creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

공 학 석 사 학 위 논 문

레이더를 이용한 효과적인 편대비행 표적식별

2017년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 자 공 학 과

김 민

공 학 석 사 학 위 논 문

레이더를 이용한 효과적인 편대비행 표적식별

지도교수 박 상 홍

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2017년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 자 공 학 과

김 민

김 민의 공학석사 학위논문을 인준함.

2017년 2월 24일

위원장 공학박사 이 원 창 (인)

위 원 공학박사 임 창 헌 (인)

위 원 공학박사 박 상 홍 (인)

목 차

Abstract ····· iii

제1장 서 론 ····· **1**

제2장 본 론 ····· **3**

1. 레이더 반사 신호 구성 ····· 3
2. 편대비행 표적 식별 문제의 특징 ····· 11
3. 편대 비행 표적 식별을 위해 제안된 합성 기법 ····· 14
   1) HRRP 합성 기법 ····· 14
   2) ISAR 영상 합성 기법 ····· 18
4. 표적식별 기법 ····· 22
   1) 합성된 HRRP을 이용한 표적식별 기법 ····· 22
   2) 합성된 ISAR 영상을 이용한 표적식별 기법 ····· 25

제3장 실험 결과 ····· **29**

1. 제안된 기법을 통한 합성결과 ····· 29
   1) HRRP 합성결과 ····· 31
   2) ISAR 영상 합성결과 ····· 33
2. 구분 결과 ····· 36
   1) 합성된 HRRP을 이용한 편대비행 표적식별 결과 ····· 37
   2) 합성된 ISAR 영상을 이용한 편대비행 표적식별 결과 ····· 38

제4장 결 론 ····· **40**

참고문헌 ····· **42**

부록 ····· **45**

그림 목차

[그림 2.1] 점산란원 Boeing737 모델 및 Boeing737의 HRRP ····· 5
[그림 2.2] 세로방향 해상도 형성을 위한 시나리오 ····· 6
[그림 2.3] 레이더 시선방향 및 각속도에 따른 접선속도 ····· 8
[그림 2.4] Boeing737의 ISAR 영상· ····· 10
[그림 2.5] 편대비행 표적식별을 위한 합성기법· ····· 13
[그림 2.6] 극 좌표계 사상 원리 ····· 27
[그림 2.7] 극 좌표계로 사상된 ISAR 영상 ····· 28
[그림 3.1] 전투기 모형 ····· 30
[그림 3.2] HRRP 합성결과 ····· 32
[그림 3.3] ISAR 영상 합성결과 ····· 34
[그림 3.4] 템플릿 매칭 점수 ····· 35
[그림 3.5] 합성된 HRRP를 이용한 식별결과 ····· 37
[그림 3.6] 합성된 ISAR 영상을 이용한 식별결과·· ····· 38
[그림 3.7] 합성된 HRRP 및 ISAR 영상을 이용한 식별결과·· ····· 39

Effective Classification of Target Flying in Formation using a Radar

Min Kim

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

Abstract

High resolution range profile (HRRP) and inverse synthetic aperture radar (ISAR) images are 1-dimensional and 2-dimensional RCS distributions that can be generated through radar reflection signals and provide very effective radar signature for target recognition using radar. Since HRRPs and ISAR images vary considerably depending on the aspect angle, single target classification is performed by training HRRP and ISAR images according to observation angles in the database. However, when there are many targets in the single radar beam, HRRP and ISAR images are generated in real time by the type and the number of targets, real time projection position, 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.

In this paper, HRRP and ISAR images of a single target that have been trained previously are combined 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.

F-14, F-16, F-22, and F-117 scaled models of the 1 m size measured in the electromagnetic anechoic chamber of Pohang University of Science and Technology were used to prove the validity of the proposed method. Experimental results were obtained at SNR = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30dB. HRRP and ISAR images of targets flying in formation were generated by randomly selecting each parameter within a specific range. In order to reduce measurement error caused by additive white gaussian noise (AWGN), simulation was repeated 100 times in each SNR environment. In the environment with SNR of 15dB or more, 100% classification result was obtained. In case of SNR = 0dB, target classification was achieved with 93% probability of HRRP and 97% of ISAR image.

Ⅰ. 서 론

레이더는 국가방위의 핵심기술로 나날이 발전하는 장비 및 최첨단 무기의 등장으로 인하여 그 의존도와 역할이 커지고 있다. 레이더 장비는 전자파를 방사하여 탐지하고자 하는 물체의 표면으로부터 반사되는 전자파를 수신하는 장치이다. 최근 하드웨어의 발전으로 레이더 시스템은 변조된 파형 및 지향성 안테나를 이용하여 높은 대역폭의 전자기파를 표적을 탐지하고자 하는 공간으로 송신할 수 있다. 표적으로부터 반사된 신호를 수신하여 표적과의 거리, 속도 및 각도정보 등 표적에 관련된 정보를 추출할 수 있으며 추출된 표적의 특징을 이용하여 비협조적 표적의 위치정보 및 피아식별을 가능하게 한다.

레이더를 이용한 표적식별에 사용되는 대표적인 레이더 반사 신호로 HRRP (high resolution range profile) 및 ISAR (inverse synthetic aperture radar) 영상이 있다. 먼저 HRRP는 표적을 향한 레이더 시선방향 위에 표적을 투영시킨 표적의 일차원 RCS (radar cross section) 분포도이다[1]. HRRP는 실시간으로 구성되어 표적식별에 이용될 수 있지만 관측각도에 따른 의존도가 높기 때문에 관측각도에 대하여 조밀한 간격으로 HRRP를 구성하여 방대한 데이터를 학습시켜야 한다는 단점이 있다. ISAR 영상은 여러 관측각도에서 획득된 HRRP를 코히런트(coherent)하게 처리함으로써 생성된 표적의 2차원 RCS 분포도이다. ISAR 영상은 HRRP와 비교하여 표적식별에 효과적인 정보를 보유하지만 표적의 움직임을 예측하는 것은 불가능하므로 상대적인 위상정보를 통해 ISAR 영상을 생성하기 위하여 여러 가지 보상기법이 적용되어야 한다.

HRRP 및 ISAR 영상에 대하여 관측각도별로 충분한 데이터가 학습

되어 있을 경우 표적식별은 효과적으로 수행될 수 있다. 하지만 항법상의 부담 경감, 공격 및 방어력의 증가 등의 목적으로 군용기가 집단으로 행동할 시 안테나 내부에 다수의 표적이 들어오게 되고 이로 인하여 편대를 이룬 표적의 HRRP 및 ISAR 영상은 각각의 단일 표적의 HRRP 또는 ISAR 영상들이 겹쳐진 형태로 생성된다. 이에 따라서 미리 학습해 두었던 데이터로는 표적들의 종류 및 개체 수, 실시간 위치에 따라서 합성되는 편대비행 중인 표적들의 HRRP 또는 ISAR 영상의 식별이 불가능 하게 된다.

따라서 본 논문에서는 편대비행중인 표적들을 식별하기 위하여 HRRP 또는 ISAR 영상에서 각 표적들을 분리하는 방법을 사용하지 않고, 기존에 학습되어 있던 표적들의 HRRP 및 ISAR 영상들을 합성하여 표적식별을 수행하였다. 2장에서는 편대비행 표적식별을 위하여 제안된 합성 기법들에 대해 서술한다. 2장 1절에서는 표적으로부터 반사되어 수신된 레이더 신호를 산란점 모델링을 통하여 HRRP와 ISAR 영상으로 구성하는 방법을 서술한다. 2장 2절에서는 편대비행 표적들의 HRRP 및 ISAR 영상으로부터 표적들을 분리시키는 기법을 이용하는 대신 표적들을 합성시키는 기법을 사용해야 하는 편대비행 표적 식별 문제의 특징에 대하여 서술한다. 2장 3절에서는 먼저 HRRP와 ISAR 영상 각각의 합성 기법을 소개한 후 여러 가지 변수로 구성된 비선형 합성문제의 최적화에 적용되는 PSO (particle swarm optimization) 알고리즘에 대하여 설명한다. 2장 4절에서는 편대비행 표적식별을 위해 합성된 HRRP 및 ISAR 영상을 이용하여 표적식별하기 위해 적용된 기법들에 대하여 기술한다. 3장에서는 포항공과대학교의 전자파 무반향실(anechoic chamber)에서 측정된 5개의 비행기 축소모형에 대한 측정 데이터에 대하여 제안된 기법을 적용한 편대비행 표적식별 실험 결과를 통하여 효용성을 검증한다. 마지막 4장에서는 제안된 기법들에 대한 결론을 간략하게 기술한다.

Ⅱ. 본 론

1. 레이더 반사 신호 구성

충분히 높은 주파수에서 전자기파가 물체에 조사될 경우 산란에너지가 집중되는 위치들을 점산란원이라고 한다. 또한 물체의 전자파 산란은 물체의 점산란원들 각각의 전자파 산란의 합으로 근사 될 수 있는데 이는 실제의 물리적인 전자파 산란 메커니즘에 매우 가까운 GTD (geometrical theory of diffraction) 해석 모델에 근거한다[2]. 따라서 원시야(far filed)에서 N개의 산란점으로 구성된 표적으로부터 반사된 주파수에 따른 수신신호는 다음과 같이 근사 될 수 있다[3].

$$E^s(f) = \sum_{n=1}^{N} A_n \exp(-j2kx_n) = \sum_{n=1}^{N} A_n \exp(-j2\pi(\frac{2f}{c})x_n) \quad (2.1)$$

여기서 c는 빛의 속도, k는 파수(wave number), A_n는 n번째 점산란원의 복소 RCS값, x_n는 n번째 점산란원의 레이더 시선방향 따른 표적과 점산란원 사이의 거리이다.

