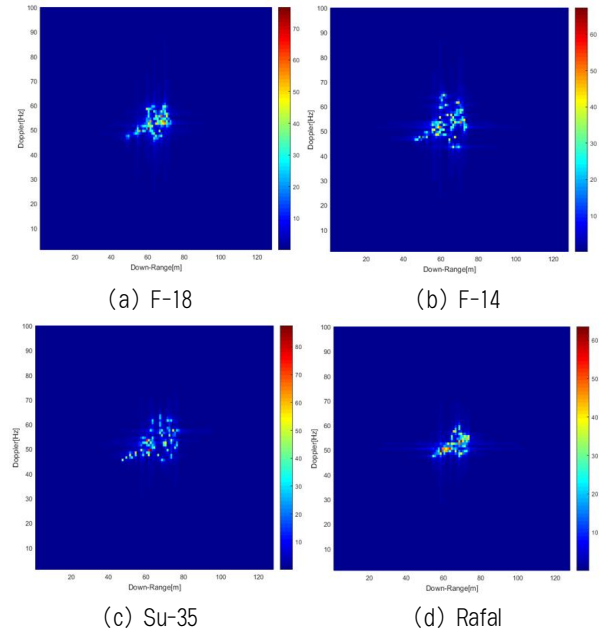


그림 6. 바이스태틱 ISAR 영상

Fig. 6. Bistatic ISAR Images

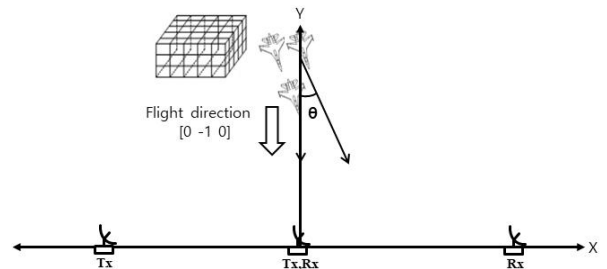


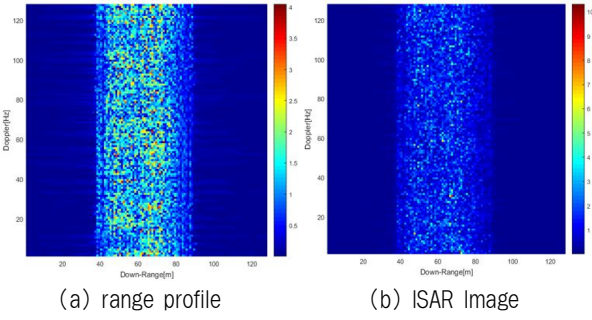
그림 7. 기동 시나리오 기반 시험 DB 구축

Fig. 7. Building a test database based on flight scenario

또한, 표적의 기동 속도는 250m/s~300m/s 범위에서 선택 되고, 훈련 DB의 비행 방향 $[0 \ -1 \ 0]$ 에 $\theta(-5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ)$ 만큼 회전시켜 기동하게 설정 하였다. 또한 표적의 레이더 신호는 앞선 훈련 DB 구축과 마찬가지로 ISAR 영상의 세로방향의 해상도와 가로방향의 해상도가 같아지도록 처리되었으며, TMC 보상기법을 통해 ISAR 영상을 생성한다.

하지만, 표적의 대수가 증가함에 따라 산란점 또한 증가하게 되고, 이로 인한 위상보정에 있어 엔트로피 비용함수의 국부최소가 많이 발생하게 되고, 이로 인하여 영상의 초점이 맞추어지지 않는 현상이 그림 8 (b)과 같이 부분적으로 발생한다. 이러한 경우는 시험 DB에서 제외하고 식별을 수행하였으며, 향후 이러한 현상을 보상할 수 있는 새로운 연구기법이 필요할 것으로 보인다.

시험 DB구성의 경우, 3차원 공간 내에 임의로 비행 시작점 30개를 선택하였으며, 4종류의 표적에 대해 각 시작점 당 θ 별로 시험 영상들을 구성하였다.



