



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 HRRP를
이용한 편대비행 표적식별 연구



2019년 2월

부경대학교 대학원

전자공학과

황석현

공 학 석 사 학 위 논 문

모노스테틱/바이스테틱 HRRP를
이용한 편대비행 표적식별 연구

지도교수 박 상 홍

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2019년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 자 공 학 과

황 석 현

황석현의 공학석사 학위논문
인준함.

2019년 2월 22일



주 심 공학박사 임 창 현 (인)

위 원 공학박사 이 원 창 (인)

위 원 공학박사 박 상 홍 (인)

목 차

Abstract	iii
제1장 서론	1
제2장 본론	3
2.1 레이더 반사 신호 구성	3
2.1.가 모노스태틱 HRRP 신호 모델	3
2.1.나 바이스태틱 HRRP 신호 모델	6
2.2 편대비행 표적 식별 문제의 특징	9
2.3 편대 비행 표적 식별을 위해 제안된 합성 기법	12
2.3.가 HRRP를 이용한 편대비행 대수추정	12
2.3.나 HRRP 합성 기법	17
2.4 합성된 HRRP를 이용한 표적식별 기법	21
제3장 실험 결과	22
3.1 제안된 기법을 통한 HRRP합성결과	22
3.2 표적식별 구분 결과	28
제4장 결론	29
참고문헌	30
부록	33

그림 목차

[그림 2.1] 점산란원 Boeing737 모델 및 Boeing737의 HRRP	5
[그림 2.2] 바이스태틱 기하구조	6
[그림 2.3] 편대비행 표적식별을 위한 합성기법	11
[그림 2.4] 대수추정 알고리즘	16
[그림 3.1] 전투기 점산란원 모델	23
[그림 3.2] 편대비행 대수추정 결과	25
[그림 3.3] SNR에 따른 표적대수 추정결과	26
[그림 3.4] HRRP 합성결과	27
[그림 3.5] 합성된 HRRP를 이용한 식별결과	28

Recognition of Targets Flying in Formation Using Monostatic/Bistatic HRRPs

Seok-hyun Hwang

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

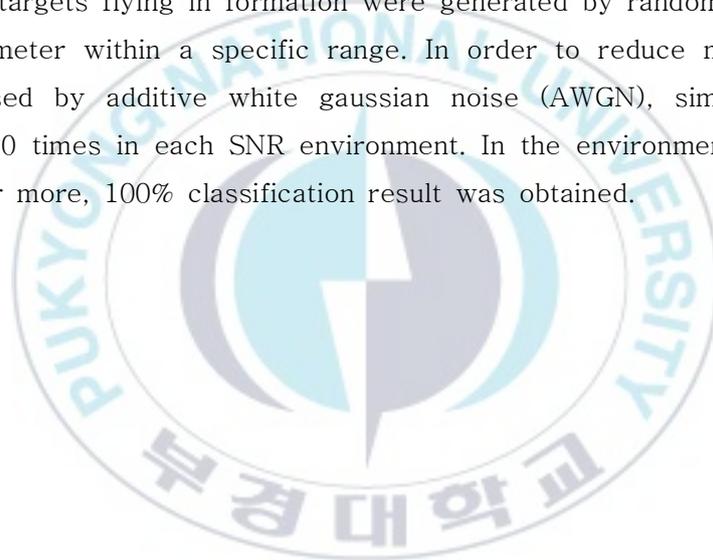
Abstract

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

This paper proposes an algorithm that can estimate the number of formation flight using monostatic and bistatic high resolution range profiles (HRRPs). Using the RELAX Algorithm, single and multiple targets are distinguished and HRRPs are reconstructed. In addition, the MUSIC Algorithm and CFAR detector are applied to obtain distinct scatterers of each target of the multiple targets. In order to overcome the limitations of the monostatic radar vulnerable to targets flying in the line-of-sight

direction, the data from the bistatic radar were fused so the number of targets were successfully estimated regardless of the signal-to-noise ratio variation. And HRRPs 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.

Experimental results were obtained at SNR = 10, 15, 20, 25, 30dB. HRRPs 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 50 times in each SNR environment. In the environment with SNR of 10dB or more, 100% classification result was obtained.