HRRP는 다양한 주파수에서 수신된 신호를 역 고속 퓨리에 변환(inverse fast fourier transform, IFFT)을 통해 얻을 수 있다.

$$HRRP(x) = F^{-1}\{E^s(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty}\left[\sum_{n=1}^{N} A_n \exp(-j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x_n)\right]\exp(j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x)d\left(\frac{2f}{c}\right) \quad (2.2)$$

위 식의 적분연산과 덧셈연산은 선형적이므로 교환법칙이 성립한다.

$$HRRP(x) = \sum_{n=1}^{N} A_n \int_{-\infty}^{\infty} \exp(j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)(x-x_n))d\left(\frac{2f}{c}\right) = \sum_{n=1}^{N} A_n \delta(x-x_n) \quad (2.3)$$

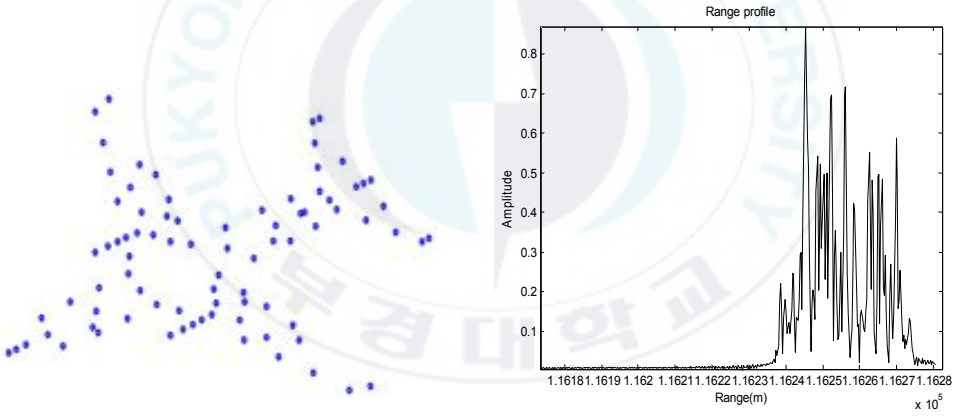
여기서 $\delta(x-x_n)$는 임펄스함수를 뜻하며 식 (2.3)의 HRRP에서 n번째 점산란원의 RCS값 A_n가 x_n의 위치에서 정확히 분리되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 주파수 대역폭이 무한하다는 가정 하에서 성립한다. 하지만 실제 레이더 운용 시 주파수대역은 제한되어 있으므로 식 (2.3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$HRRP(x) = \sum_{n=1}^{N} A_n \int_{f_c-B/2}^{f_c+B/2} \exp(j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)(x-x_n)d\left(\frac{2f}{c}\right) = \sum_{n=1}^{N} A_n \exp(j2k_c(x-x_n)) \times \left(\frac{\exp(j2\pi\left(\frac{B}{c}\right)(x-x_n)) - \exp(-j2\pi\left(\frac{B}{c}\right)(x-x_n))}{j2\pi}\right) \quad (2.4)$$

여기서 f_c는 중심주파수, B는 대역폭, $k_c=2\pi f_c/c$ 는 중심주파수에 따른 파수이다. 위의 결과를 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$HRRP(x) = \left(\frac{2B}{c}\right)\sum_{n=1}^{N} A_n \exp(j2k_c(x-x_n))sinc\left(\frac{2B}{c}(x-x_n)\right) \qquad (2.5)$$

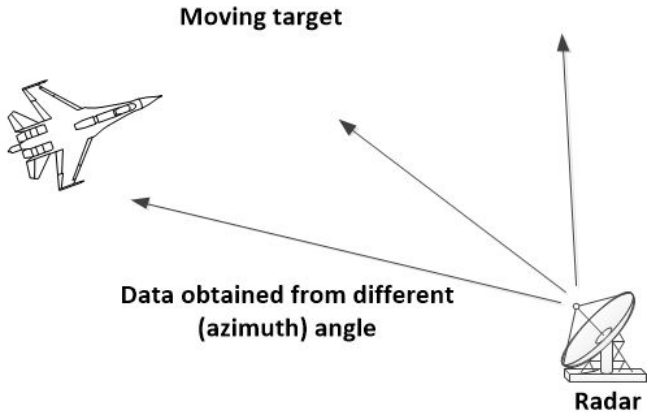
여기서 $sinc(\cdot)$는 sinc함수를 뜻하며 이 함수가 $\triangle x = \frac{c}{2B}$의 해상도로 거리 요소의 증분 값을 형성하는 것을 알 수 있다. 이에 따라서 HRRP의 해상도는 레이더의 운용주파수 대역폭 B에 의하여 결정된다. [그림 2.1]은 점산란원으로 구성된 Boeing737 모델 및 300MHz의 대역폭을 갖는 신호를 이용하여 생성된 레이더시선방향에 따른 Boeing737 점산란원 모델의 HRRP를 나타낸다.



(a) Boeing 737 (b) HRRP

[그림 2.1] 점산란원 Boeing737 모델 및 Boeing737의 HRRP

HRRP를 생성하는 방법과 유사하게 레이더 시선방향과 수직한 방향으로 표적의 점산란원을 투영시킨 cross-range profile ($HRRP_C$)을 얻을 수 있다. [그림 2,2]와 같이 $HRRP_C$를 생성하기 위하여 레이더와 표적사이의 서로 다른 관측각도에서 반사된 신호를 수신해야한다. HRRP는 특정 관측



[그림 2.2] 세로방향 해상도 형성을 위한 시나리오

각도에서 여러 가지 주파수 값 즉 대역폭을 갖는 신호를 통해 생성되는 반면 $HRRP_C$는 한 주파수에서 여러 관측각도에서 반사된 신호를 수신하여 코히런트 신호처리를 통해 생성된다[3].

$HRRP_C$를 생성하기 위하여 원 시야에서 N개의 점산란원으로 구성된 표적에 대해 관측각도(aspect angle)에 따른 수신신호를 다음과 같이 근사화 할 수 있다[3].

$$E^s(k,\phi) = \sum_{n=1}^{N} A_n \exp(-j2\vec{k} \bullet \vec{r}_n) \tag{2.6}$$

여기서 A_n는 점산란원의 RCS 복소 크기 값, $\vec{r}_n$는 레이더의 위치부터 점산란원의 위치(x_n, y_n)까지 벡터를 나타낸다. 따라서 $\vec{k} \bullet \vec{r}_n$을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\vec{k} \bullet \vec{r}_n = (k_x \hat{x} + k_y \hat{y}) \bullet (x_n \hat{x} + y_n \hat{y}) \\ = k\cos\phi x_n + k\sin\phi y_n \tag{2.7}$$

식 (2.6)은 식 (2.7)을 이용하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$E^s(k,\phi) = \sum_{n=1}^{N} A_n \exp(-j2k\cos\phi x_n)\exp(-j2k\sin\phi y_n) \tag{2.8}$$

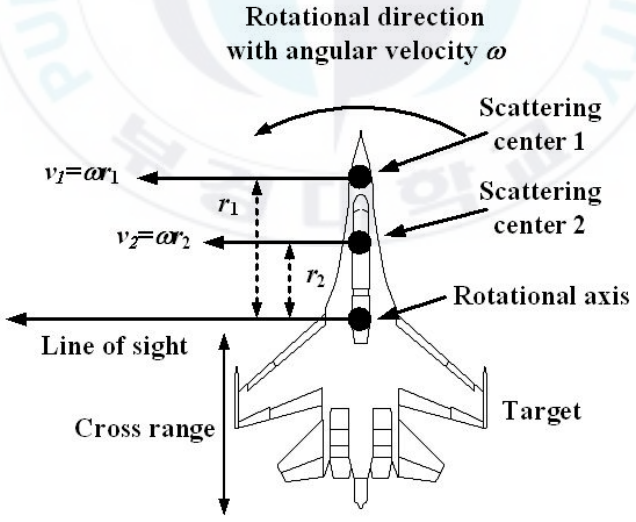
총 관측각도 ϕ가 5～6°일 경우 작은 각도 근사(small angle approximation)가 가능하며 대역폭 B가 전송주파수(carrier frequency) f_c에 비해 10배 이상 작을 경우 작은 대역폭 근사(small bandwidth approximation)가 가능하다. 따라서 식 (2.8)을 다음과 같이 나타낼 수 있다[1, 3].

$$E^s(\phi) = \sum_{n=1}^{N} B_n \exp(-j2k_c \phi y_n) \\ = \sum_{n=1}^{N} B_n \exp(-j2\pi(\frac{2f_c}{c})\phi y_n) \tag{2.9}$$

여기서 B_n는 상수이며 $A_n\exp(-j2kx_n)$와 같다. 위 식에서 $(2f/c)\phi$와 y_n가 퓨리에 관계에 있음을 알 수 있다. 다음과 같이 총 관측각도가 Ω라고 할 경우 $(2f/c)\phi$에 관하여 IFFT을 수행하면 $HRRP_C$를 얻을 수 있다.

$$HRRP_c(y) = F^{-1}\{E^s(\phi)\} \tag{2.10}$$
$$= \sum_{n=1}^{N} B_n \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \exp(j2\pi(\frac{2f_c}{c})\phi(y-y_n))d(\frac{2f_c}{c}\phi)$$
$$= (\frac{2f}{c}\Omega)\sum_{n=1}^{N} B_n sinc\left[\frac{2f_c}{c}\Omega(y-y_n)\right]$$

여기서 $HRRP_C(y)$는 $\frac{\lambda}{2\Omega}$의 해상도를 갖는다. 하지만 비협조적으로 기동하는 표적을 통하여 얻어지는 총 관측각도 Ω를 정확하게 측정 하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 cross-range의 척도는 우리가 측정할 수 있는 값으로 변환되어져야 한다. 먼저 레이더 관측시간(Coherent Processing Interval, CPI) T 동안 일정한 각속도 ω로 표적이 회전함을 가정하여 총 관측각도 와의 관계식을 $\Omega = \omega T$ 와 같이 표현 할 수 있다. 또한 [그림 2.3]



[그림 2.3] 레이더 시선방향 및 각속도에 따른 접선속도

에서 볼 수 있듯이 레이더 시선방향에 따른 접선속도는 $\omega y = v_r$와 같으며 회전축으로부터 cross-range 방향으로 점산란원이 떨어져 있는 거리에 비례하여 증가한다. 도플러 주파수(Doppler frequency)공식 $f_D = 2v_r/\lambda$에 따라서 식 (2.10)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} HRRP_c(y) &= \left(\frac{2f}{c}\Omega\right)\sum_{n=1}^{N} B_n sinc\left[\frac{2f_c}{c}\omega T(y-y_n)\right] \\ &= \sum_{n=1}^{N} C_n sinc\left[T(f_D - f_{Dn})\right] \\ &= HRRP_c(f_D) \end{aligned} \tag{2.11}$$

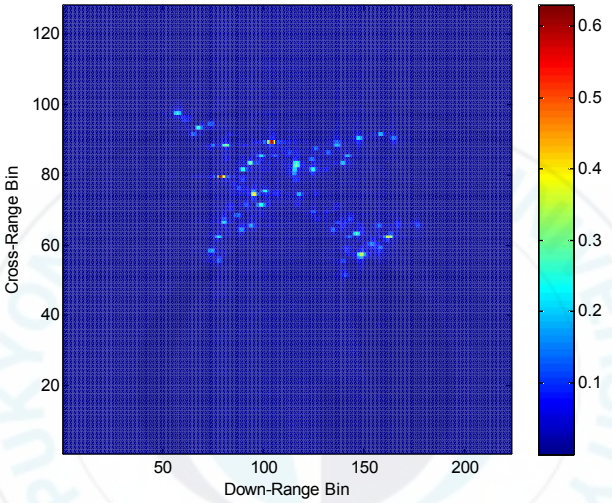
여기서 $C_n=(2f\Omega/c)B_n$ 이며 $HRRP_C(f_D)$의 해상도는 $1/T$으로 표적을 관측하는 시간에 비례하여 해상도는 더 좋아진다.