(a) range profile (b) ISAR Image
 그림 8. 위상보정이 이루어지지 않는 ISAR 영상
 Fig. 8. ISAR Images without phase compensation

그림 9은 시작점 $x=0km, y=125km, z=3km$, 비행속도 280m/s, 표적의 대수가 3대 일 때, θ 에 대한 Su-35의 모노스태틱, 바이스태틱 ISAR 영상을 나타내며, 구축된 시험 DB 수는 모노스태틱/바이스태틱 ISAR 영상 각각 4(표적의 종류)X30(ISAR 영상 수)X11(θ 범위)=1320개 이다.

2. 제안된 기법

본 논문에서는 모노스태틱/바이스태틱 ISAR 영상을 이용해 효율적으로 식별하기 위해 두 영상을 융합해서 식별하는 기법을 제안한다. 아래 그림 10은 제안된 기법 절차를 나타내며, 우선 표적이 탐지된 후, θ 의 크기에 따라 모노스태틱/바이스태틱 ISAR 영상을 획득 후, θ 에 따른 LOS 와 비행 방향 이 이루는 각도 Aspect angle의 임계값 α 기준으로 식별에 사용될 영상을 구분한다.

임계값 α 에 의해 식별에 사용될 영상이 구분되면 위 조건과 같이 위 조건과 같이 훈련 DB 와 시험 DB를 구축 후, 훈련 DB를 이용한 영상 합성을 통해 식별을 위한 비교 DB를 구축한다. 영상 합성의 경우, 위에서 언급한 템플릿 매칭과 PSO 기법을 이용해 합성하며, 이러한 비교 DB는 실제 표적의 종류와 대수를 알 수 없기 때문에, 표적의 종류와 표적의 대수 경우의 수 따라 모두 수행되어야 한다. PSO 합성 변수의 경우, 템플릿 매칭을 통한 후보군 중 상위 7개의 후보군을 선택하여 수행하였으며 $P=10000, I=10$ 값을 사용하였다. 구축된 비교 DB와 시험 DB에 영상의 무게중심을 일치시키기 위해 2-D Fourier Transform 특성과 영상의 회전 불변성을 위한 극 사상 변환을 이용해 특성벡터 [8]를 추출하고, NN (Nearest Neighbor) 구분기를 이용하여 식별을 수행하였다. 또한 잡음에 대한 식별 성능의 변화를 확인하기 위해 신호 대 잡음비 SNR (Signal to Noise Ration)가 0dB ~25dB까지 5dB 간격으로 식별을 수행 하였다. 식별 성능은 다음 식 (22)과 같이 전체 시험 데이터 중에서 올바르게 구분한 수의 비율로 정의하였다.

$$P_c = \frac{\text{올바르게 구분한 수}}{\text{전체 시험 데이터 수}} \times 100[\%]. \quad (22)$$