I. 서론

레이더를 이용한 표적식별에 사용되는 가장 기본적인 신호로 High Resolution Range Profile(HRRP)이 있다. HRRP는 레이더 Line of Sight(LOS)방향에서의 표적의 일차원 분포도이다. 편대비행 표적에 대한 HRRP 영상은 단일표적의 HRRP 영상이 겹쳐진 형태로 나타나게 된다. 레이더 LOS방향과 완전히 수직인 배치일 때 한대와 유사한 HRRP 영상이 나오게 되고, 이를 해결하게 위해서 한 대의 송/수신기만을 사용한 모노스태틱(Monostatic) 레이더와 두 대의 송/수신기를 사용한 바이스태틱(Bistatic) 레이더를 사용할 수 있다[9], [10].

대부분 HRRP를 이용한 표적식별의 경우, 단일 표적에 대한 연구가 대부분이다. 하지만 일반적인 경우 표적은 편대비행하며, 이 경우 단일 표적의 레이더 영상들이 겹쳐진 형태로 생성된다. 미리 학습된 데이터로 이를 식별하기 위해 표적들의 종류, 표적들의 수, 표적간의 거리, 표적들과 레이더 사이의 각도 등 모든 정보를 고려한 학습 데이터를 구축하는 것은 매우 방대한 양의 학습데이터를 요구하고 현실적으로 이는 불가능하다. 따라서 편대비행 표적식별은 단일 표적에 대한 영상을 합성하거나 혹은 다중 표적에 대한 영상에서 단일표적 영상으로 분리해 다중표적에 대한 식별을 하게 된다. 다중표적 식별은 단순 단일표적에 대한 식별과 달리 많은 시간이 걸리고 또한 데이터양이 방대하여 구분 성능이 저하될 수 있다. 따라서 다중표적의 대수를 추정하여 계산 시간을 절약하고 구분 성능을 개선하는 기법들의 개발이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 편대비행중인 표적들을 식별하기 위하여

HRRP에서 각 표적들을 분리하는 방법을 사용하지 않고, 기존에 학습되어 있던 표적들의 HRRP들과 대표적인 스펙트럼 추정 기법인 RELAX(Relaxation) Algorithm 및 MUSIC(Multiple Signal Classification)을 이용하여 표적의 대수를 추정 후, 합성하여 표적식별을 수행하였다. 2장에서는 편대비행 표적식별을 위하여 제안된 합성 기법들에 대해 서술한다. 2장 1절에서는 표적으로부터 반사되어 수신된 레이더 신호를 산란점 모델링을 통하여 HRRP를 구성하는 방법을 서술한다. 2장 2절에서는 편대비행 표적들의 HRRP로부터 표적들을 분리시키는 기법을 이용하는 대신 표적들을 합성시키는 기법을 사용해야 하는 편대비행 표적 식별 문제의 특징에 대하여 서술한다. 2장 3절에서는 먼저 HRRP를 이용하여 표적의 수를 추정하는데 사용되는 RELAX, MUSIC, CFAR Detector를 소개한 후 여러 가지 변수로 구성된 비선형 합성문제의 최적화에 적용되는 PSO (particle swarm optimization) 알고리즘에 대하여 설명한다. 2장 4절에서는 편대비행 표적식별을 위해 합성된 HRRP를 이용하여 표적식별하기 위해 적용된 기법들에 대하여 기술한다. 3장에서는 기동 시나리오를 바탕으로 구성된 단일표적 HRRP 영상 데이터베이스를 사용한 점산란원으로 구성된 배행표적(F-18, F-14, Su35, Rafal) 4종류의 데이터에 대하여, 제안된 기법을 적용한 편대비행 표적식별 실험 결과를 통하여 효용성을 검증한다. 마지막 4장에서는 제안된 기법들에 대한 결론을 간략하게 기술한다.

II. 본론

1. 레이더 반사 신호 구성

가. 모노스태틱 HRRP 신호 모델

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 N 개의 산란점으로 구성된 표적으로부터 반사된 주파수에 따른 수신신호는 다음과 같이 근사 될 수 있다[3].

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

여기서 c 는 빛의 속도, k 는 파수(wave number), A_n 는 n 번째 점산란원의 복소 RCS값, x_n 는 n 번째 점산란원의 레이더 시선방향 따른 표적과 점산란원 사이의 거리이다.

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

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

위 식의 적분연산과 덧셈연산은 선형적이므로 교환법칙이 성립한다.

