



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상
융합을 통한 편대비행 표적 식별



부경대학교 대학원

전자공학과

차상빈

공 학 석 사 학 위 논 문

모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상
융합을 통한 편대비행 표적 식별

지도교수 박 상 홍

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2019년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 자 공 학 과

차 상 빈

차 상 빈의 공학석사 학위논문을
인준함.

2019년 2월 22일



주 심 공학박사 이 원 창 (인)

위 원 공학박사 임 창 현 (인)

위 원 공학박사 박 상 홍 (인)

목 차

Abstract	v
제1장 서론	1
제2장 본론	3
2.1 모노스테틱 ISAR 신호 모델	3
2.2 바이스테틱 ISAR 신호 모델	6
2.3 편대비행 표적 ISAR 영상을 위한 위상보정 기법	10
2.3.1 Prominent Point Processing(PPP)	11
2.3.2 Phase Gradient Autofocus(PGA)	12
2.3.3 Minimum-Entropy Phase Adjustment(MEPA)	13
2.3.4 Minimum-Tsallis Entropy Phase Adjustment(MTEPA)	14
2.4 편대비행 표적식별 문제의 특징	15
2.5 편대비행 표적 식별을 위해 제안된 합성기법	18
2.5.1 ISAR 영상 합성을 위한 위치 및 척도 인자 추정	18
2.5.2 2D Fourier Transform of ISAR Image	20
2.5.3 ISAR 영상 합성기법	22
2.6 표적식별 기법	24
2.6.1 합성된 ISAR 영상을 이용한 표적식별	24
2.7 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상 융합	28
제3장 실험 결과	30
3.1 위상보정 기법 비교 분석	30
3.2 제안된 기법을 통한 합성결과	36
3.3 구분결과	39

3.3.1 θ 에 따른 모노스테틱 vs 바이스테틱 처리 시간 비교	43
3.3.2 θ 에 따른 모노스테틱 vs 바이스테틱 ISAR 영상	44
3.3.3 θ 에 따른 모노스테틱 vs 바이스테틱 ISAR 영상 표적식별 결과	45
3.3.4 모노스테틱, 바이스테틱 ISAR 융합을 통한 식별	49
제4장 결 론	50
참고문헌	52
부록	55



그림 목차

[그림 1] 모노스테틱 ISAR 영상의 기하구조	4
[그림 2] 바이스테틱 ISAR 영상의 기하구조	6
[그림 3] 편대비행 표적식별을 위한 합성기법	17
[그림 4] 단일/편대비행 표적의 ISAR 영상과 2D FT 과정을 통한 단일/편대 비행 표적의 영상	21
[그림 5] 극 좌표계 사상 원리	26
[그림 6] 극 좌표계로 사상된 ISAR 영상	27
[그림 7] 모노스테틱/바이스테틱 레이더 융합	28
[그림 8] 두 레이더 융합을 통한 편대비행 표적 식별 순서도	29
[그림 9] 편대비행 표적 점 산란원 모델	31
[그림 11] SNR 에 따른 엔트로피	34
[그림 12] SNR 에 따른 처리시간	34
[그림 13] 2D F·T ISAR 영상 합성결과	37
[그림 14] 복원된 ISAR 영상 합성결과	38
[그림 15] 훈련 DB ISAR 영상	40
[그림 16] θ 에 따른 Monostatic vs Bistatic 처리 시간 비교	43
[그림 17] θ 에 따른 Monostatic vs Bistatic ISAR 영상 비교	44
[그림 18] θ 에 따른 Monostatic vs Bistatic ISAR 식별능력 비교 ...	45
[그림 19] SNR에 따른 Monostatic vs Bistatic ISAR 식별능력 비교	48
[그림 20] SNR에 따른 융합 식별능력 비교	49

표 목차

[표 1] 레이더 시뮬레이션 변수	31
[표 2] 편대 비행 표적의 시뮬레이션 변수	31
[표 3] 훈련 DB 파라미터	41
[표 4] 레이더 파라미터	41



Radar Targets in formation Flight Recognition Using a Fusion of Monostatic/Bistatic ISAR Images

Sang Bin Cha

*Department of Electronic Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

inverse synthetic aperture radar (ISAR) images are 2-dimensional RCS distributions that can be generated through radar reflection signals and provide very effective radar signature for target recognition using radar.

For target approaching along radar's line of sight(LOS), the bistatic ISAR can compensate for the weakness of the monostatic ISAR which can not obtain the vertical resolution of the image. However, bistatic ISAR have longer processing times and variability in scattering mechanisms than monostatic ISAR, so target identification using only bistatic ISAR images can be inefficient.

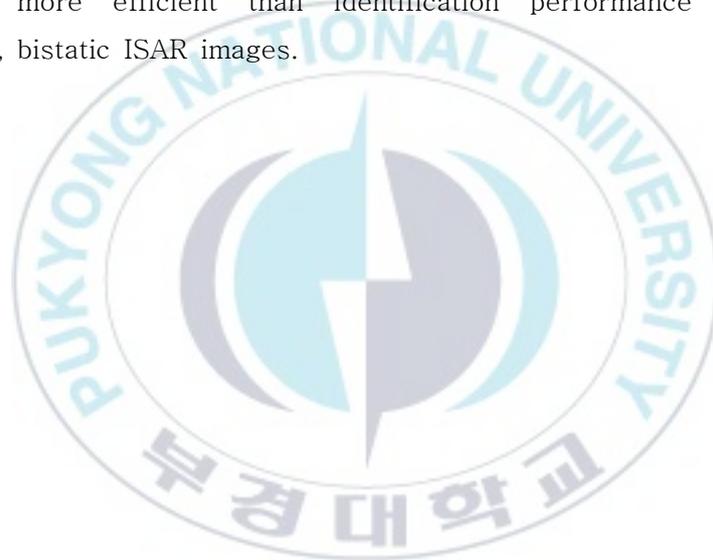
In case of targets in formation flight, when there are many targets in the single radar beam, ISAR images are generated in real time by the type and the number of targets, real time projection, and scale factor according to variance of radar beam. In addition, since it is impossible to predict the above parameters in advance, unlike the single target identification problem, it is difficult to perform the multiple targets identification using the previously trained database.

Therefore, this paper analyzes targets in formation flight identification performance using monostatic and bistatic ISAR images of targets approaching along radar's LOS and proposes a method of target

identification through fusion of two radars. also, to identify targets in formation flight, ISAR images of a single target that have been trained previously are combined using 2-D fourier transform property and then a real time database is constructed to perform multiple targets classification.

The projection position and the scale factor are optimized and combined through particle swarm optimization (PSO), and the process is repeated according to the type and number of targets to construct a real time database.

Simulation results demonstrate that identification performance through fusion is more efficient than identification performance using only monostatic, bistatic ISAR images.



I. 서론

역합성 개구 레이더(ISAR, Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상은 표적의 여러 관측 각도에서 수신된 광대역 레이더 신호들에 동기화 처리과정(Coherent Processing)을 적용하여 형성된 2차원 산란분포[1]이며, 이러한 ISAR 영상들은 표적의 기하학적인 정보를 내포하기 때문에 비협조적 표적 식별(NCTR, Non-Cooperative Target Recognition)에 효율적으로 사용될 수 있다[2].

ISAR 영상을 형성하기 위한 레이더의 경우, 대표적으로 한 대의 레이더가 송·수신기의 역할을 수행하는 모노스테틱 레이더와 두 대의 레이더가 각각 송·수신기 역할을 수행하는 바이스테틱 레이더가 있다. 모노스테틱 레이더의 경우, 한 대의 레이더로 송·수신하는 장점이 있는 반면에 표적이 레이더의 LOS(Line Of Sight) 방향으로 진행할 때 ISAR 영상의 수직거리(cross-range) 방향으로 충분한 해상도를 얻을 수가 없다는 단점이 존재한다. 그 결과, 모노스테틱 레이더를 이용한 NCTR의 경우, 식별 성능은 제한적인 수직거리 방향 해상도에 매우 의존적으로 나타난다. 하지만, 바이스테틱 레이더의 경우, 표적이 송·수신 레이더 중 어느 한 쪽의 LOS 방향으로 진행하더라도 수직거리 방향으로 충분한 해상도를 얻을 수 있다[3]. 따라서 바이스테틱 레이더를 통해 기존 모노스테틱 레이더의 단점을 해결 할 수 있으며, 그로 인해 ISAR 영상을 이용한 NCTR이 수행 가능하다. 그러나 바이스테틱 레이더는 모노스테틱 레이더에 비해 긴 처리시간과 기하구조에 따라 산란 메커니즘이 다양하게 변하고, 이로 인한 고유 왜곡 때문에 바이스테틱 ISAR 영상만을 이용한 NCTR 수행이 비효율적이다.

ISAR 영상에 대하여 관측각도별로 충분한 데이터가 학습되어 있을 경우 표적식별은 효과적으로 수행될 수 있다. 하지만, 군용기가 집단으로 행동할 시 안테나 내부에 다수의 표적이 들어오게 되고 이로 인하여 편대를 이룬 표적의 ISAR 영상은 각각의 단일 표적의 ISAR 영상들이 겹쳐진 형태로 생성된다. 이에 따라서 미리 학습해 두었던 데이터로는 표적들의 종류 및 개체 수, 실시간 위치에 따라서 합성되는 편대비행 중인 표적들 ISAR 영상의 식별이 불가능 하게 된다.

따라서 본 논문에서는 모노스테틱 및 바이스테틱 레이더를 기반으로 LOS 방향으로 진행하는 편대비행 표적의 ISAR 영상을 각각 획득하고 식별 성능을 비교 및 분석하고, 또한 식별성능의 효율성을 위하여, 모노스테틱, 바이스테틱 ISAR 영상 융합을 통한 표적식별 방법을 제시한다.

편대비행 중인 표적들을 식별하기 위하여 ISAR 영상에서 각 표적들을 분리하는 방법을 사용하지 않고, 기존에 학습되어 있던 ISAR 영상들을 합성하여 표적식별을 수행하였다. 2장에서는 편대비행 표적의 ISAR 영상 형성을 위한 위상보정 기법과 표적식별을 위해 제안된 합성기법, 모노스테틱과 바이스테틱 융합 기법들에 대해 서술한다. 2장 1~2 절에서는 모노스테틱 및 바이스테틱 ISAR 신호 모델을 서술한다. 2장 3절에서는 편대비행 표적의 ISAR 영상 형성을 위한 위상보정 기법들에 대해 서술하고 2장 4~5절에서는 편대비행 표적 식별 문제의 특징과 합성 기법을 소개한다. 2장 6절에서는 합성된 ISAR 영상을 이용하여 표적식별하기 위해 적용된 기법들에 대하여 서술하고, 2장 7절에서는 모노스테틱 및 바이스테틱 ISAR 영상 융합에 대해 설명한다. 3장에서는 시뮬레이션을 통한 위상보정 기법들의 비교, 분석 결과와 제안된 기법을 적용한 편대비행 표적식별 실험 결과를 통하여 효율성을 검증한다. 마지막 4장에서는 제안된 기법들에 대한 결론을 간략하게 기술한다.

II. 본론

2.1 모노스태틱 ISAR 신호 모델

모노스태틱 ISAR 영상을 형성하기 위한 기하 구조는 그림 1과 같다 [4]. (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 이다.

$$s(f,t) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot W(f,t) \cdot \exp[-j\varphi(x_k, y_k, t)] \quad (1.1)$$
$$W(f,t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_{\text{obs}}}\right) \text{rect}\left(\frac{f-f_0}{B}\right)$$

위 식 (1.1)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 사각함수이다. 작은 각도 근사 및 작은 대역폭 근사에 근거하여 위상은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\varphi(x_k, y_k, t) = \frac{4\pi f}{c} [R(t) + x_k - y_k \theta(t)] \quad (1.2)$$

식 (1.2)에서 $\theta(t)$ 는 Z축을 중심으로 회전한 표적의 회전 각도, c 는 빛의 속도, $R(t)$ 는 레이더와 표적사이의 거리를 나타낸다.

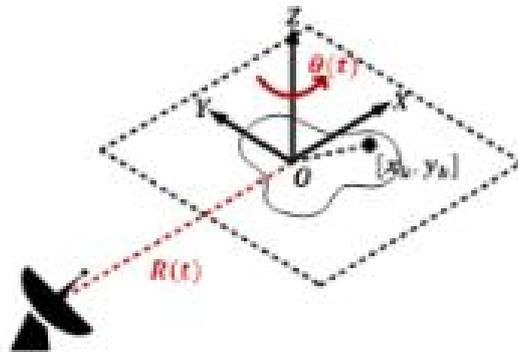


그림 1. 모노스태틱 ISAR 영상의 기하구조

거리정보 $R(t)$ 와 회전정보 $\theta(t)$ 는 다음 식 (1.3)과 (1.4)와 같이 각각 표현될 수 있다.

$$R(t) = R_0 + vt + \frac{1}{2!}vt^2 + \dots \quad (1.3)$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \Omega t + \frac{1}{2!}\Omega t^2 + \dots \quad (1.4)$$

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 거리 방향 축으로 역 푸리에 변환을 통해서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
S_r(\tau, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} s(f, t) \exp(j2\pi f\tau) df \\
&= AB \cdot \text{sinc}B \left(\tau - \frac{2}{c} [R(t) + x_k - y_k \theta(t)] \exp(j2\pi f_0 \tau) \right) \\
&\quad \cdot \text{rect} \left(\frac{t}{T_{obs}} \right) \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi f_0}{c} (R(t) + x_k - y_k \theta(t)) \right]
\end{aligned} \tag{1.5}$$

여기서 τ 는 fast-time으로 정의한다. 식 (1.5)에 거리정렬[5]을 수행하여 $R(t)$ 성분을, 위상보정을 통해 $\exp \left[-j \frac{4\pi f_0}{c} R(t) \right]$ 성분이 제거되면 최종적인 모노스테틱 ISAR 영상은 주파수방향 축으로 푸리에 변환을 통해서 얻을 수 있다.

$$I_M(\tau, \nu, x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} S_r(\tau, t) \exp(-j2\pi t\nu) dt \tag{1.6}$$

여기서 ν 는 slow-time을 나타낸다.