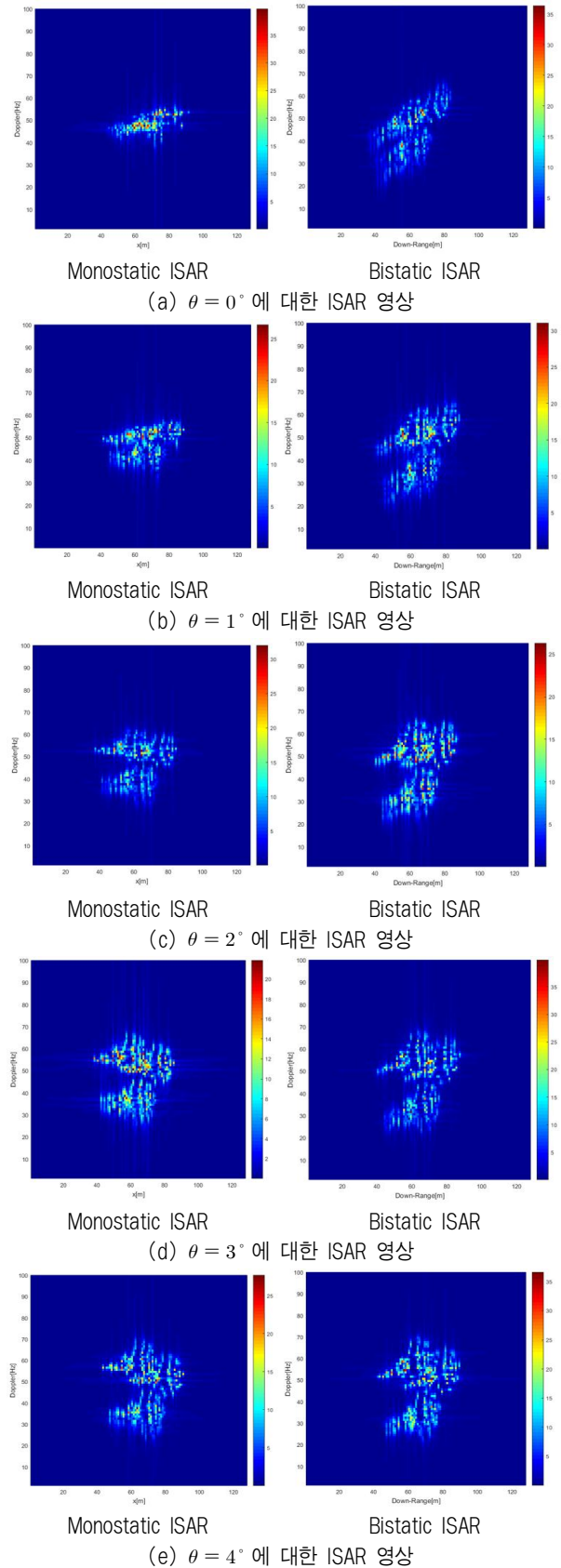


그림 9. θ 에 대한 표적의 모노스태틱, 바이스태틱 ISAR 영상
 Fig. 9. monostatic, bistatic ISAR image of targets for various θ

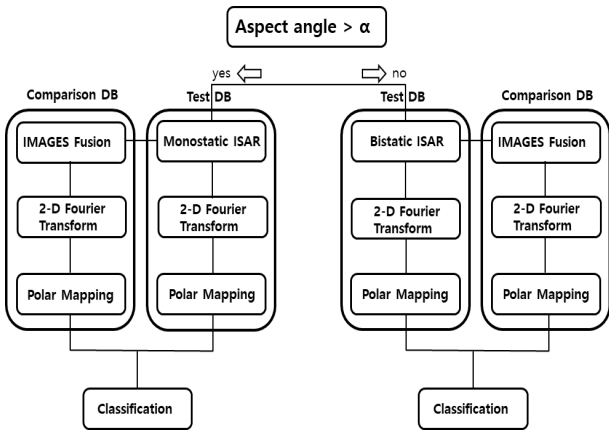


그림 10. 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상 융합을 통한 식별 기법
Fig. 10. Identification method though fusion

3. 시뮬레이션 결과

아래 그림 11은 SNR 및 θ 의 변화에 따른 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상 식별 결과를 나타낸다.

그림 9와 그림 11에서 볼 수 있듯이, 모노스테틱 ISAR

영상의 경우, θ 의 범위가 $0^\circ \leq |\theta| \leq 2^\circ$ 일 때, 표적의 cross-range 방향의 해상도를 얻을 수 없어 아주 낮은 표적 식별 능력을 보였다. $|\theta|=3^\circ$ 일 경우, 어느 정도 cross-range 방향의 해상도를 얻을 수 있어, 식별 능력이 크게 향상 된 것을 확인할 수 있었다. $|\theta| \geq 4^\circ$ 이상일 경우, 충분한 해상도를 얻을 수 있어 98% 이상의 식별 능력을 보였다.