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

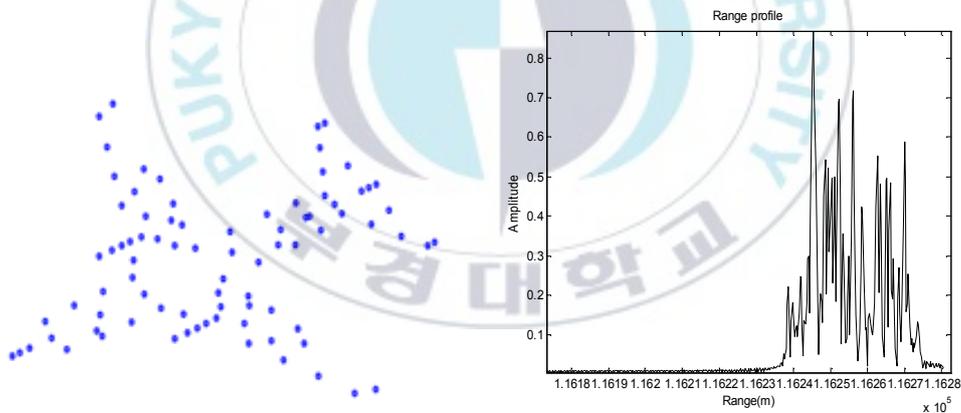
여기서 $\delta(x-x_n)$ 는 임펄스함수를 뜻하며 식 (2.3)의 HRRP에서 n 번째 점산란원의 RCS값 A_n 가 x_n 의 위치에서 정확히 분리되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 주파수 대역폭이 무한하다는 가정 하에서 성립한다. 하지만 실제 레이더 운용 시 주파수대역은 제한되어 있으므로 식 (2.3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

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



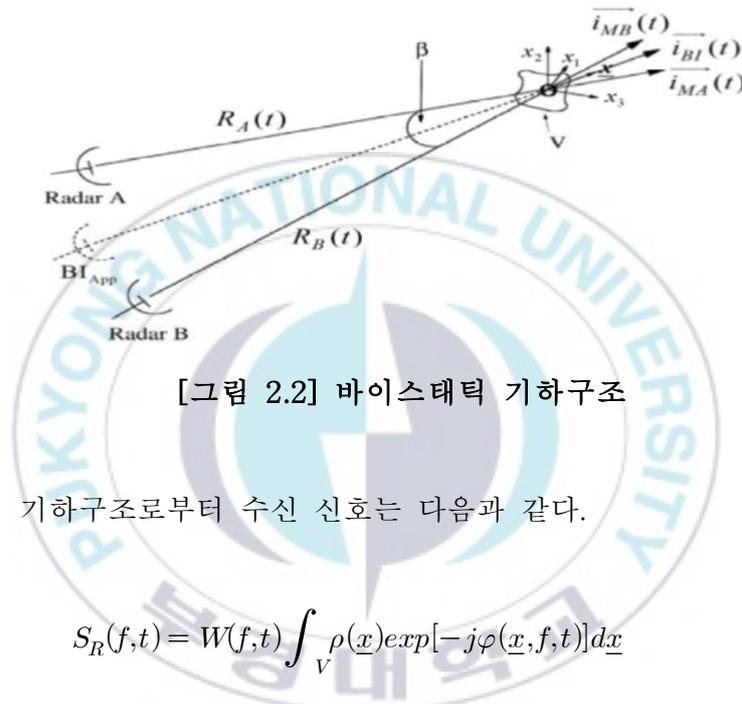
(a) Boeing 737

(b) HRRP

[그림 2.1] 점산란원 Boeing737 모델 및 Boeing737의 HRRP

나. 바이스테틱 HRRP 신호 모델

바이스테틱 HRRP 영상 기하구조는 다음과 같다. 그림 내 는 송신기 및 수신기와 표적이 이루는 각도를 나타낸다[4].



[그림 2.2] 바이스테틱 기하구조

바이스테틱 기하구조로부터 수신 신호는 다음과 같다.

$$S_R(f,t) = W(f,t) \int_V \rho(\underline{x}) \exp[-j\varphi(\underline{x},f,t)] d\underline{x} \quad (2.6)$$

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

위 식 (2.6)에서 $\rho(\underline{x})$ 는 반사된 신호의 함수, $\varphi(\cdot)$ 는 위상, \underline{x} 는 (x_1, x_2, x_3) 좌 표계를 기준으로 하는 표적 내 산란점들의 위치벡터, f_0 는 중심주파수, B 는 대역폭, T_{obs} 는 관측시간, $\text{rect}(\cdot)$ 는 사각함수이다. 여기서 위상함수는 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned}\varphi_{BI}(\underline{x},t) &= \frac{(\varphi_{MA}(\underline{x},t) + \varphi_{MB}(\underline{x},t))}{2} \\ &= \frac{4\pi f}{c} [R(t) + K(t)\underline{x} \cdot \overrightarrow{i_{BI}}(t)]\end{aligned}\quad (2.7)$$