2.2 바이스테틱 ISAR 신호 모델

바이스테틱 ISAR 영상을 형성하기 위한 기하 구조는 그림 2와 같다 [6]. 그림 내 β 는 송신기 및 수신기와 표적이 이루는 각도를 나타낸다.

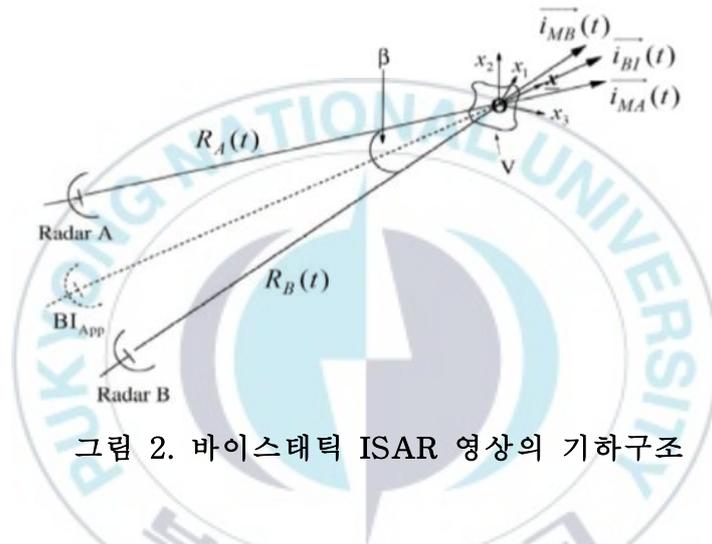


그림 2. 바이스테틱 ISAR 영상의 기하구조

바이스테틱 기하구조로부터 획득할 수 있는 표적에 대한 수신 신호는 시간-주파수 영역에서 다음과 같이 표현 될 수 있다. 여기서 $k(k=1,2,\dots,K)$ 는 표적을 구성하는 산란점의 개수 이다.

$$s(f,t) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot W(f,t) \cdot \exp[-j\varphi(\underline{x}_k,t)] \quad (2.1)$$

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

위 식 (2.1)에서 A_k 는 표적의 RCS, $\varphi(\cdot)$ 는 위상, \underline{x}_k 는 (x_1, x_2, x_3) 좌표계를 기준으로 하는 표적내 산란점들의 위치벡터, f_0 는 중심주파수, B 는 대역폭, T_{obs} 는 관측시간, $rect(\cdot)$ 는 사각함수이다. 여기서 위상함수는 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned}\varphi_{BI}(\underline{x}, t) &= \frac{(\varphi_{MA}(\underline{x}, t) + \varphi_{MB}(\underline{x}, t))}{2} \\ &= \frac{4\pi f}{c} [R(t) + K(t)\underline{x} \cdot \vec{i}_{BI}(t)]\end{aligned}\quad (2.2)$$

여기서 $\varphi_{MA}(\underline{x}, t)$ 는 레이더 A가 모노스태틱 기하구조 내 수신하는 신호의 위상함수, $\varphi_{MB}(\underline{x}, t)$ 는 레이더 B가 모노스태틱 기하구조 내 수신하는 신호의 위상 함수를 나타내며 다음 식 (2.3), (2.4)과 같이 정의한다.

$$\varphi_{MA}(\underline{x}, t) = \frac{4\pi f}{c} [R_A(t) + \underline{x} \cdot \vec{i}_{MA}(t)] \quad (2.3)$$

$$\varphi_{MB}(\underline{x}, t) = \frac{4\pi f}{c} [R_B(t) + \underline{x} \cdot \vec{i}_{MB}(t)] \quad (2.4)$$

위 식에서 \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 벡터이다.

식 (2.2)에서 $K(t) = \left| \frac{\vec{i}_{MA}(t) + \vec{i}_{MB}(t)}{2} \right| = \cos \frac{\beta(t)}{2}$, $\vec{i}_{BI}(t) = \frac{\vec{i}_{MA}(t) + \vec{i}_{MB}(t)}{|\vec{i}_{MA}(t) + \vec{i}_{MB}(t)|}$ 는 바이스태틱 레이더의 LOS 방향의 단위벡터, $R(t) = \frac{R_A(t) + R_B(t)}{2}$ 로 표적과 두 레이더 A,B 사이의 거리의 평균을 나타낸다. 거리정렬을 통한 $R(t)$ 성분 제거와 작은 각도 근사 및 작은 대역폭 근사에 근거하여 식 (2.2)은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\varphi(x_{1k}, x_{2k}, t) \approx \frac{4\pi f}{c} [K(t)(\Omega_k t x_{1k} + x_{2k})] \quad (2.5)$$

여기서 $K(t)$ 는 테일러 급수 전개를 이용해 1차 다항식의 형태로 근사할 수 있으며 이는 식 (2.6)와 같다.

$$\begin{aligned} K(t) &\approx K(0) + \dot{K}(0)t \\ &= \cos \left[\frac{\beta(0)}{2} \right] - \frac{\beta(0)}{2} \sin \left[\frac{\beta(0)}{2} \right] t = K_0 + K_1 t \end{aligned} \quad (2.6)$$

식 (2.5)는 식 (2.6)에 이용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varphi(x_{1k}, x_{2k}, t) \approx \frac{4\pi f}{c} [(K_0 + K_1 t)\Omega t x_{1k}] + \frac{4\pi f}{c} [(K_0 + K_1 t)x_{2k}] \quad (2.7)$$

RP는 위상함수 식 (2.7)을 식 (2.1)에 대입한 수신 신호에 거리 방향 축으로 역 푸리에 변환을 통해서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
S_r(\tau, t) &= A \int_{-\infty}^{\infty} s(f, t) \exp(j2\pi f\tau) df & (2.8) \\
&= A \cdot B \operatorname{sinc} B \left(\tau - \frac{2}{c} [K_0 x_{2k} + \delta r(t)] \right) \times \exp(j2\pi f_0 \tau) \cdot \operatorname{rect} \left(\frac{t}{T_{obs}} \right) \\
&\quad \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi f_0}{c} [K_0 + K_1 t] [x_{1k} \Omega t + x_{2k}] \right)
\end{aligned}$$

최종적인 바이스태틱 ISAR 영상은 주파수방향 축으로 푸리에 변환을 통해서 얻을 수 있다. 여기서 $\delta r(t) = K_0 x_{1k} \Omega t + K_1 x_{2k} t + K_1 x_{10} \Omega t^2$ 성분은 거리 해상도의 절반보다 작을 경우 무시될 수 있고, 이를 무시 한 후, 최종적인 바이스태틱 ISAR 영상은 주파수 축으로 푸리에 변환을 통해 얻을 수 있다.

$$I_B(\tau, \nu, x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} S_r(\tau, t) \exp(-j2\pi t\nu) dt \quad (2.9)$$

2.3 편대비행 표적 ISAR 영상을 위한 위상보정 기법

ISAR 영상 형성 시 기동하는 표적과 레이더 사이의 거리를 변화시키는 병진운동은 반드시 보상되어야 하는 성분이다. 병진운동 성분은 병진운동 보상(Translational Motion Compensation:TMC)기법을 이용하여 제거될 수 있다. TMC는 거리정렬(Range alignment) 및 위상보정(Phase adjustment)로 구성된다. 거리정렬은 동일한 산란점이 같은 레인지 bin에 존재하도록 정렬시키는 과정으로, 전형적인 거리보상 기법은 1D minimum-entropy method[7]가 있다. 위상보정은 병진운동의 속도 및 가속도에 따른 위상오차를 제거하는 과정으로, 이때 발생한 위상오차는 ISAR 영상 형성 시 영상을 흐리게 만들기 때문에 반드시 제거되어야 한다.

현재까지 단일 표적을 가정하여, 위상오차를 보상하기 위해 많은 위상보정기법이 제안 되어왔다. 하지만 제안된 기법들은 단일 표적을 가정하에 제안된 기법으로, 실제 2대 이상의 편대비행 표적의 ISAR 영상 형성에 적용하였을 때, 성능 저하가 발생할 수 있다. 편대비행 표적을 탐지할 시 안테나 내부에 다수의 표적이 들어오게 되고, 이로 인해 형성된 ISAR 영상은 다수의 표적이 존재하거나 겹쳐진 형태로 생성 된다. 따라서 단일 표적 ISAR 영상 신호처리에 비해 편대 비행 표적의 ISAR 영상은 보다 많은 신호처리를 하게 되고, 또한 영상의 크기가 커질 뿐만 아니라 서로 표적 사이의 간섭 등의 문제가 발생하므로 기존 제안된 기법에 대한 분석이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 단일 표적을 가정하여 검증된 우수한 기법 4가지, Phase Gradient Autofocus(PGA)[8-9], Prominent Point Processing(PPP)[10], Minimum Entropy Phase Adjustment(MEPA)[11], Minimum Tsallis Phase Adjustment(MTEPA)[12]를 소개한 후, 각 기법들

을 편대비행 하는 표적의 ISAR 형성에 적용시켜 각 기법들의 성능을 비교, 분석하였다. 본 논문에서는 식 (1.5) 와 식 (2.8)에 의해 얻은 RP에서 거리정렬 과정을 거친 RP를 $f(m,n)$ 으로 정의하고, 여기서 m 은 slow-time 인덱스, n 은 레인지 빈(fast-time) 인덱스를 나타낸다.

2.3.1 Prominent Point Processing(PPP)

PPP 기법은 독립적인 산란원을 이용하여 속도 및 가속도를 추정하는데, 특정 레인지 빈에서 하나의 산란원만 존재 하는 레인지 빈을 선별하기 위하여 크기정규화 분산을 사용하며 다음과 같다.

$$\sigma_n = 1 - \frac{E(|f(m,n)|)^2}{E(|f(m,n)|^2)} \quad (3.1)$$

위 식에서 $E(\cdot)$ 는 평균연산자를, n 은 레인지 빈을 의미한다. σ_n 의 값이 작을수록 해당 레인지 빈에서 산란원이 하나만 존재할 확률이 높다. 따라서 모든 레인지 빈에 대해 식 (3.1)을 통하여 크기정규화 분산을 구한 뒤, 가장 작은 값을 가지는 레인지 빈 n_0 을 선택한다. 선택된 위치에서의 slow-time에 따른 신호는 다음과 같다.

$$f(m,n_0) = A_{n_0} \cdot \exp(-j \frac{4\pi f_0}{c} (R_{n_0} + \nu t + \frac{1}{2!} \nu' t^2)) \quad (3.2)$$

위상오차 $\varphi(\cdot)$ 을 보상하기 위하여 속도 ν 및 가속도 ν' 값을 추정해야 하며 다음 식을 통하여 추정 할 수 있다.

$$[\nu, \nu'] = \operatorname{argmax} \sum_{m=1}^M f(m, n_0) \cdot \exp\left(\frac{4\pi f_0}{c} \left(\nu t + \frac{1}{2!} \nu' t^2\right)\right) \quad (3.3)$$

2.3.2 Phase Gradient Autofocus(PGA)

PGA는 초점이 맞지 않는 영상으로부터 위상오차의 미분치를 추정하고 이를 적분하여 보정해야 할 위상성분을 구하는 것이다. 일반적으로 PGA 알고리즘은 Circular Shifting, Windowing, Phase Gradient Estimation, Iterative Phase Correction으로 구성된다. 먼저 Circular Shifting에서는 각 레인지 bin에 대해서, 신호의 크기가 가장 큰 레인지 bin을 선택해 원점(영상의 중심)으로 Shift 시키는 과정이다. Windowing에서는 Circular Shifting 과정을 거친 영상에 적절한 Windowing을 사용하여 위상보정추정에 불필요한 정보를 제거 하는 과정이다. 이 때, Window의 크기에 따라 알고리즘의 성능과 복잡도가 영향을 받으므로, 적절한 Window의 크기 선택이 중요하다. Phase Gradient Estimation은 위상오차를 추정하는 과정, Iterative Phase Correction은 위상오차가 일정 범위 안에 들어올 때 까지 상기 세 가지 과정을 반복수행 하는 과정이다. 위상오차 추정을 위해 Linear Unbiased Minimum Variance(LUMV)[13]을 사용한다. 앞선 두 과정(Circular Shifting, Windowing)을 거친 후의 영상을 $\hat{j}(m,n)$ 라고 하면 LUMV에 의한 위상오차는 다음과 같다.

$$\hat{\varphi}(m) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \operatorname{Im}[\hat{j}(m,n)^* \hat{j}(m,n)]}{\sum_{n=0}^{N-1} |\hat{j}(m,n)|^2} \quad (3.4)$$

$\hat{\varphi}(m)$ 을 적분하여 얻은 보정위상을 $\varphi(m)$ 라고 하면, PGA를 통해 위상보정이 된 ISAR 영상은 다음과 같다.

$$J(m,n) = \hat{j}(m,n) \cdot [\exp - j\varphi(m)] \quad (3.5)$$

이러한 과정을 반복수행하여, 위상오차가 일정 범위 안에 들어올 때까지 반복한다.