반면에, 바이스테틱 ISAR 영상의 경우 모든 θ 범위에서 표적의 ISAR 영상을 얻을 수 있음을 보였고 이는 모노스테틱의 단점을 해결 할 수 있음을 확인할 수 있었다. 바이스테틱 ISAR 영상 식별 능력의 경우, $|\theta| \geq 2^\circ$ 일 때 95% 이상 식별 능력을 보였으나 $0^\circ \leq |\theta| < 2^\circ$ 일 경우, 98% 보다 다소 낮은 88%의 식별 능력을 보였는데, 이는 시간에 따른 관측각도의 변화가 크지 않아 가로방향의 해상도와 동일한 수직방향의 해상도를 얻기 위해 긴 관측시간이 필요하고, 이에 따른 바이스테틱 각도 β 가 커짐에 따른 약간의 영상의 왜곡 발생으로 인한 영향으로 판단된다.

그림 12은 θ 에 따른 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상

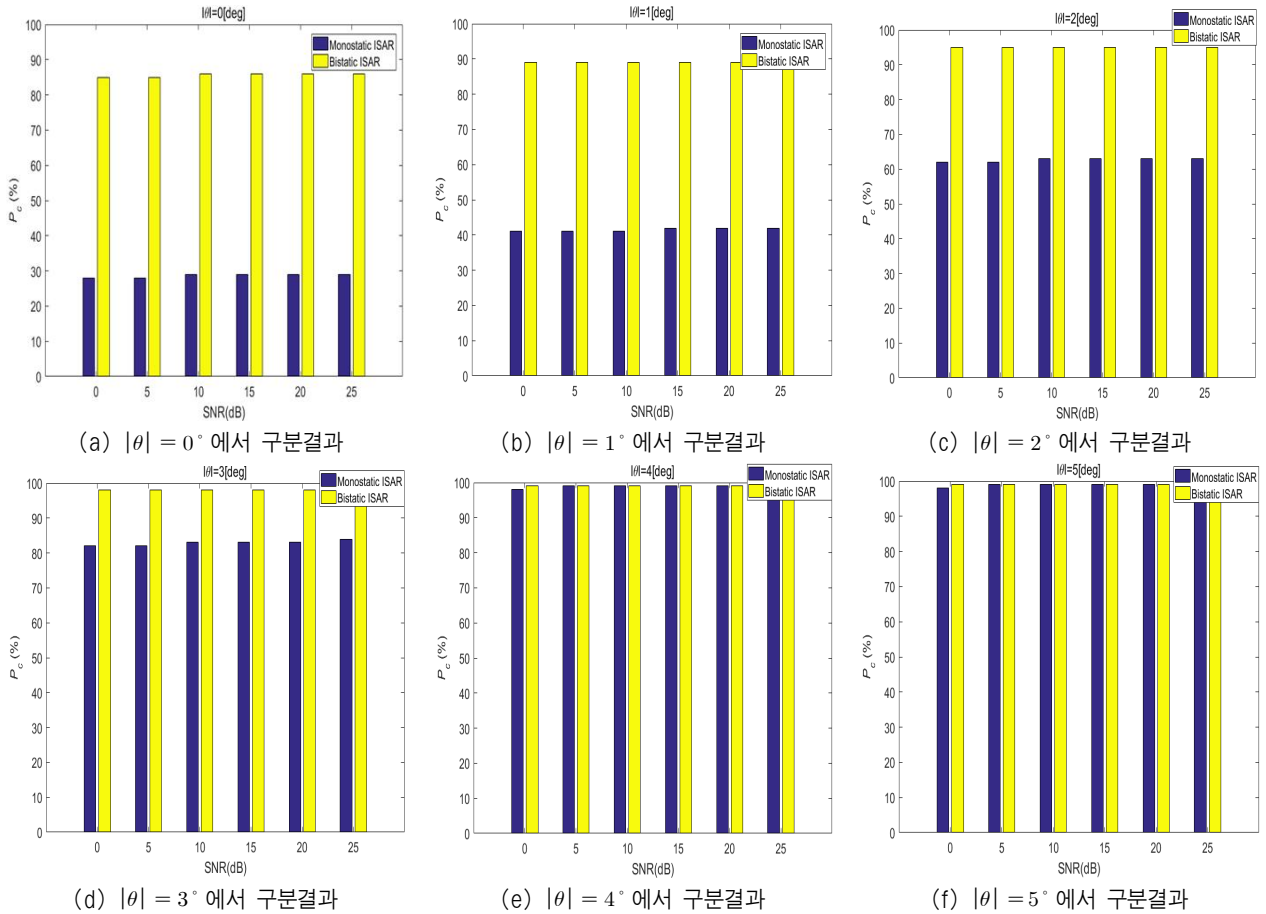