ISAR 영상은 range와 cross-range를 각각 축으로 하는 2차원 영상이며 표적으로부터 대역폭을 갖는 신호를 통해 여러 관측각도에서 데이터를 수신하여 생성된다. 식 (2.8)은 관측각도별 주파수 영역에서의 수신신호이며 작은 각도 근사 및 작은 대역폭 근사를 통해 다음과 같이 주파수-시간 영역으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} E^s(k,\phi) &= \sum_{n=1}^{N} A_n \exp(-j2kx_n)\exp(-j2k_c\phi y_n) \\ &= \sum_{n=1}^{N} A_n \exp(-j2kx_n)\exp(-j2\pi f_{Dn}t) \\ &= E^s(k,t) \end{aligned} \tag{2.12}$$

ISAR 영상은 식 (2.12)을 각각 k 및 t에 관하여 다음과 같이 IFFT를 수행하여 얻을 수 있다[3, 4].

$$ISAR(x,f_D)=\sum_{n=1}^{N}A_n\left[\int_{f_c-B/2}^{f_c+B/2}\exp(-j2\pi k(x-x_n))dk\right]\times\left[\int_0^T\exp(-j2\pi(f_D-f_{Dn})t)dt\right] \quad (2.13)$$



[그림 2.4] Boeing737 ISAR 영상

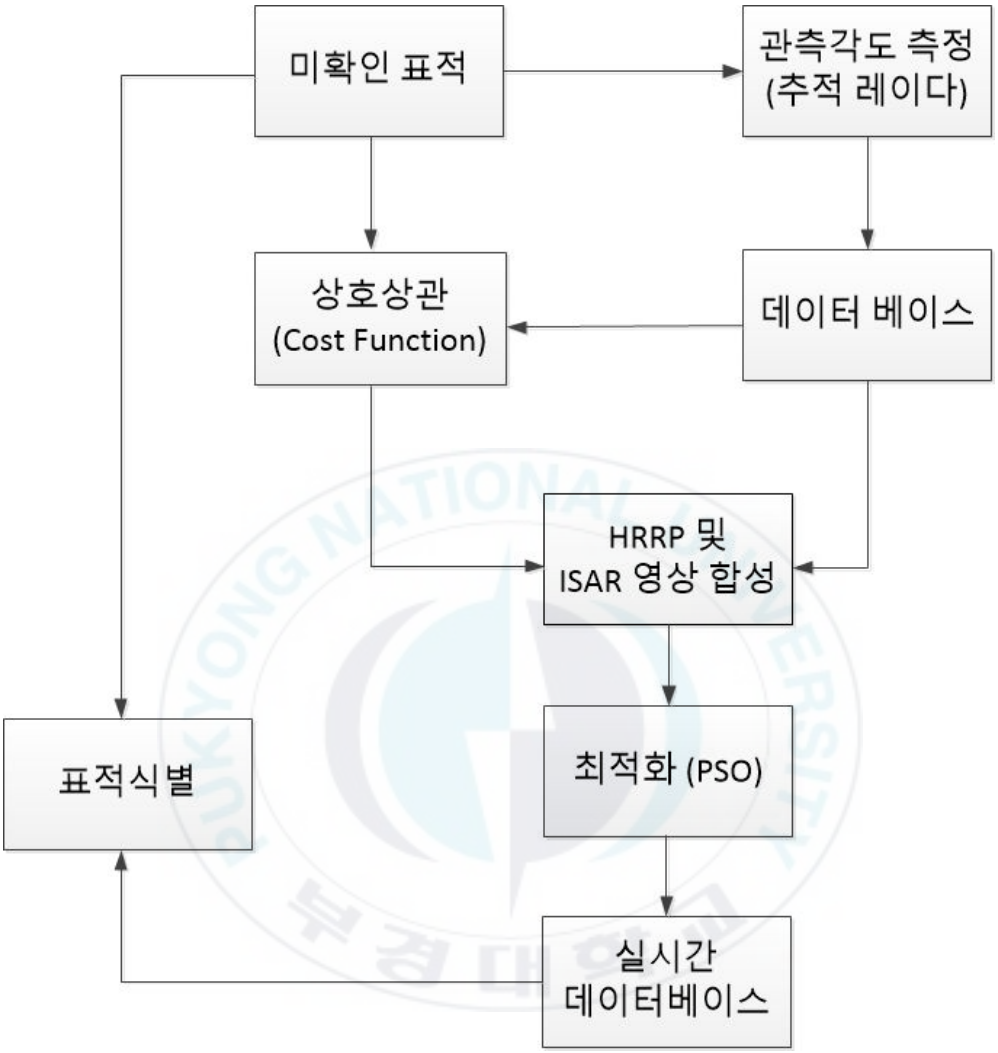
[그림 2.4]는 [그림 2.1]의 (a)의 Boeing737 점산란원 모델을 식 (2.13)에 따라 range-Doppler 도메인에 나타낸 ISAR 영상이다.

2. 편대비행 표적식별 문제의 특징

HRRP와 ISAR영상은 레이더 시선방향 및 영상 투영면(image projection plane)에 표적이 투영되어 RCS 분포도를 형성한다[3]. 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 HRRP 및 ISAR영상으로부터 각각의 표적들을 분리하는 많은 방법들이 제안되어왔다[5-8]. 하지만 표적의 수를 정확히 알지 못하며 각각의 표적의 서로 다른 속도, 가속도 및 JEM(Jet Engine Modulation)등의 영향으로 인한 위상왜곡 때문에 HRRP 및 ISAR영상에서 각각의 표적을 분리하는 것은 매우 어렵다[9]. 따라서 본 논문에서는 단일 표적의 HRRP 및 ISAR 영상을 합성하여 표적식별을 수행하는 방법을 제안한다[10].

표적식별 편대비행 식별을 위한 합성기법은 표적의 수, 위치, 척도 인자(scaling factor) 및 관측각도를 변수로 하는 비선형문제를 최적화하여 수행된다. 하지만 HRRP 및 ISAR 영상은 표적과 레이더사이의 관측각도에 따라서 매우 민감하기 때문에 촘촘한 샘플간격으로 구성된 학습데이터의 모든 경우의 수를 고려하는 것은 매우 많은 계산 시간 및 방대한 메모리를 요구하므로 보다 효율적인 방안이 필요하다. 제안된 효율적인 영상 합성 기법은 [그림 2.5]와 같다. 제안된 기법은 향상된 추적 레이더를 통해서 특정 관측각도 $\theta_d - \Delta\theta \leq \theta \leq \theta_d + \Delta\theta$의 범위에서 표적이 관측됨[11]을 가정한 후 데이터베이스로부터 후보 관측각도에 해당하는 단일 표적의 HRRP 및 ISAR 영상을 상호상관(cross correlation)을 비용함수(cost function)로

하는 PSO (Particle Swarm Optimization)을 통하여 표적들 각각의 위치 및 척도인자를 최적화하여 HRRP 와 ISAR 영상을 합성한다. 상기 과정들을 표적들의 수와 종류에 따라 반복하여 실시간 데이터베이스를 구축하여 편대비행 표적식별을 수행할 수 있다[12].



[그림 2.5] 편대비행 표적식별을 위한 합성기법

3. 편대비행 표적 식별을 위해 제안된 합성기법

1) HRRP 합성기법

편대비행중인 표적들의 $HRRP_{fo}$는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$HRRP_{fo}(x)=\sum_{h=1}^{H} s_h HRRP_h(x-l_h) \tag{2.14}$$

여기서 h = 1,2,...,H는 편대를 구성하는 표적의 수이며 단일표적의 $HRRP_h$는 레이더 시선방향위의 l_h지점에 진폭의 분산을 고려하기 위한 척도인자 s_h의 비율(scale)로 투영된다. 레이더와 표적사이의 거리는 상황에 따라서 달라지기 때문에 거리에 따라서 불규칙한 표적의 진폭은 정규화(normalization) 과정이 필요하며 다음과 같다[13].

$$\overline{HRRP}_{fo}(x)=\frac{HRRP_{fo}(x)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{N} HRRP_{fo}(x)HRRP_{fo}^{*}(x)}} \tag{2.15}$$

위 식에서 *는 복소공액, N은 HRRP의 픽셀 개수이다. 또한 추적레이더를 통하여 측정된 관측각도에 해당하는 단일 표적의 HRRP들을 $HRRP_k$(k=1,2,...,K)로 정의할 수 있으며 표적의 RCS의 크기 또한 관측각도에 따라서 매우 민감하다. 따라서 정규화 과정 없이 $\overline{HRRP}_{fo}$와 $HRRP_k$의 상호상관을 계산하게 되면 상관도가 상대적으로 작아도 큰 값이 계산될

수 있다. 이에 따라 $HRRP_k$ 또한 식 (2.15)와 같이 정규화 과정이 필요하며 $\overline{HRRP}_k$와 같다.

HRRP 합성 과정에서 각각의 HRRP가 레이더 시선방향위에 투영되어질 위치를 예측하는 것은 불가능하다. 이와 같은 이유로 $\overline{HRRP}_{fo}$을 구성하는 1차원 픽셀들이 표적들이 투영될 위치후보가 된다. 하지만 모든 픽셀들을 고려하여 합성할 시 매우 많은 계산시간을 요구하기 때문에 $\overline{HRRP}_{fo}$와 $\overline{HRRP}_k$의 상호상관을 통하여 각각의 $HRRP_k$가 투영되어질 위치후보를 추정해야하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Cr(l) = \sum_{x=1}^{N} \left| \overline{HRRP}_{fo}(x) \overline{HRRP}_k^*(x-l) \right| \tag{2.16}$$

위 식에서 $\overline{HRRP}_{fo}$을 구성하는 표적 중 $\overline{HRRP}_k$가 존재한다면 정확하게 일치하는 부분이 존재할 것이며 그때의 위치 l_h에서 Cr의 최댓값을 갖게 될 것이다. 하지만 상대적으로 큰 RCS 값을 갖는 관측각도의 HRRP가 존재하거나 여러 HRRP들이 중첩되는 경우 다른 위치에서 Cr의 최댓값이 발생할 수 있다. 따라서 측정된 관측각도범위의 후보 $HRRP_k$들을 각각 $\overline{HRRP}_{fo}$와 상호상관을 계산하여 큰 순서로 총 q_k개의 첨두치를 갖는 위치를 $HRRP_k$ 가 투영되는 위치후보로 산정하며 그 식은 다음과 같다.

$$\overline{l}_k = [l_1\ l_2 \ldots l_{q_k}] = findpeaks\left\{ \left| IFT\left[FT\left[\overline{HRRP_{fo}} \right]^* FT\left[HRRP_k \right] \right] \right|, q_k \right\} \tag{2.17}$$

여기서 $\overline{l}_k$는 총 q_k개의 후보위치를 원소로 하는 벡터이며 Matlab의

findpeaks(·)함수를 이용하여 계산할 수 있다.