2.3.3 Minimum-Entropy Phase Adjustment(MEPA)

MEPA는 2차원 엔트로피가 최소가 될 때의 $\varphi(\cdot)$ 을 통하여 위상보정을 수행한다. MEPA를 통해 위상보정이 된 ISAR 영상은 다음과 같다.

$$g(k,n) = \sum_{m=0}^{M-1} f(m,n) \cdot \exp[j\varphi(m)] \cdot \exp(-j\frac{2\pi}{M}km) \quad (3.6)$$

여기서 $\varphi(\cdot)$ 은 위상보정성분, k 는 도플러 주파수 인덱스를 나타낸다. 위 식과 같이 형성된 ISAR 영상의 2차원 엔트로피는 다음과 같은 식을 통하여 계산된다.

$$E_{2D} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|g(k,n)|^2}{S} \ln\left(\frac{S}{|g(k,n)|^2}\right) \quad (3.7)$$

$$S = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |g(k,n)|^2$$

ISAR 영상의 2차원 엔트로피의 기울기 값을 통하여 최적화된 $\varphi(m)$ 을 통하여 위상오차 성분을 제거 할 수 있다.

2.3.4 Minimum-Tsallis Entropy Phase Adjustment(MTEPA)

MTEPA 또한 MEPA 기법과 같이 영상의 엔트로피가 최소가 될 때의 $\varphi(\cdot)$ 을 통하여 위상보정을 수행하는 기법이다. 그러나 MEPA 기법과 다른 엔트로피 정의를 사용한다. MTEPA을 통해 위상보정이 된 ISAR 영상은 다음과 같다.

$$I(k, n) = \sum_{m=0}^{M-1} f(m, n) \cdot \exp[j\varphi(m)] \cdot \exp(-j\frac{2\pi}{M}km) \quad (3.8)$$

여기서 $\varphi(\cdot)$, k 는 위상보정성분, 도플러 주파수 인덱스를 나타낸다. 위 식과 같이 형성된 영상의 Tsallis 엔트로피는 다음과 같다.

$$E_{2D_{tsallis}} = \frac{1}{q-1} - \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{q-1} \left[\frac{|I(k, n)|^2}{S} \right]^q \quad (3.9)$$

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

q 는 임의의 실수이다. MEPA 기법과 같이 영상의 2차원 엔트로피의 기울기 값을 통하여 최적화된 $\varphi(m)$ 을 통하여 위상 오차 성분을 제거 할 수 있다.

2.4 편대비행 표적식별 문제의 특징

ISAR영상은 레이더 시선방향 및 영상 투영면(image projection plane)에 표적이 투영되어 RCS 분포도를 형성한다. 따라서 좁은 레이더 빔 내부에 편대비행 중인 다수의 표적들이 존재하게 되면 레이더 시선방향 및 영상 투영면에 표적의 RCS 분포도가 겹쳐서 투영되며 이와 같은 경우 단일 표적들의 정보가 학습되어있는 데이터베이스로 표적식별을 수행하는 것은 제한된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 편대비행 표적들의 ISAR 영상으로부터 각각의 표적들을 분리하는 많은 방법들이 제안되어왔다 [14-15]. 하지만 표적의 수를 정확히 알지 못하며 각각의 표적의 서로 다른 속도, 가속도 및 JEM(Jet Engine Modulation)등의 영향으로 인한 위상왜곡 때문에 ISAR영상에서 각각의 표적을 분리하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 단일 표적의 ISAR 영상을 합성하여 표적식별을 수행하는 방법을 제안한다[16].

표적식별 편대비행 식별을 위한 합성기법은 표적의 수, 위치, 척도 인자(scaling factor) 및 관측각도를 변수로 하는 비선형문제를 최적화하여 수행된다. 표적의 수 경우, 편대비행 표적의 HRRP를 이용한 대수추정 기법[17] 을 통하여 추정 할 수 있으며, 표적의 위치, 척도 인자를 가지고 합성이 이루어진다. 제안된 효율적인 영상 합성 기법은 [그림 3]과 같다. 제안된 기법은 겹쳐진 편대비행 표적의 ISAR 영상과 기동 시나리오[18]를 기반으로 훈련된 단일표적의 ISAR 영상의 템플릿 매칭을 통해 얻은 합성 위치와 척도 인자를 비선형 최적화 기법인 PSO (Particle Swarm Optimization)을 통하여 ISAR 영상을 합성한다. 이때, 영상 합성 시, 영상의 2-D 푸리에 변환(2-D Fourier transform) 특성을 이용해 보다 효율적

인 비용함수(Cost Function)를 사용하여 합성이 이루어진다. 상기 과정들은 표적의 종류에 따라 반복하여 실시간 데이터베이스를 구축하고, 이를 이용해 편대비행 표적식별을 수행할 수 있다.





[그림 3] 편대비행 표적식별을 위한 합성기법

2.5 편대비행 표적 식별을 위해 제안된 합성기법

2.5.1 ISAR 영상 합성을 위한 위치 및 척도 인자 추정

편대비행 중인 표적들의 ISAR 영상은 다음과 같다.

$$ISAR_{\text{for}}(x,y) = \sum_{i=1}^H s_h ISAR_h(x-r_h, y-c_h) \quad (5.1)$$

여기서 $h=1,2,\dots,H$ 는 편대를 구성하는 표적의 수이며 단일표적의 $ISAR_h$ 는 영상투영면위의 (r_h, c_h) 지점에 진폭의 분산을 고려하기 위한 척도인자 s_h 의 비율로 투영된다. 레이더와 표적사이의 거리는 상황에 따라서 달라지기 때문에 거리에 따라서 불규칙한 표적의 진폭은 정규화(normalization) 과정이 필요하며 다음과 같다

$$\overline{ISAR}_{\text{for}}(x,y) = \frac{ISAR_{\text{for}}(x,y)}{\sqrt{\sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N ISAR_{\text{for}}(x,y) ISAR_{\text{for}}^*(x,y)}} \quad (5.2)$$

위 식에서 M, N은 각각 ISAR 영상의 수평 및 수직방향의 픽셀의 개수이다. 기동 시나리오 기반으로 훈련된 단일표적의 ISAR 영상들은 $ISAR_k(k=1,2,\dots,K)$ 로 정의할 수 있으며 식 (5.2)을 통하여 \overline{ISAR}_k 로 정규화될 수 있다.

영상투영면위에 ISAR 영상이 투영되어지는 위치를 예측하는 것은 매

우 어렵다. 따라서 \overline{ISAR}_{for} 을 구성하는 수평, 수직방향의 2차원 픽셀들이 그 후보가 된다. 추정을 위해 사용되는 기법은 템플릿 매칭으로 \overline{ISAR}_k 에서 표적의 윤곽이 들어나는 부분만을 추출하여 복소공역을 수행한 뒤 \overline{ISAR}_{for} 에 겹쳐 곱하여 상호상관을 계산한다. 상호상관의 계산은 수평, 수직방향에 관해서 모두수행하며 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Cr_k(r,c) = \sum_{y=1}^Q \sum_{x=1}^P \left| \overline{ISAR}_{for}(x-r,y-c) \overline{ISAR}_k^*(x,y) \right| \quad (5.3)$$

위식에서 (r, c) 는 상호상관이 계산된 지점을 나타내며 P, Q 는 각각 단일 표적의 ISAR 영상의 수평, 수직방향의 픽셀 개수, r, c 는 상호상관이 계산된 위치를 나타내며 $r=1,2,\dots,N-P+1$ 및 $c=1,2,\dots,M-Q+1$ 와 같다. ISAR 영상 합성문제의 경우, $ISAR_k$ 가 투영되는 위치후보를 산정해야하며 다음과 같다.

$$\bar{r}_k, \bar{c}_k = \begin{bmatrix} r_1 & c_1 \\ r_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} = find\{Cr_k(r,c) \geq a \times \max(Cr_k(r,c))\} \quad (5.4)$$

위 식의 a 는 0과 1사이의 실수 값을 갖는 상수이며 a 가 0에 가까울수록 실제 투영위치가 산정된 후보위치에 포함될 확률이 높아진다. 하지만 위치후보가 많아짐에 비례하여 합성될 수 있는 경우의 수가 증가하기 때문에 계산의 부담 또한 커진다. \bar{r}_k, \bar{c}_k 는 식의 조건을 충족하는 수평 및 수직방향의 위치들을 표현하며 MATLAB의 $find(\cdot)$ 함수를 이용하여 계산할 수 있다.

훈련된 단일표적 ISAR 영상 범위 내에서 식 (5.4)를 통하여 산정된 벡터 $(\bar{r}_1, \bar{c}_1, \bar{r}_2, \bar{c}_2, \dots, \bar{r}_k, \bar{c}_k)$ 들을 후보로 하여 ISAR 영상을 합성할 수 있다.

2.5.2 2D Fourier Transform of ISAR Image

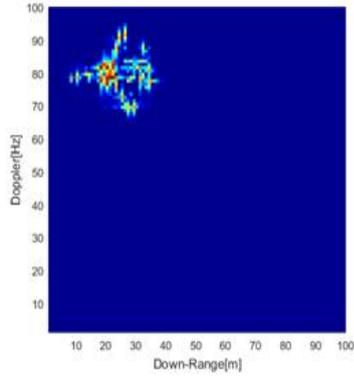
2D 푸리에 변환[19]은 영상의 무게중심을 같게 만드는 특징을 가지고 있는 기법으로 수식은 다음과 같다.

$$F_{ISAR}(u, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} ISAR(x, y) e^{-j2\pi ux} e^{-j2\pi \nu y} dx dy \quad (5.5)$$

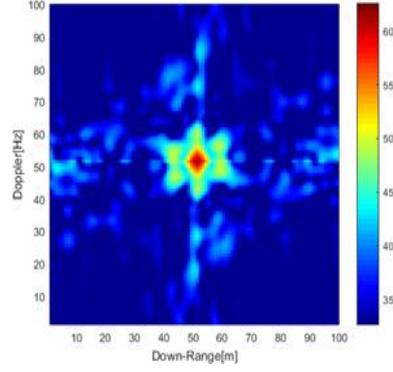
위 식에서 $F_{ISAR}(u, \nu)$ 는 영상 $ISAR(x, y)$ 의 2D 푸리에 변환을 나타내며, 위치가 천이된 영상의 2D 푸리에 변환은 다음식과 같이 주파수 도메인에서 위상곱으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} ISAR(x - x_0, y - y_0) e^{-j2\pi ux} e^{-j2\pi \nu y} dx dy \\ = \exp(-j2\pi(x_0 u + y_0 \nu)) F_{ISAR}(u, \nu) \end{aligned} \quad (5.6)$$

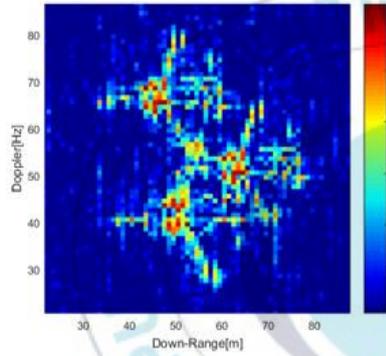
즉, 편대비행 표적의 2D F·T 영상은 단일 표적의 2D F·T 영상에서 위상곱의 합으로 표현될 수 있다.



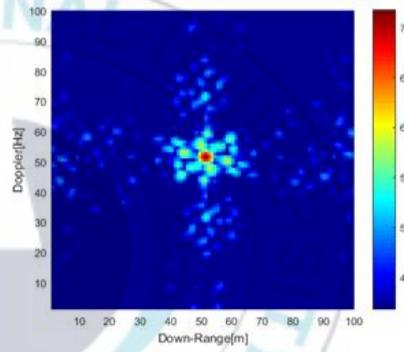
(a) 단일 표적의 ISAR 영상



(b) 2D FT 과정을 통한 단일 표적의 영상



(c) 편대비행 표적의 ISAR 영상



(d) 2D FT 과정을 통한 편대비행 표적의 영상

[그림 4] 단일/편대비행 표적의 ISAR 영상과 2D FT 과정을 통한 단일/편대 비행 표적의 영상

2.5.3 ISAR 영상 합성기법

2D 푸리에 변환 특성을 이용하면 편대비행 표적 2D F·T 영상은 다음과 같다.

$$F_{ISAR_{for}}(u, \nu) = \sum_{h=1}^H s_h F_{ISAR_h}(u, \nu) \exp(-j2\pi(r_h u + c_h \nu)) \quad (5.7)$$

위 식 (5.7)을 통해 편대비행 표적의 2D F·T 영상의 임의의 한 지점 픽셀의 값은 합성에 사용된 단일표적의 2D F·T 영상의 같은 지점의 픽셀 값의 합과 같음을 알 수 있다. 합성 시 국부 최소치를 피하기 위해 여러 개의 픽셀을 사용하였고, 합성의 비용함수는 다음과 같다.

$$X = \begin{bmatrix} \hat{r}_1 & \hat{r}_2 & \dots & \hat{r}_H \\ \hat{c}_1 & \hat{c}_2 & \dots & \hat{c}_H \\ \hat{s}_1 & \hat{s}_2 & \dots & \hat{s}_H \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$= \underbrace{\operatorname{argmin} \sum_{s=1}^S \left| |F_{ISAR_{for}}(u_s, \nu_s)| - |F_{com}(u_s, \nu_s)| \right| }_X$$

위 식에서 $s=1,2,\dots,S$ 는 선택된 픽셀의 개수 이고, (u_s, ν_s) 는 선택된 픽셀의 위치이다. $F_{com}(u, \nu)$ 는 다음과 같다.

$$\sum_{h=1}^K X[3, h] \cdot F_{ISAR_h}(u, \nu) \exp(-j2\pi(X[1, h]u + X[2, h]\nu)) \quad (5.9)$$

여기서 척도 인자 \hat{s} 는 양의 실수 값을 갖는다. H 는 합성에 사용된 표적의 수이며 총 K 개의 $ISAR_k$ 중 임의로 선택되며 중복하여 선택될 수 있다. 또한 벡터 \bar{r}_k, \bar{c}_k 와 $ISAR_k$ 는 같이 선택되어야 한다. 이와 같이 표적이 선택되어지는 조합, 투영 위치 및 척도인자를 최적화하기 위하여 식 (5.8)을 비용 함수로 PSO 알고리즘을 적용한다.