여기서 $\varphi_{MA}(\underline{x},t)$ 는 레이더 A가 모노스테틱 기하구조 내 수신하는 신호의 위상함수, $\varphi_{MB}(\underline{x},t)$ 는 레이더 B가 모노스테틱 기하구조 내 수신하는 신호의 위상 함수를 나타내며 다음 식 (2.8), (2.9)와 같이 정의 한다.

$$\varphi_{MA}(\underline{x},t) = \frac{4\pi f}{c} [R_A(t) + \underline{x} \cdot \overrightarrow{i_{MA}}(t)] \quad (2.8)$$

$$\varphi_{MB}(\underline{x},t) = \frac{4\pi f}{c} [R_B(t) + \underline{x} \cdot \overrightarrow{i_{MB}}(t)] \quad (2.9)$$

위 식에서 \cdot 는 벡터간의 내적 연산자, c 는 빛의 속도, $R_A(t), R_B(t)$ 는 표적과 레이더 A,B 사이의 거리, $\overrightarrow{i_{MA}}(t), \overrightarrow{i_{MB}}(t)$ 는 레이더 A,B의 LOS 방향의 단위 벡터이다.

$$\text{식 (2.7)에서 } K(t) = \left| \frac{\overrightarrow{i_{MA}}(t) + \overrightarrow{i_{MB}}(t)}{2} \right| = \cos \frac{\beta(t)}{2}, \quad \overrightarrow{i_{BI}}(t) = \frac{\overrightarrow{i_{MA}}(t) + \overrightarrow{i_{MB}}(t)}{|\overrightarrow{i_{MA}}(t) + \overrightarrow{i_{MB}}(t)|}$$

바이스테틱 레이더의 LOS 방향의 단위벡터, $R(t) = \frac{R_A(t) + R_B(t)}{2}$ 다. 요동보상을 통한 $R(t)$ 성분 제거와 이상적인 점 산란원을 가정하면 식 (2.7)은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\begin{aligned}\varphi_{BI}(x_{10}, x_{20}, x_{30}, f, t) &= \varphi_{BI}(x_{10}, x_{20}, f, t) \\ &= \frac{4\pi f}{c} [K(t)(x_{10} \sin \Omega t + x_{20} \cos \Omega t)]\end{aligned}\quad (2.10)$$

x_{10}, x_{20}, x_{30} 은 x 의 좌표, Ω 는 f 에 대응하는 각주파수이다.

여기서 $K(t)$ 는 테일러 급수 전개를 이용해 1차 다항식의 형태로 근사 할 수 있으며 이는 식 (2.11)과 같다.

$$\begin{aligned} K(t) &\approx K(0) + K'(0)t \\ &= \cos\left[\frac{\beta(0)}{2}\right] - \frac{\beta'(0)}{2} \sin\left[\frac{\beta(0)}{2}\right]t = K_0 + K_1t \end{aligned} \quad (2.11)$$

식 (2.11)을 식 (2.10)에 이용해 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{BI}(x_{10}, x_{20}, t) &\approx \frac{4\pi f}{c} [(K_0 + K_1t)\Omega t x_{10}] \\ &\quad + \frac{4\pi f}{c} [(K_0 + K_1t)x_{20}] \end{aligned} \quad (2.12)$$

HRRP는 위상함수 식 (2.12)를 식 (2.6)에 대입한 수신 신호에 거리 방향 축으로 역 푸리에 변환을 통해서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} S_R'(\tau, t) &= A \int_{-\infty}^{\infty} W(f, t) \exp[-j\phi(x_{10}, x_{20}, f, t) + j2\pi f\tau] df \\ &= AB \text{sinc} B\left(\tau - \frac{2}{c}[K_0 x_{20} + \delta r(t)]\right) \times \exp(j2\pi f_0 \tau) \\ &\quad \times \text{rect}\left(\frac{t}{T_{obs}}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi f_0}{c} [K_0 + K_1t][x_{10}\Omega t + x_{20}]\right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

2. 편대비행 표적식별 문제의 특징

HRRP는 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 HRRP로부터 각각의 표적들을 분리하는 많은 방법들이 제안되어왔다[15-18]. 하지만 표적의 수를 정확히 알지 못하며 각각의 표적의 서로 다른 속도, 가속도 및 JEM(Jet Engine Modulation)등의 영향으로 인한 위상왜곡 때문에 HRRP에서 각각의 표적을 분리하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 단일 표적의 HRRP를 합성하여 표적식별을 수행하는 방법을 제안한다.