모든 후보 HRRP에 대하여 상기 과정을 반복하여 산정된 벡터 $(\bar{l}_1,\bar{l}_2,...,\bar{l}_k)$들을 이용하여 $HRRP_{fo}$와 같은 HRRP를 합성할 수 있으며, 다음 비용함수가 최댓값이 되는 HRRP가 선택되어 진다.

$$X=\begin{bmatrix}\hat{l}_1 & \hat{l}_2 \cdots & \hat{l}_H \\ \hat{s}_1 & \hat{s}_2 \cdots & \hat{s}_H\end{bmatrix}=\underbrace{\arg max \sum_{x=1}^{N}\left|\overline{HRRP}_{fo}\right|\left|\overline{HRRP}_{com}\right|}_{\hat{X}} \tag{2.18}$$

위 식에서 $\overline{HRRP}_{com}$ 및 $HRRP_{com}$은 다음과 같다.

$$\overline{HRRP}_{com}(x)=\frac{HRRP_{com}(x)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{N}HRRP_{com}(x)HRRP_{com}^{*}(x)}}, \tag{2.19}$$

$$HRRP_{com}=\sum_{h=1}^{H}X[2,h]\bullet HRRP_h(x-X[1,h])$$

척도 인자 $\hat{s}$는 양의 실수 값을 갖는다. H는 편대비행 합성에 사용된 표적의 수이며 총 K개의 $HRRP_k$중 임의로 선택되며 중복하여 선택될 수 있다. 또한 벡터 $\bar{l}_k$또한 $HRRP_k$와 같이 선택되어야 한다. 따라서 표적이 투영되는 위치 또는 크기$(\hat{l},\hat{s})$뿐 아니라 $HRRP_k$중 합성되어지는 조합에 따라서 합성된 $HRRP_{com}$또한 달라진다. 상기 변수를 모두 고려하여 식 (2.18)을 비용함수로 하는 PSO알고리즘을 이용하여 최적화 할 수 있다. 식 (2.18)와 같이 표현되는 p번째 particle X_p의 속도 및 위치는 다음과 같은 PSO 알고리즘을 통해 최적화 된다[14].

$$v_p^{i+1} = \phi v_p^i + c_1 r_1^i (X_{pbest} - X_p^i) + c_2 r_2^i (X_{gbest} - X_p^i) \quad (2.20)$$

$$X_p^{i+1} = X_p^i + v_p^{i+1} \quad (2.21)$$

위 식에서 ϕ는 관성 가중치(inertia weight), n은 반복 횟수(iteration number)을 의미하며 c_1,c_2는 c_1,c_2>1 그리고 c_1+c_2<4을 만족하는 실수며, r_1과 r_2는 0과 1 사이의 임의의 실수다. 식 (2.21)과 같이 p번째 particle은 식 (2.20)의 v_p^{i+1}이 더해진 위치로 이동한다.

제안된 기법을 사용하지 않을 경우 모든 경우의 수를 고려하여 표적의 HRRP를 합성해야 하며 $K^H \times N^H$와 같다. 제안된 기법을 사용할 경우 PSO 알고리즘에 따라서 개체군의 수와 반복수에 의하여 대수적 복잡도가 결정되며 $P \times I$와 같다. 여기서 K, N, H는 각각 측정된 관측각도에 따른 후보 HRRP의 수, 픽셀 수, 합성되어지는 표적의 수를 의미한다. 본 논문의 HRRP 합성 시뮬레이션에서는 K=13, N=401, H=3, P=8000, I=10의 값을 이용하였으며 대수적 복잡도는 각각 $13^3 \times 401^3$와 8000×10으로 제안된 기법이 대수적 복잡도 측면에서 더 효율적임을 알 수 있다.

2) ISAR 영상 합성기법

편대비행 중인 표적들의 ISAR 영상은 다음과 같다.

$$ISAR_{fo}(x,y)=\sum_{i=1}^{H} s_h ISAR_h(x-r_h,y-c_h) \tag{2.22}$$

여기서 h=1,2,...,H는 편대를 구성하는 표적의 수이며 단일표적의 $ISAR_h$는 영상투영면위의 (r_h, c_h)지점에 진폭의 분산을 고려하기 위한 척도인자 s_h의 비율로 투영된다. ISAR 영상 또한 정규화 과정이 필요하며 다음과 같다.

$$\overline{ISAR}_{fo}(x,y)=\frac{ISAR_{fo}(x,y)}{\sqrt{\sum_{y=1}^{M}\sum_{x=1}^{N} ISAR_{fo}(x,y)ISAR_{fo}^{*}(x,y)}} \tag{2.23}$$

위 식에서 M, N은 각각 ISAR 영상의 수평 및 수직방향의 픽셀의 개수이다. 마찬가지로 추적레이더를 통하여 측정된 관측각도에 해당하는 단일표적의 ISAR 영상들은 $ISAR_k$(k=1,2,...,K)로 정의할 수 있으며 식 (2.23)을 통하여 $\overline{ISAR}_k$로 정규화 될 수 있다.

영상투영면위에 ISAR 영상이 투영되어지는 위치를 예측하는 것은 매우 어렵다. 따라서 $\overline{ISAR}_{fo}$ 을 구성하는 수평, 수직방향의 2차원 픽셀들이 그 후보가 된다. 추정을 위해 사용되는 기법은 템플릿 매칭[15]으로 $\overline{ISAR}_k$에서 표적의 윤곽이 들어나는 부분만을 추출하여 복소공액을 수행한 뒤 $\overline{ISAR}_{fo}$에 겹쳐 곱하여 HRRP 영상합성과 마찬가지로 상호상관을 계산한다. 상호상관의 계산은 수평, 수직방향에 관해서 모두수행하며 이는 다음과

같이 표현할 수 있다.

$$Cr_k(r,c)=\sum_{y=1}^{Q}\sum_{x=1}^{P}\left|\overline{ISAR}_{fo}(x-r,y-c)\overline{ISAR}_k^{*}(x,y)\right| \tag{2.24}$$

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

$$\bar{r}_k,\bar{c}_k=\begin{bmatrix} r_1 & c_1 \\ r_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}=find\{Cr_k(r,c)\geq a\times\max(Cr_k(r,c))\} \tag{2.25}$$

위 식의 a는 0과 1사이의 실수 값을 갖는 상수이며 HRRP 합성문제와는 다르게 특정 값 보다 큰 상호상관을 갖는 위치를 후보로 하며 a가 0에 가까울수록 실제 투영위치가 산정된 후보위치에 포함될 확률이 높아진다. 하지만 위치 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.

측정된 관측각도 범위 내에서 식 (2.25)를 통하여 산정된 벡터 $(\bar{r}_1,\bar{c}_1,\bar{r}_2,\bar{c}_2,...,\bar{r}_k,\bar{c}_k)$들을 후보로 하여 ISAR 영상을 합성할 수 있다. HRRP 영상 합성의 비용함수와 동일한 함수를 통하여 합성 되지만 수직방

향의 위치 또한 최적화되어야 할 변수이므로 한 차원 높은 비선형 최적화 문제가 되며 다음과 같다.

$$X=\begin{bmatrix}\hat{r}_1 \hat{r}_2 \cdots \hat{r}_H \\ \hat{c}_1 \hat{c}_2 \cdots \hat{c}_H \\ \hat{s}_1 \hat{s}_2 \cdots \hat{s}_H\end{bmatrix} = \underbrace{\arg max \sum_{y=1}^{M}\sum_{x=1}^{N} \left|\overline{ISAR}_{fo}(x,y)\right| \left|\overline{ISAR}_{com}(x,y)\right|}_{X} \tag{2.26}$$

위 식에서 $\overline{ISAR}_{com}$ 및 $ISAR_{com}$은 다음과 같다.

$$\overline{ISAR_{com}}(x,y)=\frac{ISAR_{com}(x,y)}{\sqrt{\sum_{y=1}^{M}\sum_{x=1}^{N} ISAR_{com}(x,y)ISAR_{com}^{*}(x,y)}}, \tag{2.27}$$

$$ISAR_{com}=\sum_{h=1}^{H} X[3,h] \bullet ISAR_h(x-X[1,h], y-X[2,h])$$

여기서 척도 인자 $\hat{s}$는 양의 실수 값을 갖는다. H는 합성에 사용된 표적의 수이며 총 K개의 $ISAR_k$ 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 (2.26)을 비용함수로 하는 식 (2.20), (2.21)의 PSO 알고리즘을 적용한다[14].

편대비행 표적식별을 위한 ISAR 영상 합성의 경우 HRRP 합성의 경우에 비하여 한 가지 변수를 더 추정해야하므로 제안된 기법을 사용하지 않을 경우의 대수적 복잡도가 더 커지며 $K^H \times M^H \times N^H$와 같다. 여기서 M, N은 각각 수평, 수직방향의 픽셀수이다. 제안된 기법을 사용하여 ISAR 영

상을 합성한 경우의 대수적 복잡도는 HRRP 합성의 경우와 동일하며 P=8000, I=10으로 8000×10와 같다. 시뮬레이션에서 M=100, N=100으로 샘플링 하였으며 합성 가능한 경우의 수는 $13^3\times100^3\times100^3$으로 제안된 기법을 사용하지 않을 경우 매우 많은 계산시간이 소요됨을 알 수 있다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

4. 표적식별 기법

앞 절의 합성기법은 미리 학습되어 있는 단일 표적의 종류 및 편대를 구성하는 표적 수에 따라서 반복하여 실시간 데이터베이스를 구성할 수 있다. PSO 알고리즘을 통하여 최적화된 변수로 생성되는 HRRP 또는 ISAR 영상은 단 하나이므로 실시간 데이터베이스에 저장되는 표적의 $HRRP_{com}$ (또는 $ISAR_{com}$)의 총 개수 N_{tr}는 다음과 같다.

$$N_{tr} = (H_f - 1) \times N_t \tag{2.28}$$

여기서 H_f는 편대를 구성할 수 있는 최대 표적수이며 실제 편대비행중인 표적의 수는 알지 못하므로 식별을 위해 합성되는 표적의 수는 H=2,...,H_f와 같다. N_t는 합성에 사용될 수 있는 표적 종류의 가짓수이며 표적의 종류 또한 알 수 없기 때문에 학습되어 있는 모든 종류의 표적에 대하여 합성을 실시해야 한다.