PSO(Particle Swarm Optimization)이란 비선형 최적화 기법으로 p 번째 particle X_p 의 속도 및 위치는 다음과 같은 PSO 알고리즘을 통해 최적화 된다.

$$v_p^{i+1} = \phi v_p^i + c_1 r_1^i (X_{pbest} - X_p^i) + c_2 r_2^i (X_{gbest} - X_p^i) \quad (5.10)$$

$$X_p^{i+1} = X_p^i + v_p^{i+1} \quad (5.11)$$

위 식에서 ϕ 는 관성 가중치(inertia weight), n 은 반복 횟수(iteration number)을 의미하며 c_1, c_2 는 $c_1, c_2 > 1$ 그리고 $c_1 + c_2 < 4$ 을 만족하는 실수며, r_1 과 r_2 는 0과 1 사이의 임의의 실수다. 식 (5.11)과 같이 p 번째 particle은 식 (5.10)의 v_p^{i+1} 이 더해진 위치로 이동한다. 본 논문에서는 개체군 수 = 10000개, 반복횟수 = 10번, 선택 픽셀 수 = 15개로 시뮬레이션 하였다.

2.6 표적식별 기법

앞 절의 합성기법은 HRRP를 이용한 편대비행 표적 대수 추정 기법을 통해 얻은 표적의 수와 미리 학습되어 있는 단일 표적의 종류에 따라서 반복하여 실시간 데이터베이스를 구성할 수 있다. PSO 알고리즘을 통하여 최적화된 변수로 생성되는 ISAR 영상은 단 하나이므로 실시간 데이터베이스에 저장되는 표적의 $ISAR_{com}$ 의 총 개수 N_{tr} 는 다음과 같다.

$$N_{tr} = N_t \quad (6.1)$$

N_t 는 합성에 사용될 수 있는 표적 종류의 가짓수이며 표적의 종류를 알 수 없기 때문에 학습되어 있는 모든 종류의 표적에 대하여 합성을 실시해야 한다.

2.6.1 합성된 ISAR 영상을 이용한 표적식별

본 논문에서 사용된 특성 벡터는 극사상 변환(Polar Mapping)[20]을 사용하였다. 극사상은 ISAR 영상의 회전 불변성을 위한 대표적인 특성벡터구성 방법으로, 2차원의 데카르트 좌표계(Cartesian Coordinate System)에서 크기 r 와 각도 θ 축으로 구성된 극 좌표계(Polar Coordinate System)으로 영상을 변환하는 기법이다. 레이더 송신신호의 세기, 표적 위치 및 기하학적 형태 등에 따른 불규칙한 진폭이 구분기에 미치는 영향은 정규화 과정을 통하여 해결할 수 있다. 따라서 극 좌표계 사상(polar mapping)에

는 정규화 되어진 \overline{ISAR}_{fo} , \overline{ISAR}_{com} 가 사용된다. 원래의 ISAR 영상 좌표계와 극 좌표계는 다음과 같은 관계를 갖는다.

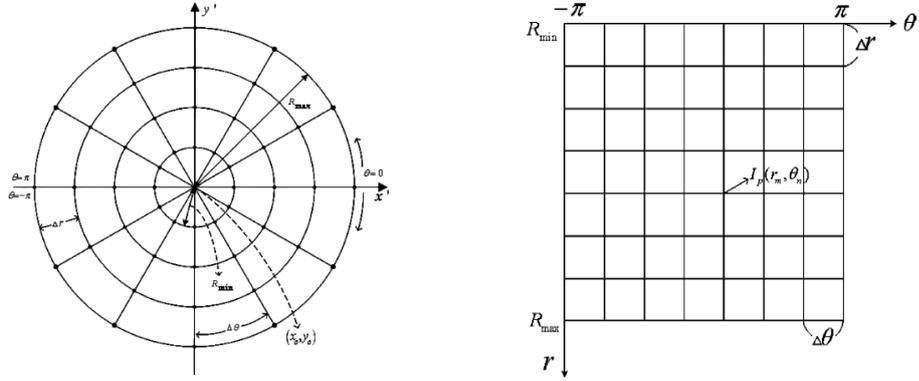
$$(x_k, y_k) = (x_c, y_c) + (r_m \cos \theta_n, r_m \sin \theta_n) \quad (6.2)$$

여기서 $m=1,2,\dots,N_r$, $n=1,2,\dots,N_\theta$, $k=1,2,\dots,N_r N_\theta$ 이며 (x_k, y_k) 는 원래의 ISAR 영상의 좌표를 나타낸다. 또한 (x_c, y_c) 는 ISAR 영상의 무게중심이 위치하는 좌표를 나타내며 r_m 및 θ_n 은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} r_m &= R_{\min} + (m-1)\Delta r, \theta_n = -\pi + (n-1)\Delta\theta \\ \Delta r &= \frac{R_{\max} - R_{\min}}{N_r - 1}, \Delta\theta = \frac{2\pi}{N_\theta - 1} \end{aligned} \quad (6.3)$$

위 식에서 R_{\max} 는 [그림 5] (a)에서 볼 수 있듯이 (x_c, y_c) 로부터 제일 바깥의 원주까지의 거리이며 ISAR 영상에 분포되어있는 표적의 점산관원들이 모두 포함될 수 있게 선택되어야 한다. R_{\min} 은 (x_c, y_c) 로부터 가장 가까운 샘플링 원주사이의 거리이며 작은 값이 선택되어야 하며 본 논문에서는 편의상 $R_{\min}=0$ 으로 하여 시뮬레이션 하였다.

최종적으로 r_m 및 θ_n 에 해당하는 값을 [그림 5] (b)와 같이 변수 r , θ 를 축으로 하는 극 좌표계로 사상시켜야 하는데 각 픽셀의 값은 원래의 ISAR 영상의 픽셀 값으로 부터 보간하여 얻을 수 있다. 본 논문에서는 간단한 선형 보간을 사용하여 픽셀의 값을 결정하였다.



(a) 극좌표 격자 (b) 극좌표
[그림 5] 극 좌표계 사상 원리

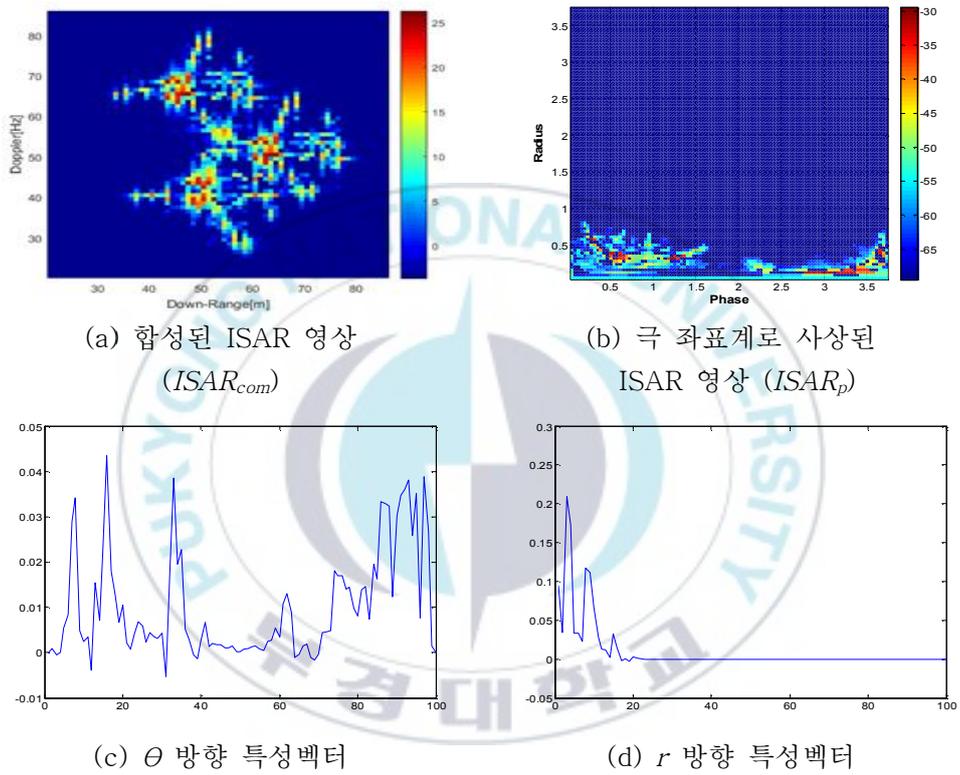
[그림 6]의 (a)는 3절의 영상합성기법을 통해 합성된 ISAR 영상 ($ISAR_{com}$)이며 (b)는 극 좌표계로 사상된 ISAR 영상($ISAR_p$)이다. (a)의 ISAR 영상에서 회전이 발생하면 (b)의 극 좌표계에서는 θ 방향으로 천이만 발생함을 알 수 있다. [그림 6]의 (c)와 (d)는 각각 r , θ 방향으로 (b)의 극 좌표계 ISAR 영상을 투영시킨 특성벡터이며 다음 식을 통하여 계산할 수 있다[17].

$$I_r(r) = \sum_{n=1}^{N_\theta} ISAR_p(r_n, \theta_n), \quad (6.4)$$

$$I_\theta(r) = \sum_{m=1}^{N_r} ISAR_p(r_m, \theta_n)$$

특성벡터를 이용하여 표적식별을 수행하는 경우 각각의 특성벡터의 길이만큼의 계산이 필요하지만 영상을 통해서 표적식별을 할 경우 각각의 기저 샘플의 곱만큼 계산이 필요하므로 특성벡터를 이용하여 표적식별을 하는

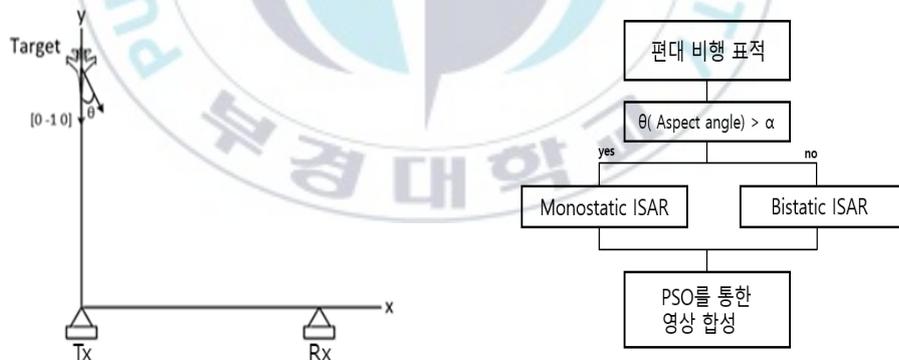
것이 계산시간 및 저장 공간측면에서 유리하다. 본 논문에서 극 좌표계 사상을 통해 얻어진 특성벡터를 이용한 표적식별은 상호상관을 통해서 수행되었다.



[그림 6] 극 좌표계로 사상된 ISAR 영상 및 극 좌표계 기저에 따른 특성벡터

2.7 모노스테틱/바이스테틱 ISAR 영상 융합

본 논문에서는 [그림 7(a)]과 같이 모노스테틱 및 바이스테틱 레이더를 기반으로 LOS 방향(0 -1 0)으로 진행하는 편대비행 표적을 설정하고, 진행방향에서 $\pm\theta^\circ$ 만큼의 회전된 진행방향에 따른 두 레이더의 ISAR 영상을 각각 획득 한 후, 식별능력을 분석한다. 두 레이더의 융합을 통한 식별 기법은 [그림 7(b)]와 같다. 우선 표적이 탐지된 후, θ 의 크기에 따라 모노스테틱, 바이스테틱 ISAR 영상을 획득 후, 표적 식별을 수행한다. 여기서 α 는 θ 의 임계값을 나타낸다. θ 에 따른 모노스테틱 및 바이스테틱 ISAR 영상 처리 시간 분석과 위에서 제시한 합성기법을 적용한 후 식별능력을 분석한 후, 최종 분석 결과를 통해 두 레이더의 융합을 통한 표적식별 방법을 제시한다.