표적식별 편대비행 식별을 위한 합성기법은 표적의 수, 위치, 척도인자(scaling factor) 및 관측각도를 변수로 하는 비선형문제를 최적화하여 수행된다. 하지만 HRRP는 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 편대비행 표적 식별 시 가장 많은 시간이 소요되는 표적의 수를 최적화된 알고리즘으로 추정된 후 단일 표적의 HRRP를 상호상관(cross correlation)을 비용함수(cost function)로 하는 PSO (Particle Swarm Optimization)을 통하여 표적들 각각의 위치 및 척도인자

를 최적화하여 HRRP를 합성한다. 상기 과정들을 표적들의 수와 종류에 따라 반복하여 실시간 데이터베이스를 구축하여 편대비행 표적식별을 수행할 수 있다.





[그림 2.3] 편대비행 표적식별을 위한 합성기법

3. 편대비행 표적 식별을 위해 제안된 합성기법

가. HRRP를 이용한 편대비행 대수추정

(1) RELAX

RELAX는 신호의 극점을 예측하는 기법인 CLEAN 기법의 한 종류이다[5]. CLEAN 기법은 가장높은 에너지의 산란점부터 순서대로 원하는 개수의 산란점 정보를 추출하는 기법이다. RELAX는 CLEAN 기법을 반복적으로 수행하도록 변경하여 보다 정확한 극점의 위치와 극값을 얻는 기법이다. 원 신호 y 를 다음과 같이 정의한다.

$$y = \sum_{i=1}^K a_i w(f_i) \quad (2.14)$$

$$w(f_i) = [1 e^{j2\pi f_i} \dots e^{j2\pi(N-1)f_i}]^T$$

여기서 a 는 진폭, f 는 극점의 위치, N 은 신호의 길이이다. K 의 개수 a 와 f 는 아래 비용 함수를 최소화 하는 값이 되어야 한다.

$$C_3(f_1, a_1, \dots, f_K, a_K) = \left\| y - \sum_{k=1}^K w(f_k) a_k \right\|^2 \quad (2.15)$$

원 신호에서 한 개의 PSF(Point Spread Function)를 뺀 y_k 을 다음과 같이 정의한다.

$$y_k = y - \sum_{i=1, i \neq k}^K \hat{a}_i w(\hat{f}_i) \quad (2.16)$$

나머지 계수들은 주어졌다고 가정하면 식 (2.15)의 비용함수를 최소화하는 계수들은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\hat{a}_k = \frac{w^H(f_k)y_k}{N} \Big|_{f_k = \hat{f}_k} \quad (2.17)$$

$$\hat{f}_k = \operatorname{argmax}_{f_k} |w^H(f_k)y_k|^2$$

계수들을 구하는 방법은 다음과 같다.

step 1 : K=1로 놓고, \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 y 로부터 얻는다.

step 2 : K=2로 놓고, \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 식 (2.16)에 넣고 y_2 를 계산하고, \hat{f}_2 과 \hat{a}_2 을 얻는다. 이렇게 얻은 \hat{f}_2 과 \hat{a}_2 을 다시 식 (2.16)에 넣어 \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 재계산한다. 이후 위의 과정을 원하는 K값이 될 때까지 반복한다.

RELAX 기법을 통해 수신된 편대비행 표적 HRRP에 대한 대략적인 길이를 알 수 있고 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio: SNR)의 변화에 강한 데이터를 얻을 수 있다.

(2) MUSIC

MUSIC 알고리즘은 신호 및 잡음의 수직 관계를 이용하여 고해상도 HRRP를 얻는 알고리즘이며, 레이더 신호의 상관행렬을 사용한다[6], [7]. 레이더 신호를 벡터로 표현한 식 y 에 대하여, 상관행렬은 다음과 같다.

$$R_{yy} = \epsilon[yy^H] \quad (2.18)$$

위 식에서 $\epsilon[\]$ 는 Ensemble average다.