1) 합성된 HRRP를 이용한 표적식별

3절에 소개된 기법을 통하여 실시간 데이터베이스가 구성되면 두 가지 분류기를 통하여 HRRP를 통한 표적식별이 수행된다. 첫 번째 방법은 표적의 HRRP로부터 고유한 특성벡터를 추출하여 표적식별을 수행하는 방법이다. 표적으로부터 유용한 특성벡터를 얻는 많은 방법들이 연구되고 있다. 본 논문에서는 관측각도에 따라 민감하게 변화하는 HRRP에 대하여 오직 1차원 분포도에 대한 통계적 특성만을 추출하는 Central

Moment(CM)기법을 이용하여 표적식별을 수행한다[16].

HRRP의 진폭 보다 전체적인 분포도로부터 특성벡터를 구성하기 위하여 정규화가 되어진 $\overline{HRRP}_{fo}$ 와 $\overline{HRRP}_{com}$에 CM 기법을 적용한다[17]. HRRP의 분포도에 따른 p차 CM은 다음 식을 통하여 계산되어진다.

$$\mu_p = \sum_{x=1}^{N} (x - a_r)^p \overline{HRRP}_{com},\ a_r = \sum_{x=1}^{N} x \times \overline{HRRP}_{com}(x) \tag{2.29}$$

위 식의 결과를 특성벡터로 하며 $\bar{f} = [\mu_1\ \mu_2 \cdots \mu_{p_{\max}}]$와 같이 정의할 수 있다. p_{max}는 특성벡터에 사용할 CM의 최대 차수를 의미한다. CM의 차수가 높을수록 CM의 값도 기하급수적으로 증가하게 되므로 각 차수의 CM이 동일한 가중치로 표적식별에 적용되기 위해서 정규화 과정이 필요하며 다음과 같다.

$$a_p = \frac{\mu_p - \mu_{\min}}{\mu_{\max} - \mu_{\min}},\ \bar{f}_n = [a_1\ a_2 \cdots a_{p_{\max}}]^T \tag{2.30}$$

여기서 μ_{max}, μ_{min}는 각각 CM중 최대, 최솟값을 뜻한다. 또한 차수가 증가할수록 중복되는 정보가 많아진다. 중복되는 정보는 분류기 적용단계에서 더 많은 시간을 요구하며 표적식별 측면에서 정확도 향상에 기여하지 않는다. 따라서 PCA (principal component analysis) 을 통하여 중복되는 정보 압축하여 더 효율적인 특성벡터를 생성할 수 있다.

PCA 기법을 적용하기에 앞서 실시간 데이터베이스를 구성하는 모든 $HRRP_{com}$으로부터 특성벡터를 추출 및 원소로 하는 특성행렬을 구성할 수 있으며 다음과 같다.

$$\overline{F}=[\overline{f}_{n,1}\ \overline{f}_{n,2}\cdots\ \overline{f}_{n,N_{tr}}] \tag{2.31}$$

특성벡터를 압축하기 위해서 위 식의 특성행렬의 원소를 이용하여 공분산 행렬을 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$R_F=\frac{1}{N_{tr}-1}\sum_{j=1}^{N_{tr}}(\overline{f}_{n,j}-\overline{m})^T(\overline{f}_{n,j}-\overline{m}),\ \overline{m}=\frac{1}{N_{tr}}\sum_{j=1}^{N_{tr}}\overline{f}_{n,j} \tag{2.32}$$

그 다음 특이값 분해를 통하여 고유치 및 고유벡터를 구할 수 있으며 $\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_{p_{\max}}(\lambda_1>\lambda_2>...>\lambda_{p_{\max}})$, $v_1,v_2,...,v_{p_{\max}}$와 같다.$l(l\le p_{\max})$번째로 큰 고유치에 해당하는 고유벡터들을 추출함으로써 PCA 변환 행렬을 얻을 수 있으며 다음과 같다.

$$P=[v_1\ v_2\ ...\ v_l] \tag{2.33}$$

변환 행렬 P를 통하여 데이터 압축을 실시 할 수 있으며 다음과 같다.

$$\overline{F}_{cr}=P\bullet\overline{F} \tag{2.34}$$

표적식별의 대상이 되는 $HRRP_{fo}$ 또한 상기과정들을 반복하여 데이터를 압축할 수 있으며 $\overline{f}_{ct}$와 같다. 압축된 특성벡터를 이용하여 표적식별이 실시되며 본 논문에서는 다음과 같이 Nearest Neighbor 구분기를 이용하여 식별이 수행된다.

$$E_j(\bar{f}_{ct}, \bar{f}_{cr,j}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{l} (\bar{f}_{ct}[i] - \bar{f}_{cr,j}[i])^2} \tag{2.35}$$

최종적으로 $E_1, E_2, ..., E_{N_{tr}}$중 가장 작은 값일 때의 특성벡터의 표적으로 식별되어진다.

두 번째 방법은 편대비행 표적들로부터 생성된 $\overline{HRRP}_{fo}$와 실시간 데이터베이스의 모든 $\overline{HRRP}_{com}$을 식 (2.16)의 상호상관을 계산한다. 계산된 값들 중 가장 큰 값을 갖는 $HRRP_{com}$을 이용하여 표적의 종류와 수를 식별한다.

2) 합성된 ISAR 영상을 이용한 표적식별

본 논문에서 ISAR 영상을 통한 표적식별은 상기 HRRP 실시간 데이터베이스의 경우와 마찬가지로 식 (2.26)을 적용하여 가장 큰 매칭점수를 갖는 $ISAR_{com}$으로 표적의 종류 및 수를 식별할 수 있다. 하지만 ISAR 영상의 특성상 표적의 초기 방향 및 이동 방향에 따라서 RCS 분포도가 회전한 형태로 투영되어진다. 이와 같이 방위각에 대한 회전에 불변(rotation invariant)하는 구분기 설계를 위하여 원래의 ISAR 영상 좌표계에서 극 좌표계(polar coordinate system)로 사상(mapping)을 수행할 수 있다[17].

레이더와 표적사이의 거리에 따라서 표적으로부터 반사된 신호의 불규칙한 진폭이 구분기에 미치는 영향은 정규화 과정을 통하여 해결할 수 있다. 따라서 극 좌표계 사상(polar mapping)에는 정규화 되어진 $\overline{ISAR}_{fo}$,

$\overline{ISAR}_{com}$가 사용된다. 원래의 ISAR 영상 좌표계와 극 좌표계는 다음과 같은 관계를 갖는다.

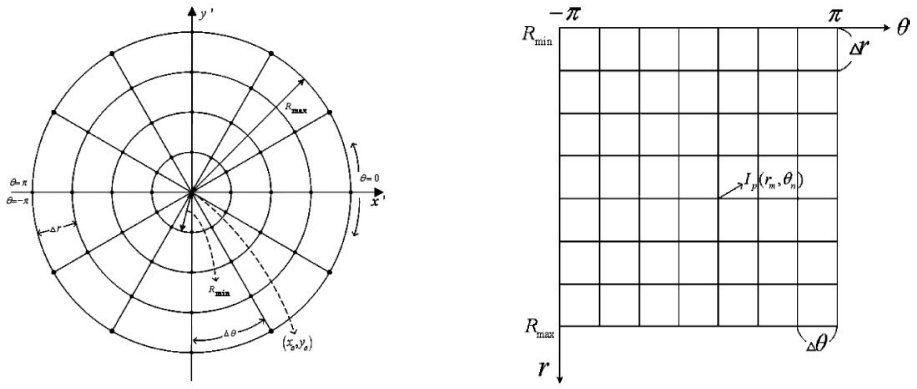
$$(x_k, y_k) = (x_c, y_c) + (r_m \cos\theta_n, r_m \sin\theta_n) \tag{2.36}$$

여기서 m=1,2,...,N_r, n=1,2,...,N_Θ, k=1,2,...,$N_r N_\Theta$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_n은 다음과 같이 정의된다.

$$r_m = R_{\min} + (m-1)\triangle r,\ \theta_n = -\pi + (n-1)\triangle\theta \tag{2.37}$$
$$\triangle r = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{N_r - 1},\ \triangle\theta = \frac{2\pi}{N_\theta - 1}$$

위 식에서 R_{max}는 [그림 2.6] (a)에서 볼 수 있듯이 $(x_c,\ y_c)$로부터 제일 바깥의 원주까지의 거리이며 ISAR 영상에 분포되어있는 표적의 점산란원들이 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}=0으로 하여 시뮬레이션 하였다.

최종적으로 r_m 및 Θ_n에 해당하는 값을 [그림 2.6] (b)와 같이 변수 r, Θ를 축으로 하는 극 좌표계로 사상시켜야 하는데 각 픽셀의 값은 원래의 ISAR 영상의 픽셀 값으로 부터 보간하여 얻을 수 있다. 본 논문에서는 간단한 선형보간을 사용하여 픽셀의 값을 결정하였다[17].



(a) 극좌표 격자 (b) 극좌표

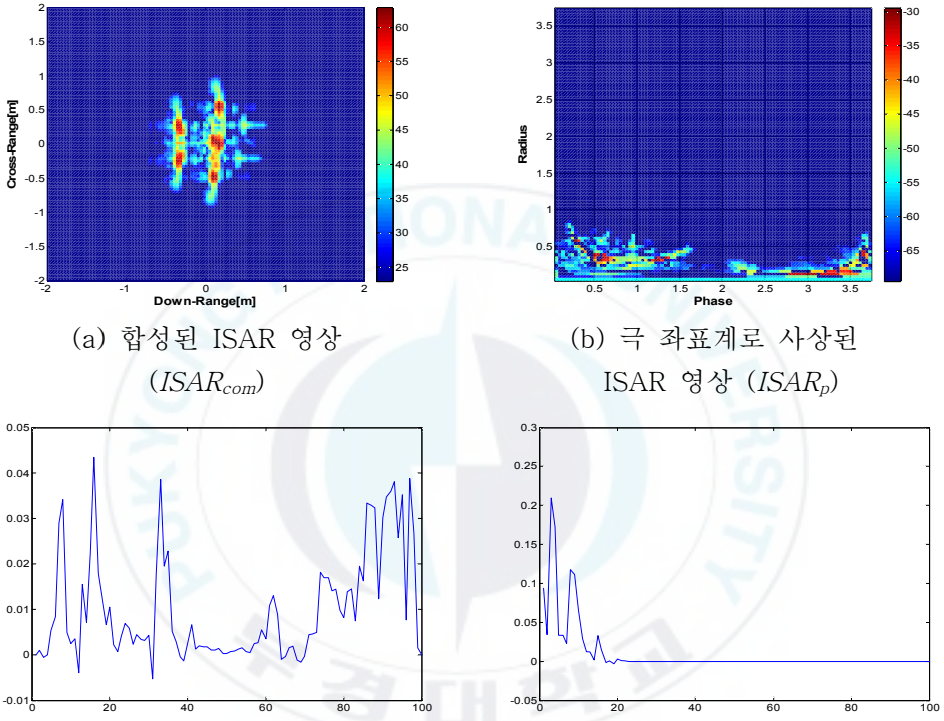
[그림 2.6] 극 좌표계 사상 원리

[그림 2.7]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 Θ방향으로 천이만 발생함을 알 수 있다. [그림 2.7]의 (c)와 (d)는 각각 r, Θ 방향으로 (b)의 극 좌표계 ISAR 영상을 투영시킨 특성벡터이며 다음 식을 통하여 계산할 수 있다[17].

$$I_r(r) = \sum_{n=1}^{N_\theta} ISAR_p(r_m, \theta_n), \qquad (2.38)$$
$$I_\theta(r) = \sum_{m=1}^{N_r} ISAR_p(r_m, \theta_n)$$

특성벡터를 이용하여 표적식별을 수행하는 경우 각각의 특성벡터의 길이만큼의 계산이 필요하지만 영상을 통해서 표적식별을 할 경우 각각의 기저샘플의 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.