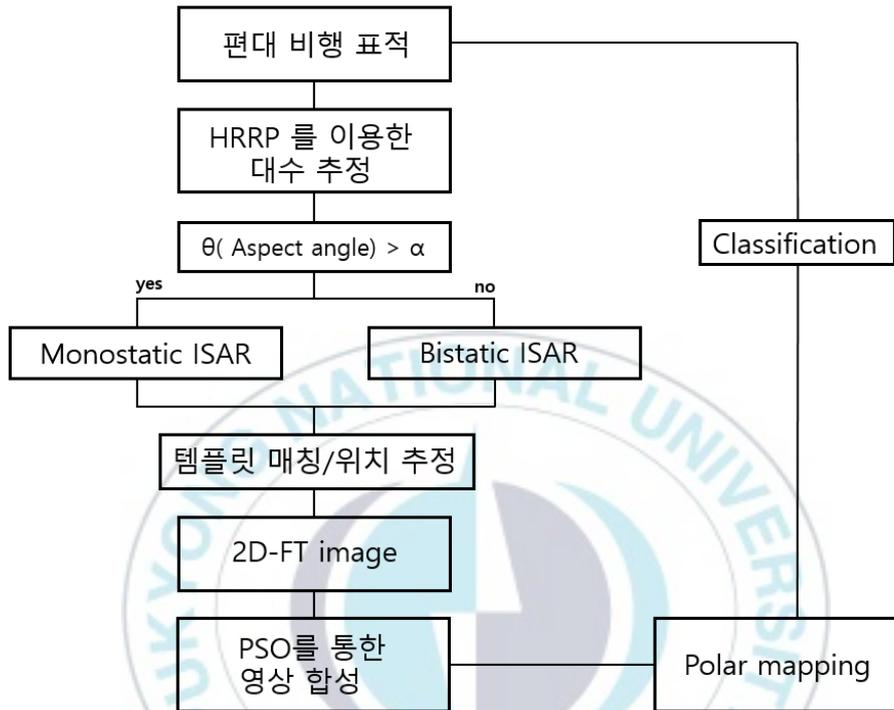


(a). 시뮬레이션 기하 구조

(b). 융합을 통한 식별 기법

[그림 7] 모노스테틱/바이스테틱 레이더 융합

[그림 8]은 본 논문에서 제시하는 기법의 순서도 이다.



[그림 8] 두 레이더 융합을 통한 편대비행 표적 식별 순서도

Ⅲ. 실험 결과

3.1 위상보정 기법 비교 분석

앞서 소개한 MEPA, PPP, PGA, MTEPA 기법들을 편대 비행 하는 표적의 ISAR 영상 형성에 적용하여 기법들의 성능을 비교, 분석하였다. 본 시뮬레이션에서 사용된 표적은 88개의 점산란원으로 구성되었고, 총 4대의 표적이 편대비행 형태를 구성하고 있다[그림 9]. 레이더의 시뮬레이션 조건은 표 1과 같고 표적의 시뮬레이션 조건은 표 2에 명시하였다. 표 2에 명시된 조건으로 편대 비행하는 표적의 수신 신호에 정합 필터링 과정을 수행 후 거리 정렬 및 제시 된 위상보정 기법을 수행하였다. 시뮬레이션 SNR = 15, 30, 45dB 환경에서 수행되었으며 각 SNR 환경에서 30번 반복 수행하였다.

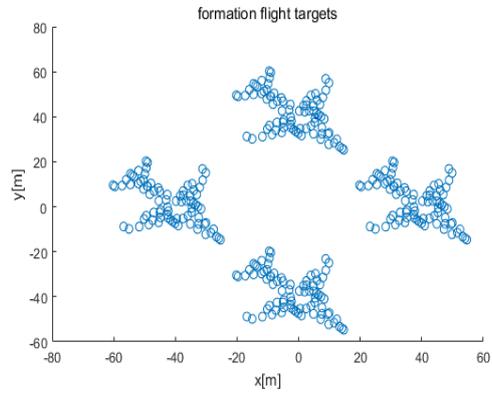


그림 9. 편대비행 표적 점 산란원 모델

표 1. 레이더 시뮬레이션 변수

중심 주파수	10 GHz
주파수 대역폭	200 MHz
펄스 반복 주파수	500 Hz
펄스 폭	30 μ sec
펄스 수	300
레이더 위치	[0,0,0] km

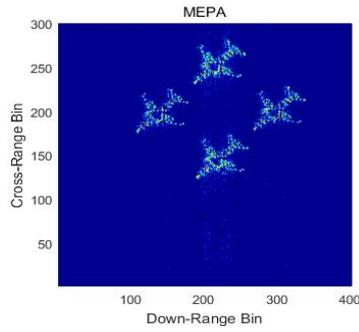
표 2. 편대 비행 표적의 시뮬레이션 변수

초기 위치	[10,65,2] km
비행 방향	[1, -1, 0];
비행 속도	200 m/s
편대비행	
[-40,0,0 ; 40,0,0 ; 0,40,0 ; 0, -40,0]m;	

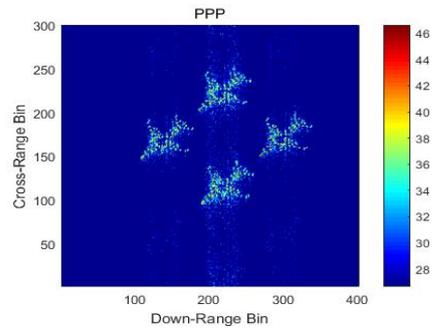
제시된 기법을 통해 얻어진 ISAR 영상의 성능을 비교하기 위해 사용된 비용함수로 엔트로피와 처리 시간을 사용하였다. 엔트로피는 무질서함을 나타내는 지표이며, 엔트로피가 높을수록 무질서하다는 것을 나타내므로 엔트로피가 낮은 영상이 일반적으로 품질이 좋은 영상이라 판단할 수 있다. 엔트로피의 정의는 식(3.7)와 같고 $g(k,n)$ 는 제시된 기법들을 적용해서 얻은 편대비행 표적의 ISAR 영상이다.

제시된 기법을 통해 형성된 ISAR 영상은 그림 10과 같다. 본 영상들은 SNR=30dB 환경에서의 영상이다.

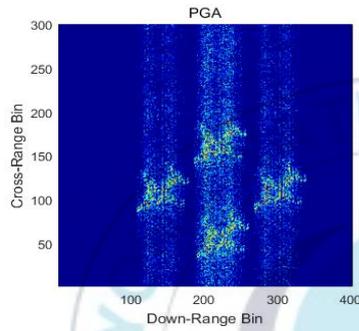
SNR=30dB 기준으로 엔트로피 측면에서는 MEPA 기법이 9.5353으로 제일 좋은 모습을 보였고 PGA 기법이 10.1843로 가장 좋지 않음을 보였으며, 처리 시간 측면에서는 PPP 기법이 0.078초로 다른 기법들에 비해 월등히 빨랐으며 MEPA 기법은 다른 기법들에 비해 많은 시간이 걸리는 것을 확인하였다. SNR 대비 엔트로피 및 처리시간은 다음 그림 11,12과 같다.



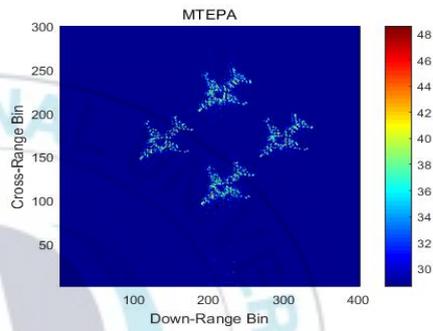
(a) MEPA(entropy: 9.5353)



(b) PPP(entropy: 9.8274)



(c) PGA(entropy: 10.1845)



(d) MTEPA(entropy: 9.5441)

그림 10. 위상보정기법 적용 후의 ISAR 영상

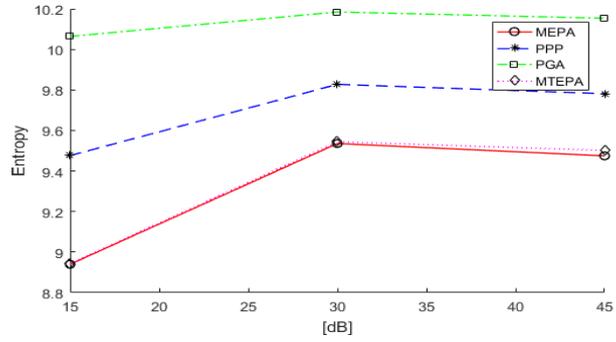


그림 11. SNR 에 따른 엔트로피

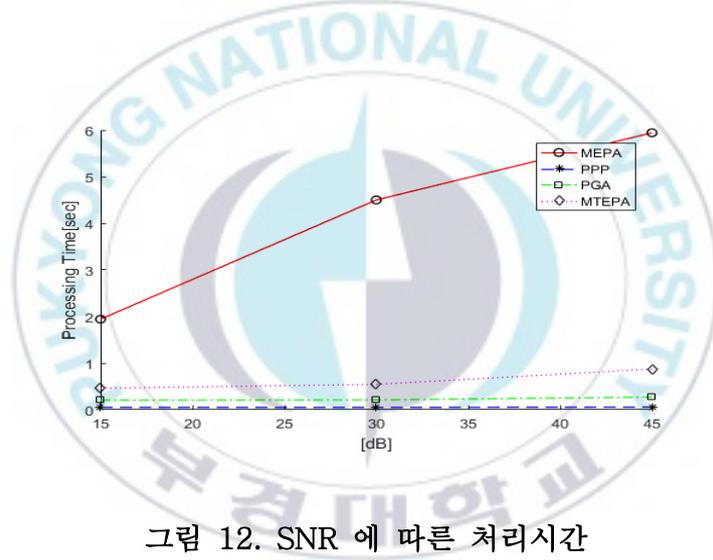


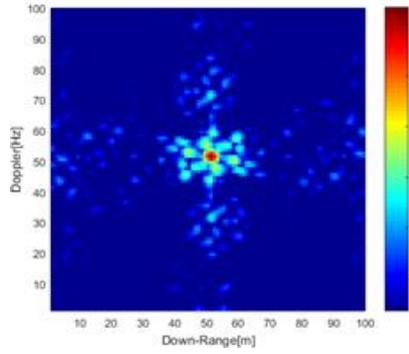
그림 12. SNR 에 따른 처리시간

엔트로피 기법인 MEPA, MTEPA 기법은 다른 두 기법들에 비해 엔트로피 면에서 좋은 모습을 보였으며, MTEPA 기법은 MEPA에 빠른 처리시간을 가졌다. 이로 인해 MEPA 기법은 MTEPA 달리 크기가 큰 ISAR 영상에 적용시키면 많은 시간이 걸림을 알 수 있다. 따라서 편대비행 표적의 ISAR 영상 형성을 위한 위상보정 기법으로 MTEPA 기법이 제시된 기법들 중에서 더 실질적이고, 효율적인 것으로 확인할 수 있다.

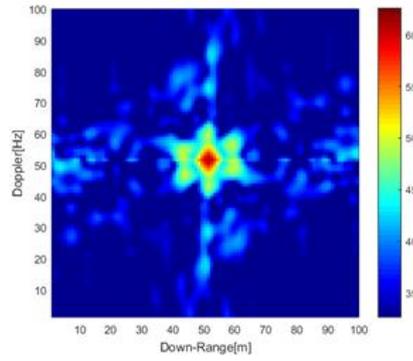


3.2 제안된 기법을 통한 합성결과

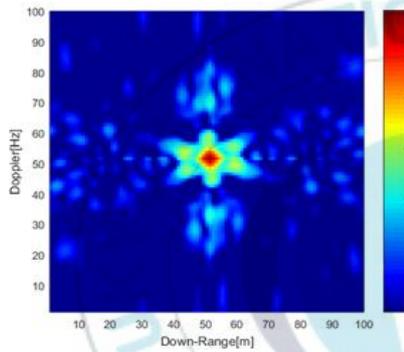
편대비행 ISAR 2D F·T 영상은 기동 시나리오 기반에 의해 형성되었으며, 편대비행표적의 대수는 3대로 가정하였고 [그림13]의 (a)와 같다. 영상합성을 위하여 훈련된 단일표적 영상과 템플릿 매칭을 통해 상관관계가 가장 높은 후보군 7개를 선택하였고, 이를 이용해 합성을 실시하였다. 템플릿 매칭 결과를 근거로 투영위치 후보 산정 및 계산 부담을 줄이기 위하여 식 (5.4)의 a 는 0.9로 설정하여 시뮬레이션 하고, 합성을 위해 위에서 제시한 기법인 편대비행 표적의 2D-F·T 영상과 후보군 7개의 단일표적 영상의 2D-F·T 영상을 이용하여 PSO 알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션 결과 후보군 중 3대의 단일표적 영상이 1.3, 2, 1.5의 비율로 합성되었으며, PSO 진화곡선은 [그림13]의 (e)와 같고, [그림13] (f)와 같이 $ISAR_{for}$ 와 같은 $ISAR_{com}$ 을 합성할 수 있었다. 합성된 영상에 다시 2-D IFT를 적용시켜 원래의 영상으로 복원한 결과는 [그림14]와 같다. 합성결과와 $ISAR_{for}$ 의 비용 함수가 0이 아닌 0.0233임을 확인할 수 있는데 이것은 다소 높은 SNR로 인해 비용 함수가 증가되었음을 뜻한다.