R_{yy} 를 Eigenvalue Decomposition 후, Eigenvalue가 작은 Eigenvector는 잡음공간의 기저함수이며, 이를 이용하여 잡음공간 기저함수로 구성된 행렬 E 를 정의할 수 있다. 또한 레이다 신호를 이용하여 공간에서의 방향 벡터(Direction Vector) $a(x,y)$ 를 구성할 수 있으며, 최종적으로 다음 식과 같이 신호의 방향벡터(신호공간) 및 E (=잡음공간)의 직교성을 이용하여 신호가 존재하는 지점의 값을 극대화 할 수 있다.

$$P_{MUSIC}(x,y) = \frac{a(x,y)^H a(x,y)}{a(x,y)^H E E^H a(x,y)} \quad (2.19)$$

위 식(14)의 피크점은 받은 신호의 산란점들의 위치를 나타낸다. MUSIC 알고리즘을 적용시켜 자기상관 결과 피크 개수를 더 명확하게 확인한다.

(3) CFAR Detector

CFAR 탐지기는 문턱 값을 오경보율의 함수로 나타냄으로 인해 잡음의 정상상태가 보장되지 않는 경우에 일정한 오경보율을 유지할 수 있도록 검출 문턱 값을 적응적으로 결정한다[8].

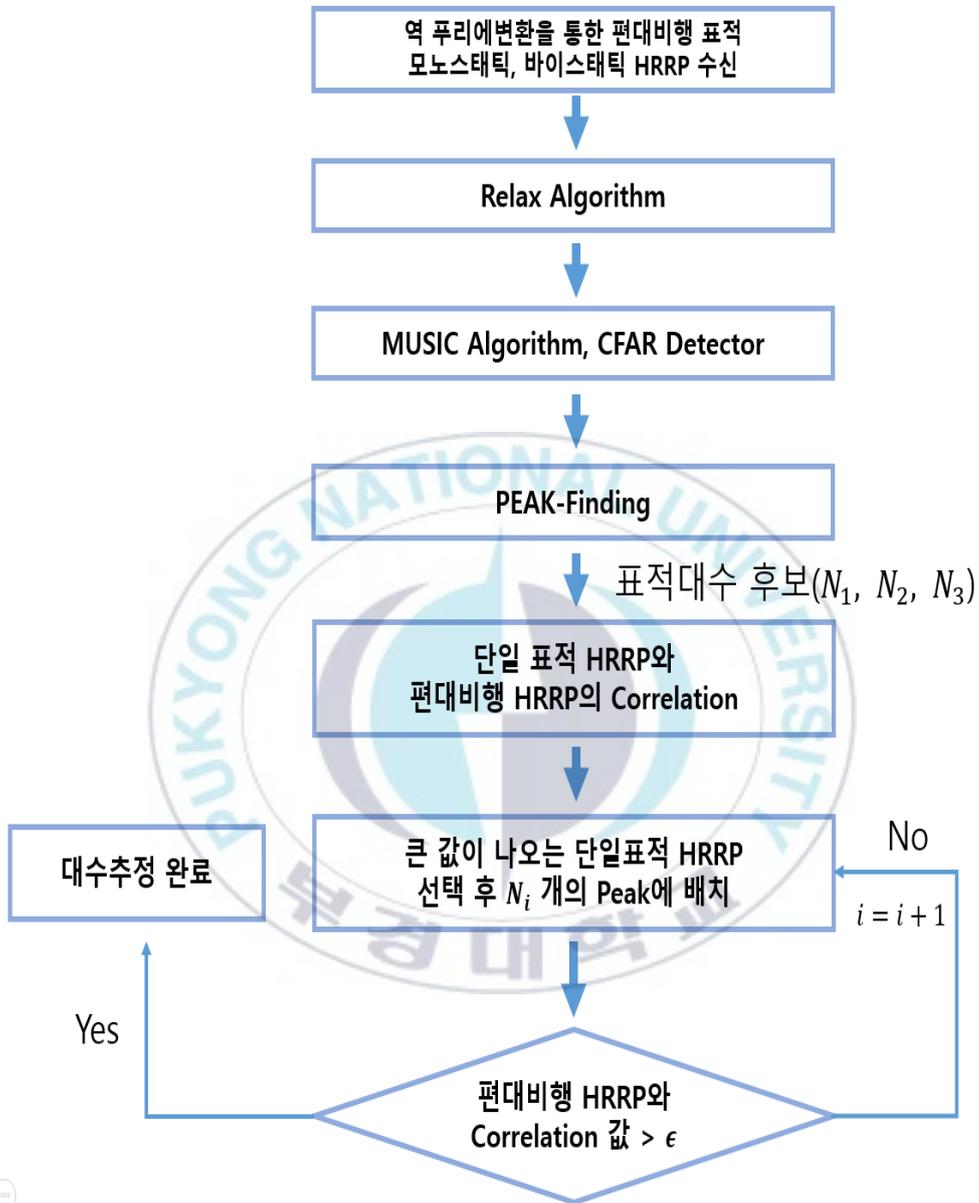
$$T = \alpha P_n \quad (2.20)$$

T 는 문턱 값, α 는 크기 계수, P_n 은 잡음 측정값이다. 식 (2.20)의 문턱 값

이상만의 값을 표적으로 인식해, 잡음 상황에서도 명확한 피크를 얻는다.