그림 11. SNR, θ 에 따른 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상 식별 결과

Fig. 11. P_c of monostatic, bistatic ISAR images for various θ , SNR

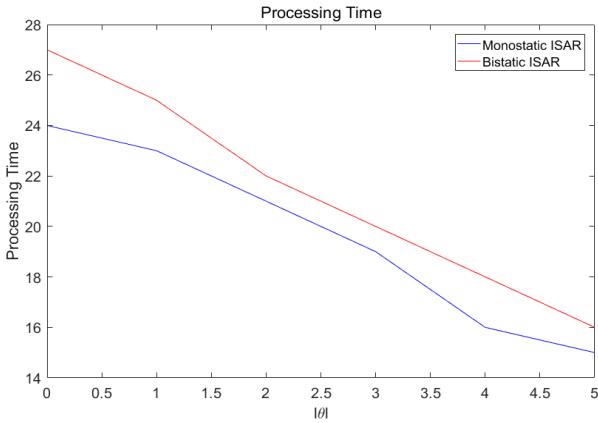


그림 12. θ 에 따른 영상 처리 시간
Fig. 12. Processing time for various θ

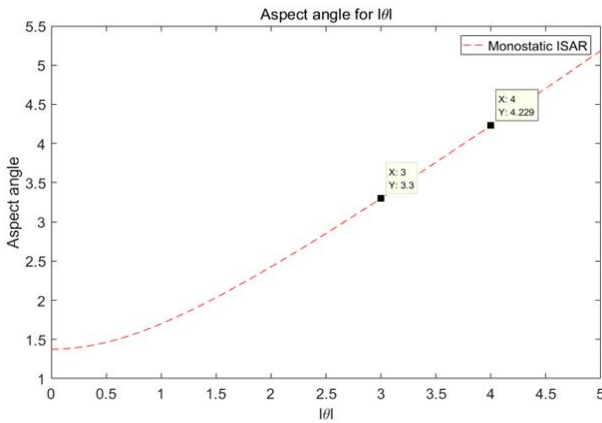


그림 13. θ 에 따른 Aspect angle(모노스테틱 ISAR)
Fig. 13. Aspect angle for various θ

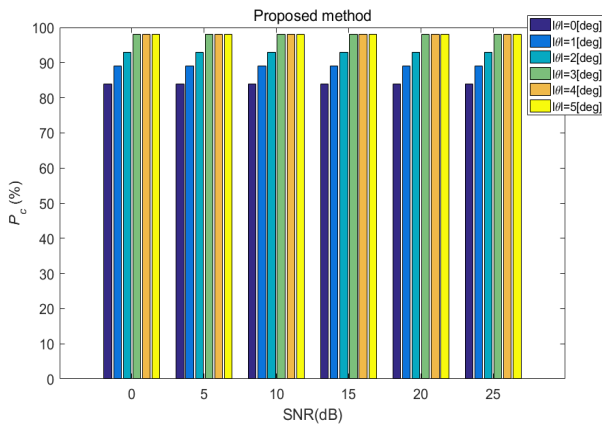


그림 14. SNR, θ 에 따른 융합 기법 식별 결과
Fig. 14. P_c of proposed method for various θ , SNR