(a) 합성된 ISAR 영상 ($ISAR_{com}$)

(b) 극 좌표계로 사상된 ISAR 영상 ($ISAR_p$)

(c) Θ 방향 특성벡터

(d) r 방향 특성벡터

[그림 2.7] 극 좌표계로 사상된 ISAR 영상 및 극 좌표계 기저에 따른 특성벡터

Ⅲ. 실험 결과

1. 제안된 기법을 통한 합성결과

제안된 방법의 효율성을 증명하기 위한 시뮬레이션에 사용된 표적은 포항공과대학교의 전자파 무반향실(anechoic chamber)에서 측정된 1m 크기의 전투기 모형(F-4, F-14, F-16, F-22 및 F-117)이다[그림 3.1]. 측정은 X-밴드 8.3~12.3 GHz 범위의 주파수 대역을 사용하였으며 10 MHz 간격으로 총 401개의 주파수 샘플링을 하였으며 대역폭에 따른 거리 해상도는 3.75cm이다. 또한 0°(선수방향)부터 180°(선미방향)까지 0.5° 간격으로 총 361개의 관측각도에서 표적의 점산란원들의 RCS를 측정하였다. ISAR 영상의 경우 14° 관측각도변화량을 통하여 형성되었으며 이때 작은 각도 근사 및 작은 대역폭 근사가 만족하지 않기 때문에 발생한 왜곡은 polar reformatting을 통하여 보상하였다[18].

(a) F-4

(b) F-14

(c) F-16

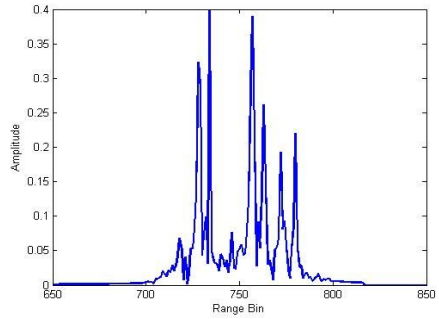
(d) F-22

(e) F-117

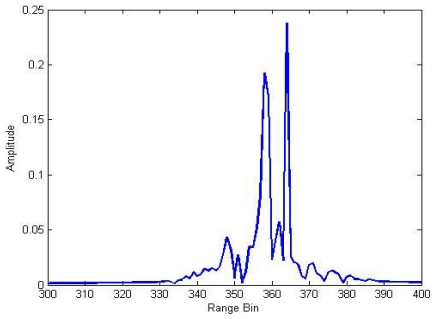
[그림 3.1] 전투기 모형

1) HRRP 합성 결과

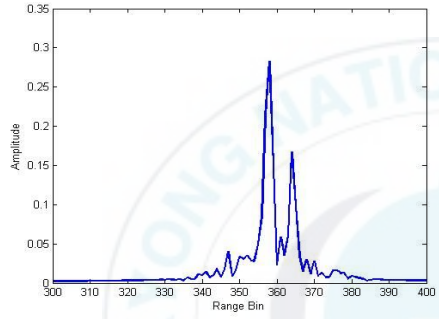
표적의 HRRP는 측정된 데이터로부터 IFFT을 수행하여 생성할 수 있다[1]. 제안된 기법의 검증을 위해 편대비행중인 표적(F-4)의 수를 3대로 가정하였다. [그림 3.2]의 (a)는 (b)~(d)의 다수 표적들의 각기 다른 움직임을 고려한 9.5°,11.5°,13°의 관측각도에서 생성된 HRRP가 서로 다른 위치에서 1.2, 1.3 및 1.6의 척도인자의 비율로 투영된 $HRRP_{for}$이며 실제 관측 상황을 가정하여 30 dB의 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio : SNR)을 갖는다. 편대비행 표적식별을 위한 HRRP합성은 각 표적의 HRRP가 투영되는 위치 추정에 좌우된다. 후보 관측각도는 11°을 중심으로 ±3°의 범위에서 0.5°간격으로 총 13개 이며 식 (2.17)을 통하여 투영 위치 후보벡터 $\overline{l_1},\overline{l_2},...,\overline{l_{13}}$을 구성할 수 있다. 각 위치벡터는 3번째로 큰 첨두치(q_k=3)를 갖는 위치까지 포함된다. 산정된 위치 후보벡터는 8000개의 개체군(population) 및 $\phi = 0.6$의 관성가중치를 갖는 식 (2.20), (2.21)의 PSO 알고리즘에 적용하여 10번의 반복을 통해 1에 가까운 매칭 점수로 최적화되어지며 [그림 3.2]의 (e)와 같다. 그 결과 $HRRP_{for}$와 동일한 $HRRP_{com}$을 합성할 수 있었다.



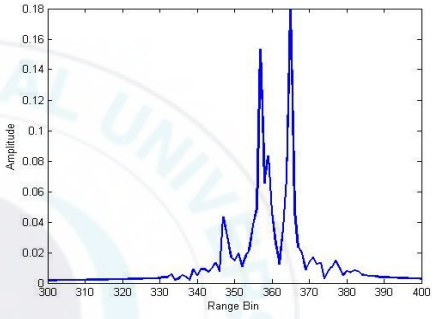
(a) 편대비행 표적들의 $HRRP_{for}$



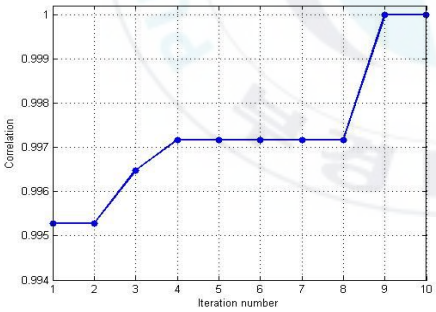
(b) 9.5° 에서의 HRRP



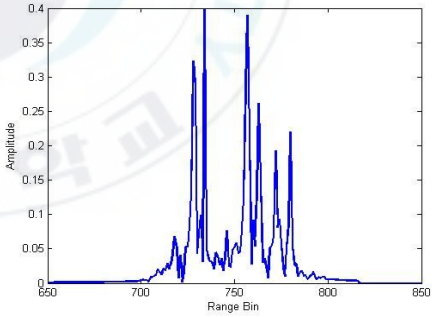
(c) 11.5° 에서의 HRRP



(d) 13° 에서의 HRRP



(e) PSO 진화곡선

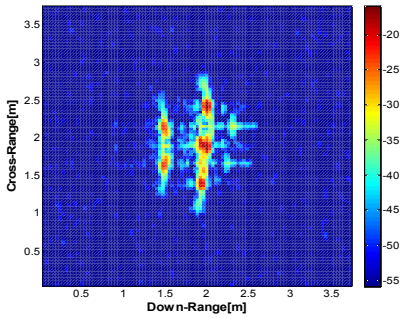


(f) 제안된 기법으로 합성된 $HRRP_{com}$

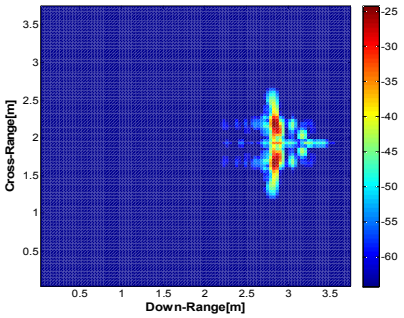
[그림 3.2] HRRP 합성결과

) ISAR 영상 합성 결과

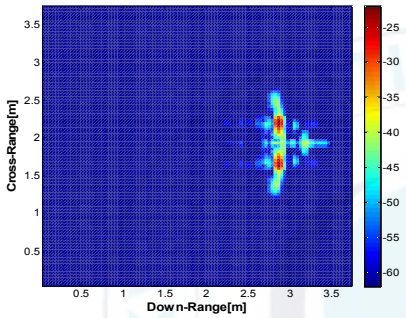
ISAR 영상은 수직한 축의 해상도를 위하여 중심관측각도를 기준으로 총 14° 의 관측각도에 대한 데이터를 통하여 생성되었으며 작은 각도 근사가 적용되지 않으므로 range migration[18]이 발생한다. 이를 제거하기 위하여 2차원 주파수 영역에서 polar reformatting[18]을 수행하였다. 시뮬레이션에서 편대비행중인 표적(F-16)의 수를 3대로 가정하였으며 [그림 3.3]의 (b)~(d)와 같이 각각 5°,8°,9° 을 중심관측각도로 한다. $ISAR_{for}$는 10dB의 SNR 환경에서 상기 각각의 표적이 척도인자 1.2, 2, 1.6의 비율로 영상 투영면위의 임의의 위치에 투영되어 생성되었으며 [그림 3.3]의 (a)와 같다. ISAR 영상합성을 위하여 관측된 각도는 8° 을 중심으로 ±3° 의 범위로 가정하였으며 0.5° 간격으로 각각을 중심 관측각도로 하는 총 13개의 단일 ISAR 영상이 합성에 사용되었다. ISAR 영상이 투영되는 위치 추정을 위하여 식 (2.24)의 템플릿 매칭을 실시하였으며 그 결과는 [그림 3.4]와 같다. 템플릿 매칭 결과를 근거로 투영위치 후보 산정 및 계산부담을 줄이기 위하여 식 (2.25)의 a는 0.9로 설정하여 시뮬레이션 하였다. PSO 알고리즘은 HRRP 합성 시 적용된 조건과 동일하게 하여 최적화 되었으며 진화곡선은 [그림 3.3]의 (e)와 같다. 시뮬레이션 결과 [그림 3.3]의 (f)와 같이 $ISAR_{for}$와 같은 $ISAR_{com}$을 합성할 수 있었다. 하지만 최적화 된 합성결과와 $ISAR_{for}$의 매칭 점수는 0.9855임을 확인할 수 있는데 이것은 다소 높은 SNR로 인해 매칭 점수가 감소되었음을 뜻하며 초기 0.955의 매칭 점수와 0.03의 작은 점수 차이는 매우 많은 국부 최소치를 피하기 위한 비교적 많은 수의 개체군 사용에 기인한다.