(4) 대수추정 알고리즘

그림 2.4는 본 논문에서 제안하는 대수추정 알고리즘이다. 우선 정합 필터링(Matched-Filtering) 및 역푸리에변환(Inverse Fourier Transform)을 이용하여 편대비행 표적의 HRRP를 획득한다. 모노스테틱 레이더만 사용할 경우 LOS 진행방향 표적에 대한 명확한 편대비행 표적 HRRP를 얻기 힘들다는 한계점을 극복하기 위해 바이스테틱 HRRP를 같이 형성한다. 또, 모노스테틱, 바이스테틱의 공간적 분리성을 이용해 편대비행 표적의 HRRP의 확보도 용이하다. 이 후, RELAX 알고리즘을 이용하여 HRRP의 해상도를 증대시킨다. 이후 추가적으로 MUSIC 알고리즘 및 CFAR Detector를 적용하여 잡음의 영향을 최소화 한다. 마찬가지로 단일 표적도 동일한 과정을 거쳐 MUSIC HRRP를 형성한 후, 편대비행 표적의 HRRP와 단일표적 HRRP간의 자기상관을 구한다. 자기상관 결과 표적이 존재하는 지점이 다른 지점에 비하여 큰 값이 나타나므로, 피크 값의 개수에 따라서 대략적인 표적의 대수 후보군(예) N_1, N_2, N_3 를 추정할 수 있다. 이후 각 표적의 대수 후보에 따라 그에 따른 가장 큰 피크 위치를 찾을 수 있으며, 이 위치에 단일 표적의 HRRP를 배치하여 다중표적 HRRP를 구성할 수 있다. 최종적으로 수신된 다중표적의 HRRP와 피크를 이용하여 구성된 HRRP의 상호상관관계를 통해 편대비행 표적대수를 추정할 수 있다. 즉, 한 대수 후보에 의해서 구성된 HRRP와의 상호상관 결과 값이 지정된 임계값(ϵ) 이하로 나올 경우, 이는 표적의 대수가 다르다는 것을 의미하므로, PEAK-Finding 결과에 저장된 후보로 재 수행해 확실한 편대비행 대수추정이 가능하다.



[그림 2.4] 대수추정 알고리즘

나. HRRP 합성기법

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

$$HRRP_{fo}(x) = \sum_{h=1}^H s_h HRRP_h(x-l_h) \quad (2.21)$$

여기서 $h = 1, 2, \dots, H$ 는 편대를 구성하는 표적의 수이며 단일표적의 $HRRP_h$ 는 레이더 시선방향위의 l_h 지점에 진폭의 분산을 고려하기 위한 척도인자 s_h 의 비율(scale)로 투영된다. 레이더와 표적사이의 거리는 상황에 따라서 달라지기 때문에 거리에 따라서 불규칙한 표적의 진폭은 정규화(normalization) 과정이 필요하며 다음과 같다[12].

$$\overline{HRRP}_{fo}(x) = \frac{HRRP_{fo}(x)}{\sqrt{\sum_{x=1}^N HRRP_{fo}(x)HRRP_{fo}^*(x)}} \quad (2.22)$$

위 식에서 *는 복소공액, N 은 HRRP의 픽셀 개수이다. 또한 추적레이더를 통하여 측정된 관측각도에 해당하는 단일 표적의 HRRP들을 $HRRP_k(k=1, 2, \dots, K)$ 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 (2.22)와 같이 정규화 과정이 필요하며 \overline{HRRP}_k 와 같다.

HRRP 합성 과정에서 각각의 HRRP가 레이더 시선방향위에 투영되

어질 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.

$$Cr(l) = \sum_{x=1}^N \left| \overline{HRRP}_{fo}(x) \overline{HRRP}_k^*(x-l) \right| \quad (2.23)$$

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

$$\bar{l}_k = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_{q_k}] = \text{findpeaks} \left\{ \left| \text{IFT} \left[\text{FT} \left[\overline{HRRP}_{fo} \right]^* \text{FT} \left[HRRP_k \right] \right] \right|, q_k \right\} \quad (2.24)$$

여기서 \bar{l}_k 는 총 q_k 개의 후보위치를 원소로 하는 벡터이며 Matlab의 $\text{findpeaks}(\cdot)$ 함수를 이용하여 계산할 수 있다.