처리 시간 비교를 나타낸다. 처리시간의 경우, 거리 방향의 해상도와 동일한 수직 방향 해상도를 확보하기까지의 데이터 수집시간 및 Range Profile (RP) 생성을 위한 거리 방향 압축 (Matched Filter), 위 이론에 언급된 TMC 과정이 포함

되었으며, 평균적으로 바이스테틱 ISAR 영상 처리시간이 모노스테틱 ISAR 영상 처리 시간보다 더 많은 처리 시간이 필요함을 확인 할 수 있었다. 처리시간에 대한 분석결과, 거리 방향 압축 및 TMC 과정 시간은 모노스테틱/바이스테틱 유사하게 나타났으며, 데이터 수집시간에서 차이가 낮음을 확인하였는데, 이는 바이스테틱 ISAR 영상의 왜곡으로 인해 모노스테틱 ISAR 영상보다 더 많은 관측각도가 필요함에 따른 시간 차이로 판단된다.

시뮬레이션 결과, 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 모두 $0^\circ \leq |\theta| \leq 2^\circ$ 범위에서 영상의 수직방향의 해상도를 얻기 위해 긴 관측시간이 필요함에 따라 20초 이상의 긴 처리시간을 보였으며, θ 가 증가함에 따라 영상의 수직방향의 해상도를 얻기 위한 관측시간이 점차 줄어들게 되고, 이에 따라 처리시간이 감소함을 확인할 수 있었다.

그림 13은 θ 에 따른 모노스테틱 ISAR 영상의 Aspect angle를 나타낸 그래프로, $\theta \geq 4^\circ$ 이상일 때 Aspect angle이 4.3° 이상으로 나타났다. 즉, 모노스테틱 ISAR 영상으로 표적을 식별하기 위해서는 최소 4.3° 이상의 Aspect angle이 필요하며, 본 논문에서 제시한 기법에서 임계값 α 값은 4.3° 으로 설정하였다. 따라서 시스템 동기화 및 안정성 측면을 위해 모노스테틱 ISAR 영상에 기반을 두되, 임계값 기준으로 Aspect angle이 4.3° 이상일 때는 모노스테틱 ISAR 영상으로, 이하일 때는 제한적으로 바이스테틱 ISAR 영상을 사용하여 표적을 식별하는 것이 식별 성능이나 신호 처리시간 측면에서 효율적이라는 것을 확인할 수 있다.

그림 14는 제시한 기법을 통한 식별 성능을 나타낸다. 바이스테틱 ISAR 영상을 제한적으로 사용하여 모노스테틱 ISAR 영상의 단점을 보완하고, 그 이후에는 모노스테틱 ISAR 영상을 사용함으로써, 단일 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상만으로 식별하는 것보다 식별 성능이나 신호 처리시간 측면에서 효율적이라는 것을 확인할 수 있다

IV. 결론

본 논문에서는 기동하는 편대비행 표적에 대한 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상을 획득하고, 두 ISAR 영상을 융합해 효율적으로 표적 식별하는 기법을 제시하였다. 식별을 위해 기동 시나리오 기반의 데이터베이스를 구축하였고, 겹쳐진 표적 ISAR 영상 식별을 위해 훈련된 단일 표적 ISAR 영상을 이용한 영상합성 기법을 사용하여 표적 식별을 수행하였다.

바이스테틱 레이더는 데이터 동기화 및 안정적 측면에서 제한적으로 사용되는 것이 나오며, 이에 따라 모노스테틱 레이더에 기반을 두되, 4.3° 이상의 aspect angle 범위에서는

모노스테틱 ISAR 영상으로, 그 이하 범위에서는 바이스테틱 ISAR 영상으로 표적 식별 수행을 하는 것이 식별 능

력이나 처리시간 면에서 효율적임을 확인하였다.