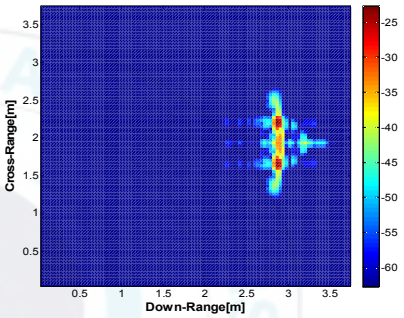
(a) 편대비행 표적들의 $ISAR_{for}$



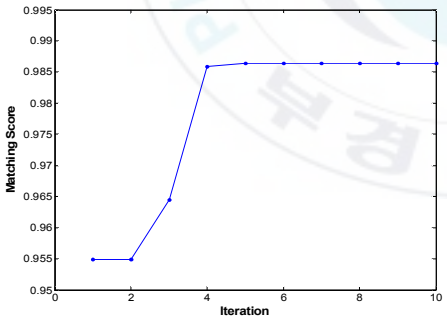
(b) 5° 에서의 ISAR



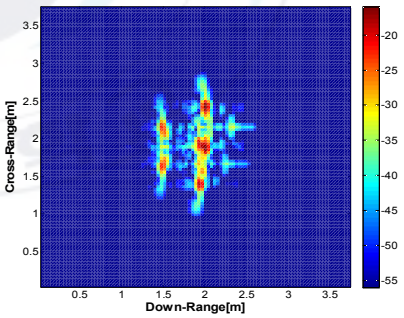
(c) 8° 에서의 ISAR



(d) 9° 에서의 ISAR

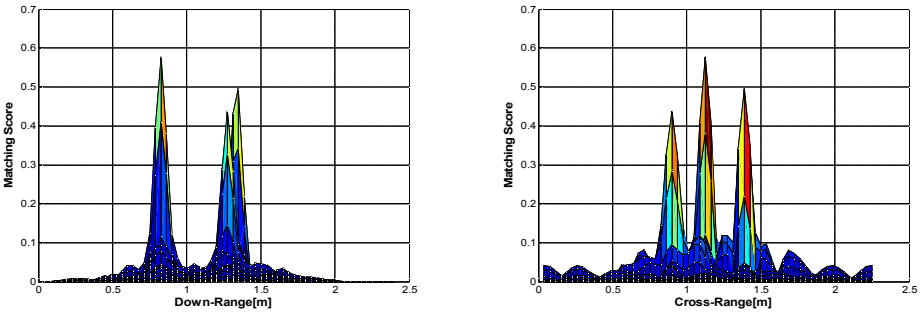


(e) PSO 진화곡선



(f) 제안된 기법으로 합성된 $ISAR_{com}$

[그림 3.3] ISAR 영상 합성결과



(a) 매칭 점수(거리방향) (b) 매칭 점수(수직방향)

[그림 3.4] 템플릿 매칭 점수

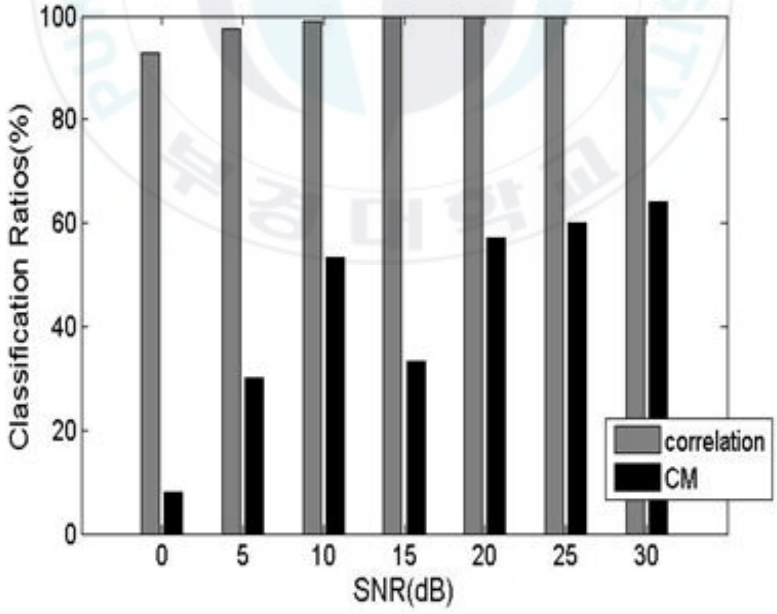
PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

2. 구분 결과

구분결과를 위한 실험은 SNR = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30dB 환경에서 수행되었다. 또한 편대비행 중 표적의수는 $2 \leq H \leq 5$의 범위 내에서 임의로 선택되었으며 표적의 진행방향은 $0° \leq \Theta_d \leq 180°$, 척도 인자는 $1 \leq s_h \leq 2$ 범위에서 임의로 선택되었다. HRRP의 경우 각 표적들이 투영되는 위치 l_h는 HRRP의 총 샘플의 범위 $1 \leq l_h \leq 401$중 임의로 선택되었다. 또한 ISAR 영상의 영상투영면의 수평 및 수직 샘플은 각각 M=100, N=100으로 샘플링하였으며 각각 $1 \leq r_h \leq 100$, $1 \leq c_h \leq 100$의 범위에서 임의의 위치로 각각의 단일표적이 투영된다. AWGN (Additive White Gaussian Noise)에 기인한 측정오차를 줄이기 위하여 시뮬레이션은 각 SNR 환경에서 100번 반복 실시되었다.

1) 합성된 HRRP을 이용한 편대비행 표적식별 결과

합성된 HRRP을 이용한 편대비행 표적식별 결과는 [그림 3.5]와 같다. 상호상관을 이용하여 표적식별을 한 결과 SNR이 15dB 이상이 되는 환경에서는 100%로 편대비행 식별에 모두 성공하였으며 0dB일 때 93%의 식별확률로 가장 낮았다. confusion matrix를 구성하여 오차요인을 분석한 결과 해당 표적의 종류는 식별하였지만 잡음의 영향으로 인하여 표적의 수를 정확히 식별하지 못하였음을 알 수 있었다. 반면 CM 구분기를 사용하여 식별한 결과 70%이하의 낮은 식별확률을 보였다. 이것은 표적의 종류 및 수가 다를 경우에도 PSO 알고리즘을 이용하여 각각의 변수들을 미확인 편대비행 표적의 HRRP와 유사하게 최적화하여 전체적인 HRRP의 분포도에

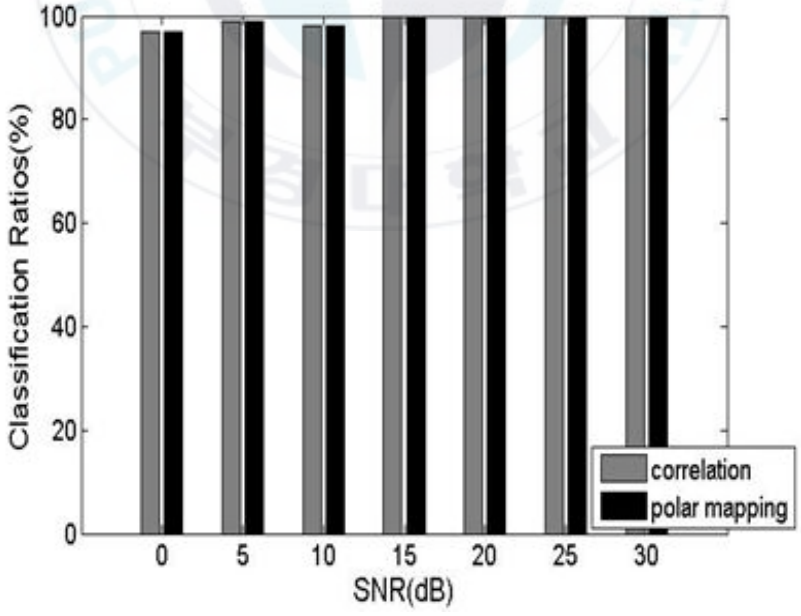


[그림 3.5] 합성된 HRRP를 이용한 식별결과

기인한 CM 구분기의 특징벡터가 유사하게 형성되었기 때문이라고 사료된다.

2) 합성된 ISAR 영상을 이용한 편대비행 표적식별 결과

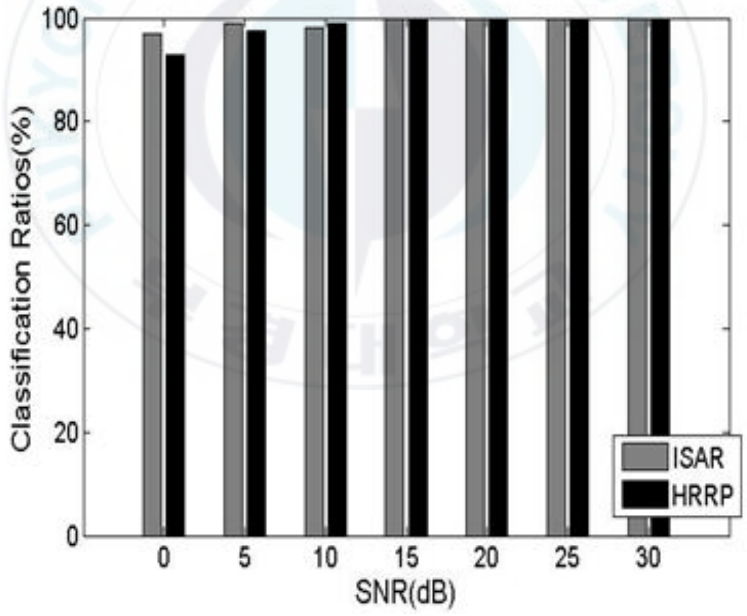
[그림 3.6]은 합성된 ISAR 영상을 이용하여 편대비행 표적을 식별한 결과이다. 합성된 HRRP를 이용하여 표적식별을 수행한 결과와 동일하게 상호상관을 이용하여 구분기를 형성한 경우 SNR이 15dB 이상일 때 100% 확률로 표적식별이 수행되었으며 0dB에서 97%의 식별확률로 HRRP의 경우보다 4%, 5dB에서 2% 높은 식별결과를 보였다. 마찬가지로 confusion matrix를 구성하여 식별실패요인에 대하여 분석한 결과 표적의 수를 정확



[그림 3.6] 합성된 ISAR 영상을 이용한 식별결과

히 식별하지 못하였다. 극 좌표계로 ISAR 영상을 사상하여 표적식별을 수행한 결과 상호상관을 이용하여 식별한 결과와 동일하였다.