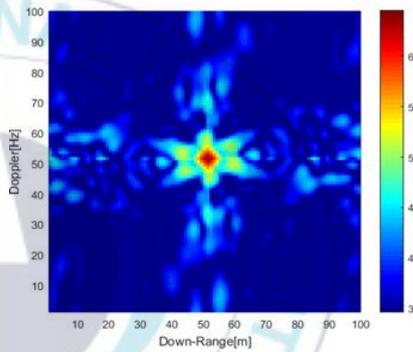
(a) 편대비행 표적들의 2D F·T ISAR_{for}



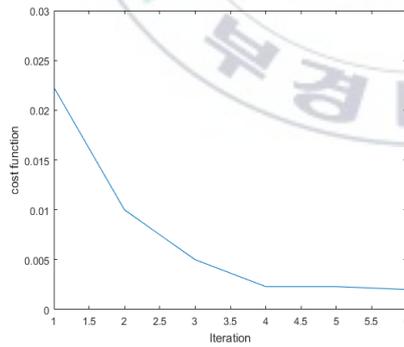
(b) 단일표적 2D F·T ISAR



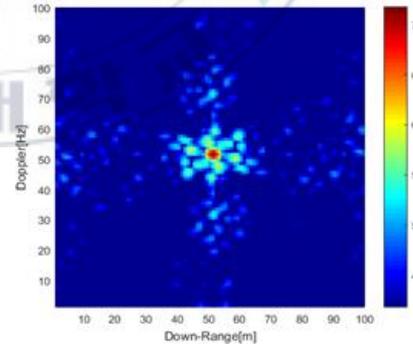
(c) 단일표적 2D F·T ISAR



(d) 단일표적 2D F·T ISAR

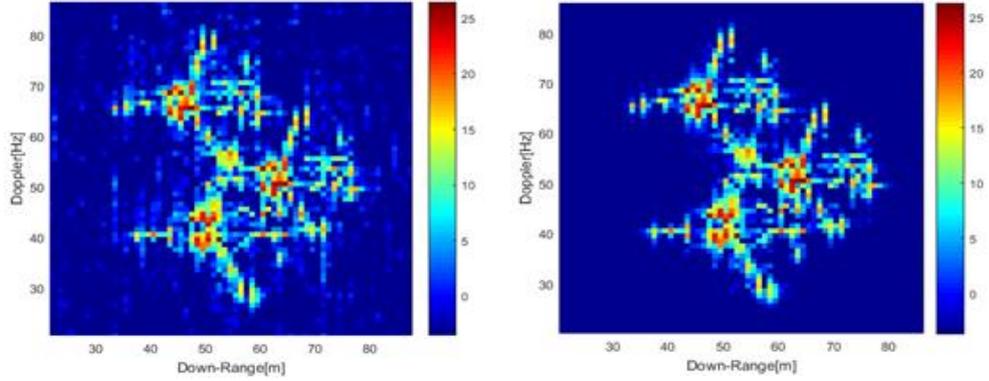


(e) PSO 진화곡선



(f) 제안된 기법으로 합성된 2D F·T ISAR_{com}

[그림 13] 2D F·T ISAR 영상 합성결과



(a) 편대비행 표적들의 $ISAR_{for}$

(b) 제안된 기법으로 합성된 $ISAR_{com}$

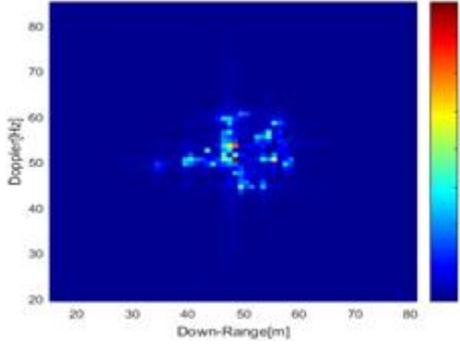
[그림 14] 복원된 ISAR 영상 합성결과



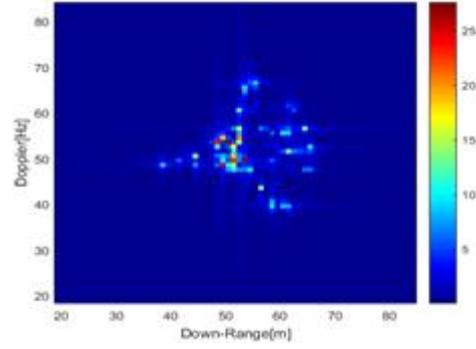
3.3 구분 결과

표적 식별에 사용된 학습데이터는 기동 시나리오를 바탕으로 구성된 ISAR 영상 데이터베이스를 사용하였다. 기동 시나리오 기반 훈련 DB 구축을 위해, 송·수신기 위치를 설정하고, 3차원 공간에서의 비행 시작점에서 비행 표적은 일정한 방향 과 일정한 속도로 기동한다. 이때 표적은 ISAR 영상의 세로방향의 해상도가 가로방향의 해상도와 같게 구성되는 관측각도 범위에서 기동한다. 훈련 DB 구축을 위한 조건은 표 3, 레이더의 시뮬레이션 조건은 표 4와 같으며 제기된 조건으로 모노스테틱, 바이스테틱 ISAR 영상 훈련 DB을 구축 하였다. 모노스테틱에 경우 수신기의 위치는 송신기의 위치와 같다.

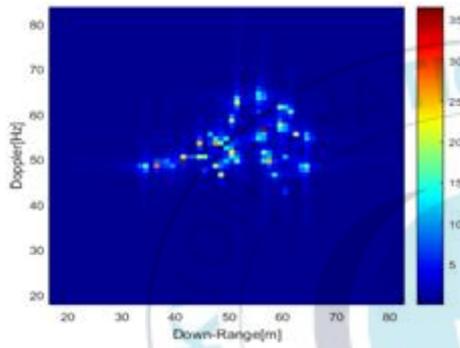
본 논문에서는 총 4대의 점산란원으로 구성된 비행표적(F-18, F-14, Su35, Rafal)[그림15]을 사용하였으며, 훈련 DB를 구성하는 영상의 총 개수는 $4(\text{표적의 수}) \times 80(\text{비행 시작점}) = 320$ 개 이다.



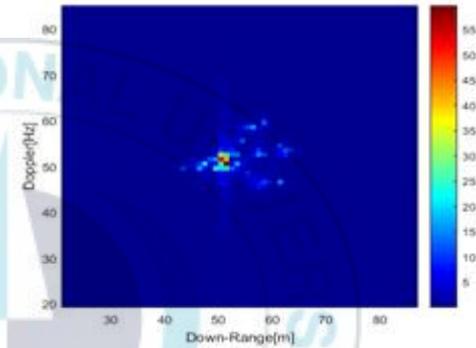
(a) F-14



(b) F-18



(c) Su-35



(d) Rafal

[그림 15] 훈련 DB ISAR 영상

표 3. 훈련 DB 파라미터

Transmitter	[0 0 0] km
receiver	[40 0 0] km
Direction	[0 -1 0]
Velocity	200 m/s
Flight Starting Position	
x position	-25, -10, 10, 25 km
y position	80, 90, 100, 110, 120 km
z position	1, 3, 5, 7 km

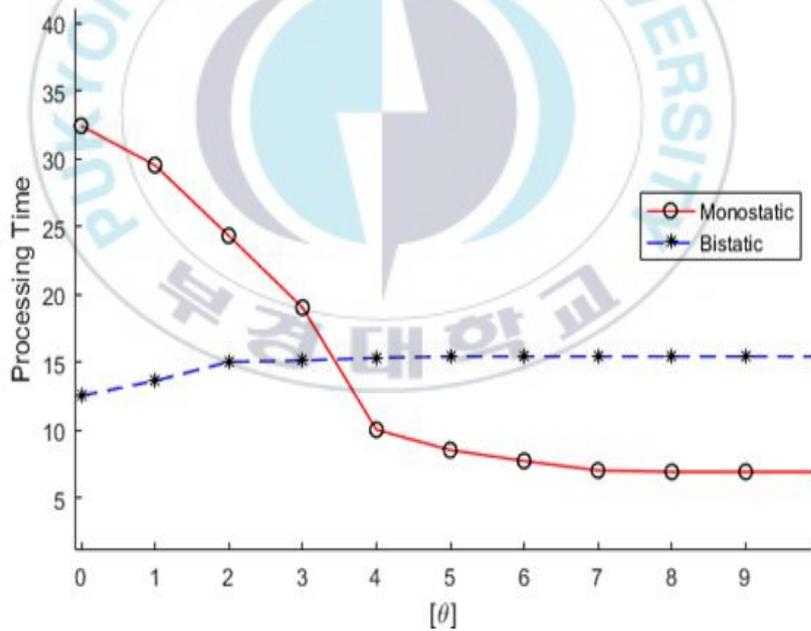
표 4. 레이더 파라미터

Center Frequency	10 GHz
Bandwidth	200 MHz
Pulse Repetition Frequency	500 Hz
Pulse width	30 μ sec
Number of Pulse	100

시험데이터의 경우, 위 [그림7(a)]와 같이 다수의 표적이 레이더의 LOS 방향으로 접근하는 경우를 구성하기 위해, 주어진 3차원공간상 범위에서 임의로 편대비행 대형을 설정 후 대형의 중심점의 x 좌표를 0으로 설정하였고, 표적은 설정된 지점에서 훈련 DB의 비행 방향에 $-5 \leq \theta \leq 5$ 범위 내의 임의의 어스팩트 앵글로 회전된 진행방향, 200km 속도로 기동하는 표적의 ISAR 영상을 구축하였다. 편대비행 표적의 대수는 랜덤으로 1 ~ 5대 범위 내에서 선택하였다. 영상 합성 시 HRRP를 이용한 대수추정 기법을 이용해 편대비행 표적의 대수를 추정 하였으며, 추정된 대수로 각 표적 종류에 대한 영상 합성을 실시하였다. 각각 4대의 표적에 대하여 50개의 시험 영상들을 구성하여 표적식별을 위한 총 200개의 시험 DB를 구성하였다. 또한 두 레이더의 융합을 위해 θ 에 따라 모노스테틱 ISAR 영상과 바이스테틱 ISAR 영상을 획득 후 비교 및 분석을 실시하였다. 본 실험은 AWGN (Additive White Gaussian Noise)에 기인한 측정오차를 줄이기 위하여 시뮬레이션은 SNR = 10, 15, 20, 25, 30dB 환경에서 50번 반복 실시되었다.

3.3.1 θ 에 따른 모노스태틱 vs 바이스태틱 처리 시간 비교

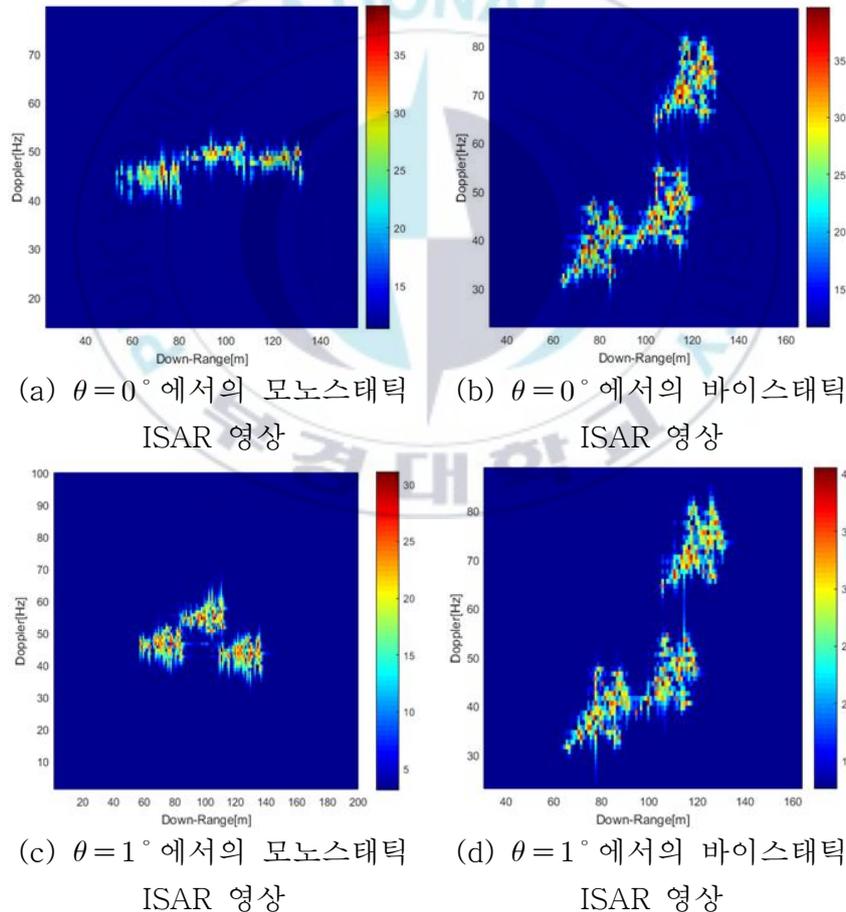
θ 에 따른 모노스태틱 및 바이스태틱 처리시간 비교는 [그림 16]와 같다. 본 시뮬레이션은 총 3대의 표적이 편대비행을 구성하고 있음을 가정하였고, θ 에 따른 두 레이더의 영상처리 시간을 비교한 결과, 모노스태틱 레이더의 경우 $|\theta| < 4^\circ$ 일 때, 표적의 수직 방향의 해상도를 얻기 위해 바이스태틱 레이더 보다 많은 시간이 걸림을 확인 할 수 있었다. 하지만 $|\theta| > 4^\circ$ 일 경우 모노스태틱 레이더의 처리시간이 더 빠름을 알 수 있었다.