하지만 aspect angle이 2° 이하 일 때 발생하는 바이스 태틱 ISAR 영상의 왜곡으로 인한 식별 성능 저하는 해결되어야 하는 문제이며, 왜곡을 보상하는 연구나 식별을 위한 많은 데이터베이스가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] C. Ozdemir, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithm," John Wiley & Sons, Inc, Chapter 8, pp. 299-344, Feb. 2012.
- [2] S. B. Cha, S. W. Yoon, S. H. Hwang, M. Kim, J. H. Jung, J. H. Lim, S. H. Park, "Radar Target Recognition Using Fusion of Monostatic/bistatic ISAR Images," Korea Institute of Information Technology, Vol. 16, No. 12, pp. 93-100, Dec. 2018.
- [3] M. Weib, "Synchronisation of Bistatic Radar System," IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 1750-1753, Dec. 2004.
- [4] S. J. Lee, S. H. Lee, M. S. Kang, E. J. Yang, K. T. Kim, "Analysis of Target Identification Performances Using Bistatic ISAR Images," Korea Electromagnetic Engineering Society, Vol. 27, No. 6, pp. 566-576, June. 2016.
- [5] S. B. Cha, S. W. Yoon, S. H. Hwang, J. H. Jung, S. H. Park, "Analysis of Phase Adjustment Techniques for ISAR Imaging Targets in Formation Flight," Korea Institute of Information Technology, Vol. 16, No. 5, pp. 67-74, May. 2018.
- [6] M. Kim, K. B. Kang, J. H. Jung, K. T. Kim, S. H. Park, "Efficient Fusion Method to Recognize Targets Flying in Formation," Korea Electromagnetic Engineering Society, Vol. 27, No. 8, pp. 758-765, Aug. 2016.
- [7] S. H. Park, J. H. Jung, K. T. Kim, "Performance Analysis of the Scenario Based Construction Method for Real Target ISAR Recognition," Progress in Electromagnetics Research, Vol. 128, pp. 137-151, Jan. 2012.
- [8] S. H. Park, J. H. Jung, S. H. Kim, K. T. Kim, "Efficient Classification of ISAR Images Using 2D Fourier Transform and Polar Mapping," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 51, No. 3, pp. 1726-1736, July 2015.

Sang-Bin Cha (차상빈)



2017 Electronics Engineering from Pukyong National University, Busan, Republic of Korea (B.S.)

2019 Electronics Engineering from Pukyong National University, Busan, Republic of Korea (M.S.)

2020~Electronics Engineering from Pukyong National University, Busan, Republic of Korea (Course of Ph. D)

Field of Interests: Radar target imaging and recognition, Radar signal processing

Email: teddy@pukyong.ac.kr

In-Oh Choi (최인오)



2012 Electronics Engineering from Pukyong National University, Busan, Republic of Korea (B.S.)

2014 Electronics Engineering from Pukyong National University, Busan, Republic of Korea (M.S.)

2020 Electronic Engineering from Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea (Ph.D.)

2021~Electronics and Communications Engineering in Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea (Assis Prof.)

Career:

2020~2021 Senior Researcher (Agency for Defense Development)

Field of Interests: Micro-Doppler analysis, Ballistic target discrimination, Vital sign detection, Automotive target recognition, Calibration of polarimetric SAR

Email: inohchoi@kmou.ac.kr

Joo-Ho Jung (정주호)



1995 Electronic Engineering from Seoul National University, Seoul, Republic of Korea (B.S.)

1998 Electronic Engineering from Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea (M.S.)

2007 Electronic Engineering from Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea (Ph.D.)

2020~Kookmin University, Seoul, Korea (Res prof.)

Field of Interests: Radar target imaging and recognition, Radar signal processing, Micro-Doppler analysis, Ballistic target discrimination

Email: jungjoo068@gmail.com

Sang-Hong Park (박상홍)

2004 Electronic Engineering from Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea (B.S.)

2007 Electronic Engineering from Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea (M.S.)

2010 Electronic Engineering from Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea (Ph.D.)

2010~Electronics Engineering in Pukyong National University, Busan, Republic of Korea (Prof.)

Field of Interests: Radar target imaging and recognition, Radar signal processing, Micro-Doppler analysis, Ballistic target discrimination, Deep Learning

Email: radar@pknu.ac.kr