[그림 3.7]은 합성된 HRRP 및 ISAR 영상을 이용한 식별결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 ISAR 영상을 이용하여 편대비행 표적식별을 한 경우에 비교적 높은 식별확률을 보였다. 하지만 ISAR 영상 합성 시 HRRP의 경우와 비교하여 위치 후보 변수가 하나 더 많기 때문에 표적의 수가 증가함에 비례하여 변수도 증가하므로 식별에 소요되는 계산 시간측면에서 합성된 HRRP을 이용하여 표적식별을 수행하는 것이 유리하다.



[그림 3.7] 합성된 HRRP 및 ISAR 영상을 이용한 식별결과

Ⅳ. 결 론

본 연구에서 레이더를 이용한 효과적인 편대비행 표적식별을 위하여 기존의 편대비행 표적의 HRRP 및 ISAR 영상으로부터 각각의 표적의 HRRP 및 ISAR 영상을 추출하여 표적식별을 수행하는 기법을 사용하는 대신 단일 표적의 HRRP 및 ISAR 영상을 합성하여 편대비행 표적식별을 수행하는 기법을 제안하였다. HRRP 및 ISAR 영상의 합성은 추적레이더를 통하여 관측된 후보 관측각도에 해당하는 HRRP 및 ISAR 영상, 레이더 빔의 분산을 고려한 척도인자, LOS위에 투영될 위치 및 영상투영면에 투영되는 위치를 변수로 하는 비선형문제를 최적화하여 수행되었다. 경우의 수가 가장 많은 투영위치는 각각 상관관계 및 템플릿 매칭을 통하여 후보가 산정되었으며 PSO 알고리즘을 통하여 각각의 변수를 최적화하여 미확인 편대비행 표적의 HRRP 및 ISAR 영상과 동일하게 합성할 수 있었다. 상기 과정을 표적의 종류 및 표적의 수에 따라서 반복하여 실시간 데이터베이스를 구성하여 표적식별이 수행된다.

편대비행 표적식별에 사용되는 구분기는 HRRP의 경우 상관관계 및 CM을 통하여 수행되며, ISAR 영상의 경우 상관관계 및 극 좌표계 사상을 통하여 수행된다. 합성된 HRRP을 이용하여 상관관계를 통하여 식별 시뮬레이션을 수행한 결과 낮은 SNR 환경에서도 93%이상의 높은 식별 확률을 보였다. 반면 CM 구분기를 사용하여 식별한 결과 30dB의 높은 SNR 환경에서도 70%이하의 낮은 식별확률을 보였다. ISAR 영상을 이용한 경우 상관관계 및 극 좌표계 사상을 사용하여 식별한 결과 0dB의 SNR 환경에서도 97% 이상의 높은 구분결과를 얻을 수 있었다.

본 연구자는 향후 HRRP 및 ISAR 영상을 통한 편대비행 표적식별을 위하여 더 많은 종류의 구분기를 적용하여 식별확률을 개선할 예정이며 합성에 소요되는 시간 측면에서 유리한 HRRP 구분기와 유용한 특징벡터를 보유한 ISAR 영상 구분기를 융합하여 전시에 실시간으로 가장 효율적이며 정확한 표적식별이 수행될 수 있도록 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

참고문헌

[1] B.R. Mahafza, “Radar System Analysis and Design using MATLAB,” Champman & Hall/CRC, Chapter 2, pp. 87-130, Jan. 2000.

[2] L. C. Potter, D.-M. Chiang, R. Carrière, and Michael J. Gerry, “ GTDBased Parametric Model for Radar Scattering,″ *IEEE Trans.* 0 ɳ *Antennas and Propagation,* Vol. 43, No. 10, October 1995.

[3] C. Ozdemir, “Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithm,” John Wiley & Sons, Inc., Chapter 8, pp.299-344, Feb. 2012.

[4] N. Levanon and E. Mozeson, “Radar Signals,” John Wiley & Sons, Inc., Chapter 2-3, pp.20-52, Jun. 2004.

[5] 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.

[6] 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.

[7] S. H. Park, K. K. Park, J. H. Jung, and H. T. Kim, “ISAR imaging of multiple targets using edge detection and Hough transform,” *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 22, no. 2/3, pp. 365 - 373, 2008.

[8] V. C. Chen and Z. Z. Lu, “Radar imaging of multiple moving

targets," *Proc. SPIE*, vol. 3161, pp. 102 - 112, Sep. 2004.

[9] 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.

[10] 김민, 강기봉, 정주호, 김경태, 박상홍, "편대비행 표적식별을 위한 효과적인 ISAR 영상 합성 방법", 한국전자파학회논문지, 27(8), pp. 758-765, 2016년 8월.

[11] S. Gogineni and A. Nehorai, "Monopulse MIMO radar for target tracking," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 755-768, Jan. 2011.

[12] S.H. Park, J.H. Lee and K.T. Kim, "Performance analysis of the scenario-based construction method for real tearget ISAR recognition," *Progress In Electromagnetics Research,* Vol. 128, pp. 137-151, 2012.

[13] Kyung-Tae Kim, Dong-Kyu Seo, and Hyo-Tae Kim "Efficient Classification of ISAR Images", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation,* Vol. 53, no 5, pp 1611-1621, May. 2005

[14] J. Kennedy and R. C. Eberhart, *Swarm Intelligence*, Academic Press, 2001.

[15] S. Theodoridis, *"Pattern Recognition",* Academic press, Chapter 8, pp. 321-351, 2008.

[16] S. Luo and S. Li, "Automatic target recognition of radar HRRP based on high order central moments features," *Jounal of Electronics(China)*, vol. 26, no. 2, pp. 184-190, Mar. 2009.

[17] K. T. Kim, D. K. Seo, and H. T. Kim, “Efficient radar target recognition using the MUSIC algorithm and invariant features,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 50, pp. 325-337, Mar. 2002.

[18] Dean L. Mensa, *“High Resolution Radar Cross-Section Imaging”,* Artech House, pp. 139-199, 1991

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

부 록

[게제 논문]

논문제목 (Paper Title)	논문 발표일 (Date)	논문지명 (Journal Title)	논문지 구분[1]	저자 구분[2]
편대비행 표적식별을 위한 효과적인 ISAR 영상 합성 방법	2016.8	Journal of KIEES	학진 등재지	제1저자
풍력발전단지에 의한 레이다 차폐 현상 및 도플러 측정 데이터 분석	2016.08	Journal of KIEES	학진 등재지	제1저자
효율적인 헬리콥터 블레이드 분리 및 주요 파라미터 추정 기법	2016.08	Journal of KIIT	학진 등재지	제2저자
산악지형 풍력발전단지에 의한 추적레이더 정확도 영향 분석	2016.03	Journal of KIIT	학진 등재지	제2저자
산악지형에 설치된 풍력발전단지에 의한 도플러 주파수 추출 및 분석	2015.11	Journal of KOSMES	학진 등재지	제2저자

[학술 학회]

논문제목 (Paper Title)	발표일 (Date)	학술회명 (Conference Title)
ISAR 영상을 이용한 효과적인 편대비행 표적식별 기법 연구	2016.11	한국전자파학회 전파 및 광파기술 학술대회
다중표적 식별을 위한 ISAR 영상 합성 기법 연구	2016.06	한국전자파학회 하계 종합학술대회
Efficient Combination of Range Profiles for the Recognition of Multiple Targets	2016.01	International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC 2016)
풍력발전단지에 의한 레이더 차폐 현상 분석 및 도플러 측정 데이터 분석	2015.08	한국전자파학회 하계 종합학술대회

감사의 글

많이 부족한 제가 대학원 졸업과 더불어 지난하게 끌어왔던 논문이 결실을 맺어 한 권의 책으로 나오게 되어 더할 나위 없이 기쁜 마음입니다. 연구실에서 짧지만 긴 4년의 시간을 통하여 우유부단한 저를 지식과 지혜로써 저의 주체성을 다져주었기 때문이라 생각하며 저의 식견을 넓혀 주시고 여기까지 이끌어 주신 많은 분들에게 감사의 인사를 드리려 합니다.

먼저, 많은 배움의 기회뿐 아니라 지식과 상대방에 대한 배려, 마음가짐 등을 토대로 제 스스로 판단할 수 있는 선구안을 길러주신 박상홍 교수님께 감사의 인사를 드립니다. 교수님께서 베풀어주신 은혜 잊지 않겠습니다.

아직 많이 부족한 저를 진심어린 믿음으로 신뢰라는 단어를 몸소 가르쳐 주시며 견문을 넓힐 수 있도록 많은 경험을 하게 해주신 정주호 교수님 감사합니다.

학문에 정진할 수 있도록 많은 도움을 주신 학과 교수님들께도 감사의 인사를 드립니다. 항상 연구뿐만 아니라 인생을 살아가는 조언을 따스하게 해주신 이원창 교수님, 수준 높은 강의로 가르침을 베풀어 주신 임창헌 교수님, 친절하시며 먼저 관심을 가져주시며 좋은 말씀을 많이 나누어 주신 주문갑 교수님 감사합니다.

곁에서 철없는 푸념을 묵묵히 들어주며 격려해주신 분들께도 감사의 인사를 드립니다. 먼저 항상 서로가 서로에게 의지하며 누구보다 힘이 되어주고 응원해준 우람, 원석, 영빈, 주교, 성용, 경수, 준식, 호영, 성환아 고맙다! 그리고 항상 바보같이 웃으며 열심히 사는 민석, 희열이형, 오랜만에 만나도 항상 편한 승현이형, 항상 밝고 세심한 나형이에게 항상 고맙고 감

사한 마음을 전합니다.

동고동락하며 의기투합한 ESAL 연구실 친구들에게도 감사함을 전합니다. 서로 의지하며 많은 추억을 공유한 기봉이, 착하고 노력하는 상빈이, 잘생긴 석현이, 과묵한 세원이, 우리 연구실 일꾼 병록이, 분위기 메이커 예주, 미소천사 민규, 게임만큼 공부도 잘하는 한솔이, 자칭 윤두준 석호, 귀여운 막내 채빈아 앞으로 더 열심히 하고 좋은 추억 많이 쌓자! 또한 항상 도움만 받아서 너무 죄송스러운 인오선배, 마찬가지로 항상 친절하게 가르쳐주신 병수선배, 까칠한 형이랑 다닌다고 고생하는 영훈이, 커피중독자 지수, 착하고 똑똑한 호연이, 여유로운 동주, 항상 따듯한 옆자리를 만들어준 영지에게도 감사의 인사를 전합니다.

마지막으로 오랫동안 고생하시며 말썽쟁이 아들, 딸 밝게 키워주신 어머니, 멀리서 지켜보고 계신 아버지께 이 자리를 빌어서 감사의 인사를 드립니다. 어머니, 아버지 사랑합니다.

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

2017. 02. 24

김 민