[그림 16] θ 에 따른 Monostatic vs Bistatic 처리 시간 비교

3.3.2 θ 에 따른 모노스테틱 vs 바이스테틱 ISAR 영상

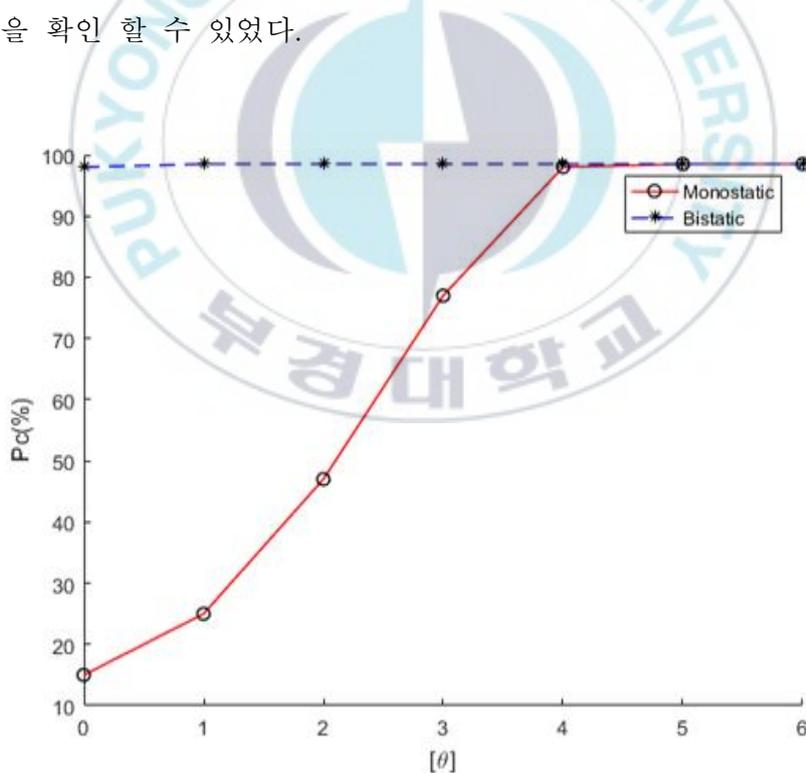
θ 에 따른 모노스테틱 및 바이스테틱 ISAR 영상 [그림 17]과 같다. 그림에서와 같이 표적이 LOS 방향으로 진행할 경우, 모노스테틱 레이더는 표적의 수직 해상도를 얻지 못하여 제대로 된 표적의 영상을 얻지 못함을 확인 할 수 있었다. 하지만 바이스테틱의 레이더의 경우 송·수신기의 기하학적이 구조로 인해 LOS 방향으로 진행하는 표적의 수직 해상도를 충분히 얻을 수 있어 제대로 된 표적의 영상을 얻음을 확인 할 수 있었다.



[그림 17] θ 에 따른 Monostatic vs Bistatic ISAR 영상 비교

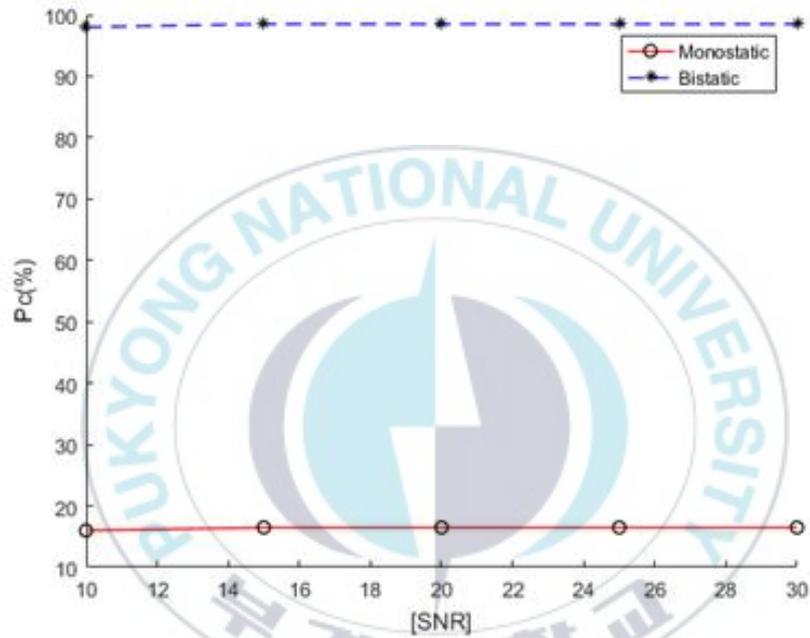
3.3.3 θ 에 따른 모노스테틱 vs 바이스테틱 ISAR 영상 표적식별 결과

[그림 18]은 SNR=30dB 환경에서 합성된 모노스테틱 및 바이스테틱 ISAR 영상을 이용하여 θ 에 따라 식별 결과를 나타낸 것이다. 모노스테틱 ISAR 영상의 경우 $|\theta|$ 값이 0~ 2일 경우 cross-range 방향의 해상도를 얻을 수 없어 낮은 표적 식별 능력을 보였으며, $|\theta| > 4$ 이상일 경우부터 cross-range 방향의 해상도를 얻어 올바른 표적의 ISAR 영상으로 인해 97% 이상의 높은 식별 성능을 확인 할 수 있었다. 반면 바이스테틱 ISAR 영상의 경우 θ 의 값과 상관없이 모든 구간에서 97%이상의 식별 성능을 나타냄을 확인 할 수 있었다.

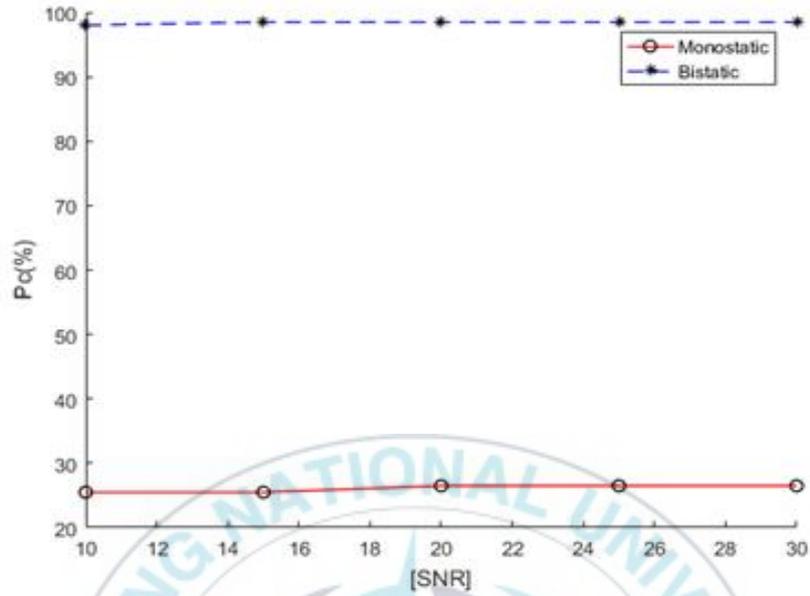


[그림 18] θ 에 따른 Monostatic vs Bistatic ISAR 식별능력 비교

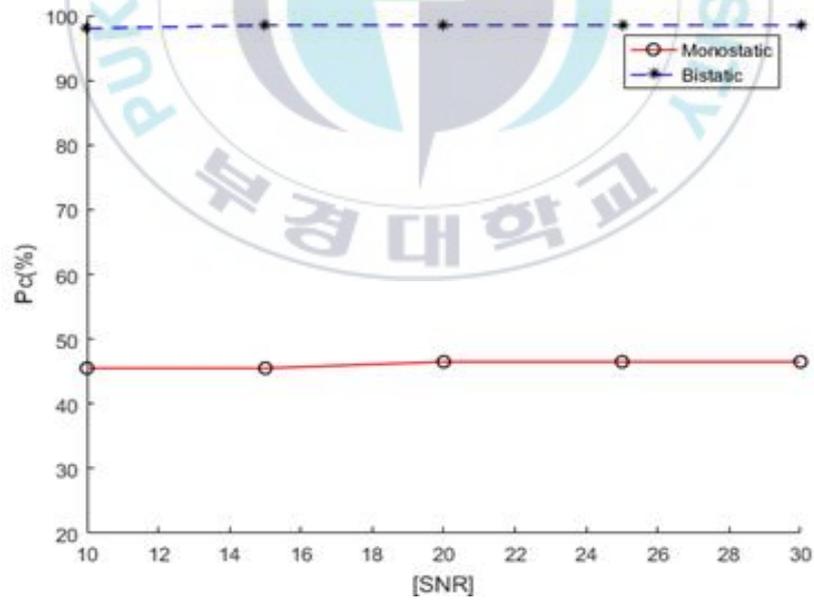
[그림 19]은 $0 \leq \theta \leq 4$ 에서 SNR= 10, 15, 20, 25, 30dB 환경에 대한 구분결과 이다. [그림 18]에서 볼 수 있듯이, 바이스태틱 ISAR 영상의 경우 θ 에 대해 상관없이 모든 SNR 환경에서 97% 이상의 높은 식별 능력을 가짐을 확인 할 수 있었다.



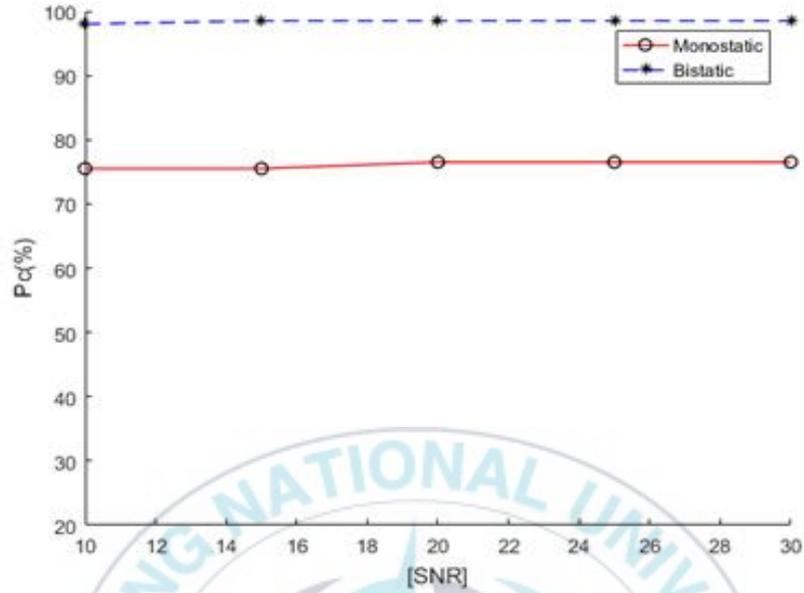
(a) $\theta = 0^\circ$ 에서 합성된 ISAR 영상을 이용한 식별결과



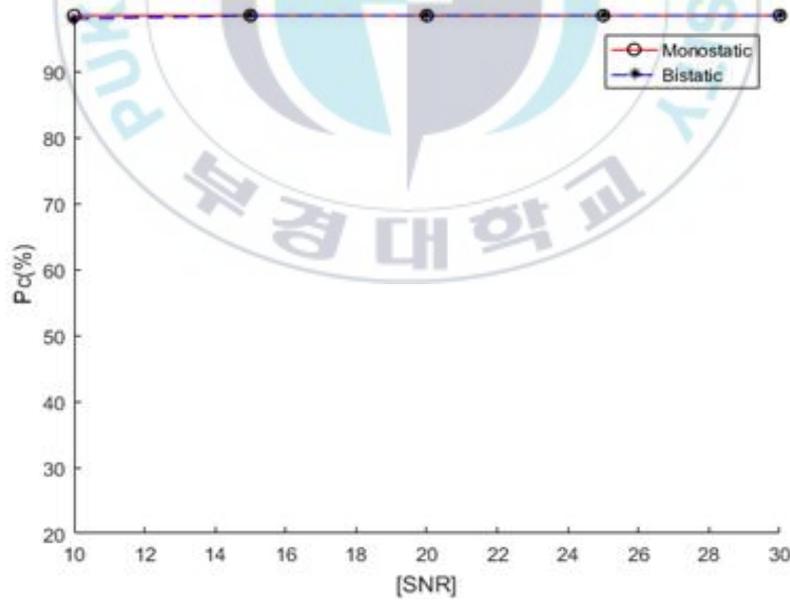
(b) $\theta = 1^\circ$ 에서 합성된 ISAR 영상을 이용한 식별결과



(c) $\theta = 2^\circ$ 에서 합성된 ISAR 영상을 이용한 식별결과



(d) $\theta = 4^\circ$ 에서 합성된 ISAR 영상을 이용한 식별결과

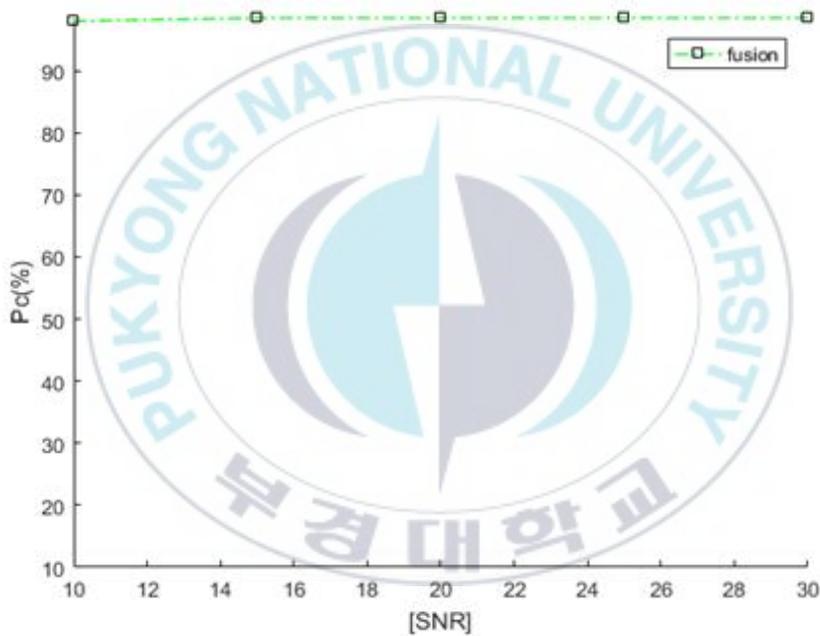


(e) $\theta = 4^\circ$ 에서 합성된 ISAR 영상을 이용한 식별결과

[그림 19] SNR에 따른 Monostatic vs Bistatic ISAR 식별능력 비교

3.3.4 모노스테틱, 바이스테틱 ISAR 융합을 통한 식별

[그림 20]는 모노스테틱, 바이스테틱 ISAR 융합을 통한 표적식별 성능을 나타낸다. [그림 19]는 $\alpha = 3^\circ$ 에서 SNR에 따른 식별 결과를 나타낸다. 융합으로 인해 θ 의 값과 상관없이 97% 이상의 높은 식별 능력을 가짐을 확인 할 수 있었다.



[그림 20] SNR에 따른 융합 식별능력 비교

IV. 결론

본 논문에서는 모노스테틱 및 바이스테틱 ISAR 영상 융합을 이용하여 편대비행 표적식별 기법을 제안하였다. 레이더의 LOS 방향으로 진행되는 표적의 수직 해상도를 얻을 수 없는 모노스테틱 ISAR의 단점을 해결해 줄 수 있는 바이스테틱 ISAR를 이용하여 문제점을 해결하고, 또한 효과적인 식별효율성을 위해 바이스테틱 ISAR 만을 이용해 식별하는 대신 두 레이더의 융합을 통해 식별 효율성을 증가시켰다.

편대비행 표적의 ISAR 영상의 경우, 각각의 표적의 ISAR 영상을 추출하여 표적식별을 수행하는 기법을 사용하는 대신, 단일 표적의 ISAR 영상을 합성하여 편대비행 표적식별을 수행하는 기법을 제안하였다.

검증된 기법인 시나리오 기반의 단일표적의 ISAR 영상을 이용하여 템플릿 매칭을 수행, 높은 상관관계를 가지는 투영위치와 단일 표적의 ISAR 영상 후보군을 선정하였고, 영상의 무게중심을 일정하게 만들어 주는 2D 푸리에 변환 특성을 이용하여 효율적으로 영상 합성에 사용되는 비용함수를 줄였다. 또한 비선형 최적화 기법인 PSO 알고리즘을 통하여 미확인 편대비행 표적의 ISAR 영상과 동일하게 합성할 수 있었다.

편대비행 표적식별에 사용되는 특성벡터는 극 좌표계 사상을 적용하였으며, 구분기로 NN 구분기를 사용하였다.

시뮬레이션 결과, 모노스테틱 ISAR의 경우 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 4° 이상의 어스팩트 앵글이 필요함을 확인 할 수 있었으며, 그 이하에서 식별을 위해서는 바이스테틱 ISASR 영상이 필요함을 알 수 있었다. 바이스테틱 ISAR의 경우 θ 에 상관없이 높은 식별 성능을 보였으며, $\theta > 4$ 이상에서 모노스테틱 ISAR 보다 많은 처리 시간이 필요함을 확인

할 수 있었다. 식별 성능의 효율성을 위해 θ 에 따라 두 ISAR의 융합을 통해 식별 하였으며, 식별 결과 $\theta > 4$ 일 경우 모노스테틱 ISAR, 그 이하는 바이스테틱 ISAR로 식별하는 것이 식별 성능과 처리시간 면에서 더 나을 확인 할 수 있었다.

본 논문은 간단한 비행 방향만 고려하였으며, 향후 전반적인 비행 방향에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.



참고문헌

- [1] C. Ozdemir, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithm", John Wiley & Sons, Inc, Chapter 8, pp. 299-344, Feb. 2012.
- [2] F. Berizzi and G. Corsini, "Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization", IEEE Trans. Aero. Electro. Sys, Vol. 32, No. 3, pp. 1185-1191, Jul. 1996.
- [3] Seung-Ku Han, Kyung-Tae Kim, and Eun-Jung Yang, "Simulation of Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar Image Generation", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic and Science, Vol. 25, No. 4, pp. 451-458, Apr. 2014.
- [4] Sang-Bin Cha, Se-Won Yoon, Seok-Hyun Hwang, Min-Seok Kang, Joo-Ho Jung, and Sang-Hong Park, "Aanalysis of Phase Adjustment Techniques for ISAR Imaging Targets in Formation Flight", The Journal of KIIT, Vol. 16, No. 5, pp. 67-74, May 2018.
- [5] Li. Xi, Liu. G., and Ni. J., "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization", IEEE Trans. Aero. Electro. Sys, Vol. 35, No. 4, pp. 1240-1251, Oct. 1999.
- [6] Seung-Jae LEE, Seong-Hyeon Lee, Min-Seok Kang, Eunjung Yang, and Kyung-Tae Kim, "Analysis of Target Identification Performances Using Bistatic ISAR Images", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic and Science, Vol. 27, No. 6, pp.

566–576, Jun. 2016.

- [7] Li. Xi, Liu. G., and Ni. J., "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization", *IEEE Trans. Aero. Electro. Sys*, Vol. 35, No. 4, pp. 1240–1251, Oct. 1999.
- [8] K. S. Kim, E. J. Yang and C. H. Kim, "Improvement of ISAR Autofocusing Performance based on PGA", *KIMST*, Vol. 17, No 5, pp. 680–687, Oct. 2014.
- [9] P. H. Eichel, and C. V. Jakowats, "Phase–gradient algorithm as an optimal estimator of the phase derivative", *Optics Letters*, Vol. 14, No. 20, pp. 1101–1103, Oct. 1989.
- [10] 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", *Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 27, No. 1, pp. 69–75, Jan. 2016.
- [11] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum–entropy phase adjustment for ISAR", *IEEE Radar Conference*, Vol. 151, No. 4, Aug. 2004.
- [12] M. S. Kang, J. H. Bae, S. H. Lee, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus via minimization of Tsallis Entropy", *IEEE Trans. Aero. Electro. Sys*, Vol. 52, No. 6, pp. 2950–2960, Dec. 2016.
- [13] P. H. Eichel, and C. V. Jakowats, "Phase–gradient algorithm as an optimal estimator of the phase derivative", *Optics Letters*, Vol. 14, No. 20, pp. 1101–1103, Oct. 1989.
- [14] S. H. Park, H. T. Kim, and K. T. Kim, "Segmentation of ISAR images of targets moving in formation," *IEEE Trans. Geosci.*

- Remote Sens.*, vol. 48, no. 4, pp. 2099 - 2108, Apr. 2010.
- [15] X. Bai, F. Zhou, M. Xing, and Z. Bao, "A Novel Method for Imaging of Group Targets Moving in a Formation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 1, pp. 221 - 231, Jan. 2012.
- [16] 김민, 강기봉, 정주호, 김경태, 박상홍, "편대비행 표적식별을 위한 효과적인 ISAR 영상 합성 방법", 한국전자과학회논문지, 27(8), pp. 758-765, 2016년 8월.
- [17] 황석현, 차상빈, 윤세원, 정주호, 박상홍, "모노스테틱, 바이스테틱 HRRP를 이용한 편대비행 대수 추정", 2018 한국전자과학회 하계종합 학술대회, 2018
- [18] In-O choi, Kyung-Tae Kim, Joo-Ho Jung, and Sang-Hong Park, "Efficient Recognition of ISAR images Using 1D Central Moments", *The Journal of KIIT*, Vol. 14, No. 1, pp. 61-68, Jan. 2016.
- [19] S. H. Park, J. H. Jung, S. H. Kim, and K. T. Kim, "Efficient classification of ISAR images using 2D Fourier transform and polar mapping," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 51, no. 3, pp. 1726-1736, Jul. 2015.
- [20] In-O choi, Kyung-Tae Kim, Joo-Ho Jung, and Sang-Hong Park, "Efficient Recognition of ISAR images Using 1D Central Moments", *The Journal of KIIT*, Vol. 14, No. 1, pp. 61-68, Jan. 2016.

부 록

[게제 논문]

논문제목 (Paper Title)	논문 발표일 (Date)	논문지명 (Journal Title)	논문지 구분 ¹⁾	저자 구분 ²⁾
Monostatic,Bistatic ISAR 영상 융합을 통한 표적식별 연구	2018.08	Journal of KIIT	학진 등재지	제1저자
편대비행 ISAR 영상 형성을 위한 위상보정 기법 분석	2018.05	Journal of KIIT	학진 등재지	제1저자
Monostatic,Bistatic HRRP를 이용한 편대비행 대수 추정	2019	Journal of KIIT	학진 등재지	제2저자
드론과 조류의 분별을 위한 효과적인 미세 도플러 특성벡터 연구	2019	Journal of KIIT	학진 등재지	제2저자

[학술 학회]

논문제목 (Paper Title)	발표일 (Date)	학술회명 (Conference Title)
바이스태틱 ISAR 영상을 이용한 편대비행 표적 식별 연구	2018.06	한국전자과학회 하계 종합학술대회
Analysis of Phase Adjustment Techniques for ISAR Imaging Targets in Formation Flight	2018.05	대한임베디드공 학회
Analysis of Monostatic/Bistatic ISAR Images for Effective Target Recognition	2017.11	대한임베디드공 학회
Classification of Missile Targets Using Maneuvering Trajectory Information	2017.08	대한임베디드공 학회
A study on Signal Processing for battleship ISAR Image Quality Improvement	2017.08	2017 IEMEK Symposium on Embedded Technology
함정 요동에 따른 ISAR 영상 품질 분석 연구	2016.10	2016 한국멀티미디어 학회 추계학술발표대 회

감사의 글

대학교 입학 전 대학원 진학에 대한 생각이 없던 제가 우연한 기회로 대학원 진학하였고, 많이 부족한 제가 대학원 졸업과 더불어 2년이란 기간 동안 바쁘게 끌어왔던 논문이 이렇게 한 권의 책으로 나오게 되어 더할 나위 없이 기쁜 마음입니다. 대학교 3학년부터 대학원 2학년까지 총 4년. 어지 보면 4년이란 긴 시간동안 부족한 제가 지식을 쌓고 또 성장시켜 주신 많은 분들에게 감사의 인사를 드리려고 합니다.

먼저, 부족한 저를 받아주시고, 많은 배움을 주신 저희 박상홍 교수님. 정말 감사합니다. 교수님을 만난 건 아마 제 인생 중에 가장 행운이지 않나 생각합니다. 교수님께서 베풀어주신 은혜 평생 잊지 않고 살아가겠습니다.

낮가림이 심한 저에게 먼저 다가와 주시고, 많은 조언과 삶의 방향성을 많이 제시 해주신 정주호 교수님. 정말 감사합니다.

또한, 제 옆에서 힘이 되어주고, 격려해주신 분들께도 감사의 인사를 드립니다. 먼저 맨날 보면 서로 욱하고 싸우기 바쁜 우영이, 공무원 합격하고도 1년 동안 발령을 못 받아 하염없이 놀던 헌일이, 옆에서 보고 있으면 하는 행동이 좀 바보 같아도 의지 넘치는 영렬이, 지금 타지에서 열심히 공부하고 있는 의상이, 운동 열심히 해서 살 많이 빼더니 요요현상이 와서 예전 보다 더 커진 지훈이, 너희들의 응원 아닌 응원 덕에 내가 무사히 대학원 졸업할 수 있었어. 고맙다 친구들아! 우리 우정 영원하자.

그리고, 나의 대학원 생활동안 옆에서 항상 많은 용기와 응원해준 우리 호진이. 바쁘다는 핑계로 잘 챙겨 주지 못해서 미안하고 또 많이 고마워! 훗날 나의 대학원 생활을 떠올리면 아마 호진이가 제일 먼저 생각 날 거야.

동고동락하며 의기투합한 제 학교 선·후배 동기, ESAL 연구실 친구들에게도 감사함을 전합니다. 먼저 저에게 ESAL 연구실을 알게 해준 인호 선배. 선배님과 같이 연구실에서 지낸 기간은 없지만 만나면 먼저 말 걸어주시고 많은 도움 주셔서 감사합니다. 저의 멘토이자 대학원 생활의 많은 본보기가 된 민이형. 민이형 덕분에 제가 많이 배우고, 성장 할 수 있었습니다. 감사합니다. 그리고 친구지만 보고 있으면 어른스럽고, 하고자 하는 의지가 넘쳤던 기봉이, 연구실 대학원 동기인 세월이랑 석현이, 제일 편하고 친구 같던 병록이, 항상 밝은 기운을 준 예주, 연구실 에이스이자 분위기 메이커 석호와 한솔이, 좋은 기운 뽐뽐 채빈이, 긍정적 마인드 효정이, 귀여운 막내 민경이, 조용한 준현이, 동글동글 현준이 까지 덕분에 좋은 연구실 추억 가지게 해주어서 고맙다.

그리고 형이지만 친구 같고, 어리버리 해 보이지만 능력자인 2호관 고인물 지수형, 동기이자 내가 제일 아끼는 동생 우리 동주, 대현이, 호연이 정말 감사합니다.

마지막으로 오랫동안 고생하시며 말썽쟁이 아들 밝고, 잘 크게 키워주신 저희 어머니, 아버지, 그리고 하나밖에 없는 나의 동생 상혁이, 이 자리를 빌어서 감사의 인사를 드립니다. 어머니, 아버지, 동생 사랑합니다.

미처 감사의 마음을 전하지 못한 모든 분들에게도 감사의 말씀을 드리며 이 글을 마칩니다.

2019. 02. 22

차 상 빈