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

$$X = \left[\begin{array}{c} \hat{l}_1 \hat{l}_2 \dots \hat{l}_H \\ \hat{s}_1 \hat{s}_2 \dots \hat{s}_H \end{array} \right] = \underset{\hat{X}}{\operatorname{argmax}} \sum_{x=1}^N \left| \overline{HRRP}_{fo} \right| \left| \overline{HRRP}_{com} \right| \quad (2.25)$$

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

$$\overline{HRRP}_{com}(x) = \frac{HRRP_{com}(x)}{\sqrt{\sum_{x=1}^N HRRP_{com}(x) HRRP_{com}^*(x)}}, \quad (2.26)$$

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

척도 인자 \hat{s} 는 양의 실수 값을 갖는다. H 는 편대비행 합성에 사용된 표적의 수이며 총 K 개의 $HRRP_k$ 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 (2.25)을 비용함수로 하는 PSO알고리즘을 이용하여 최적화 할 수 있다. 식 (2.25)와 같이 표현되는 p 번째 particle X_p 의 속도 및 위치는 다음과 같은 PSO 알고리즘을 통해 최적화 된다[13].

$$v_p^{i+1} = \phi v_p^i + c_1 r_1^i (X_{pbest} - X_p^i) + c_2 r_2^i (X_{gbest} - X_p^i) \quad (2.27)$$

$$X_p^{i+1} = X_p^i + v_p^{i+1} \quad (2.28)$$

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 (2.28)과 같이 p 번째 particle은 식 (2.27)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, H 는 각각 측정된 관측각도에 따른 후보 HRRP의 수, 픽셀 수, 합성되어지는 표적의 수를 의미한다. 본 논문의 HRRP 합성 시뮬레이션에서는 $K=320, N=501, H=3, P=8000, I=10$ 의 값을 이용하였으며 대수적 복잡도는 각각 $320^3 \times 501^3$ 와 8000×10 으로 제안된 기법이 대수적 복잡도 측면에서 더 효율적임을 알 수 있다.

4. 합성된 HRRP를 이용한 표적식별

앞 절의 합성기법은 미리 학습되어 있는 단일 표적의 종류 및 편대를 구성하는 표적 수에 따라서 반복하여 실시간 데이터베이스를 구성할 수 있다. 여기서 표적의 수는 제안된 대수추정 알고리즘을 통해 구해진다. PSO 알고리즘을 통하여 최적화된 변수로 생성되는 HRRP는 단 하나이므로 실시간 데이터베이스에 저장되는 표적의 $HRRP_{com}$ 의 총 개수 N_{tr} 는 다음과 같다.

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

여기서 H_f 는 편대를 구성할 수 있는 최대 표적수이며 실제 편대비행중인 표적의 수는 알지 못하므로 식별을 위해 합성되는 표적의 수는 $H=2, \dots, H_f$ 와 같다. N_t 는 합성에 사용될 수 있는 표적 종류의 가짓수이며 표적의 종류 또한 알 수 없기 때문에 학습되어 있는 모든 종류의 표적에 대하여 합성을 실시해야 한다. 표적 수도 편대비행 표적식별에서 큰 시간을 차지하기 때문에 제안된 대수추정 알고리즘을 사용함으로써 편대비행 표적 식별시의 정확도 및 계산시간을 크게 증대시킬 수 있다. 표적들의 식별이 이루어질 경우 편대비행 표적이 1대부터 5대까지라고 생각했을 때, 알고리즘이 없을시 이론상으로 최대 5배의 계산시간이 소요된다.

3절에 소개된 기법을 통하여 트레이닝 데이터베이스 기반의 실시간 표적식별은 편대비행 표적들로부터 생성된 \overline{HRRP}_{fo} 와 실시간 데이터베이스의 모든 \overline{HRRP}_{com} 을 식 (2.23)의 상호상관을 계산한다. 계산된 값들 중 가장 큰 값을 갖는 $HRRP_{com}$ 을 이용하여 표적의 종류와 수를 식별한다.

Ⅲ. 실험 결과

1. 제안된 기법을 통한 HRRP 합성결과

표적 식별에 사용된 학습데이터는 기동 시나리오를 바탕으로 구성된 단일표적 HRRP 영상 데이터베이스를 사용하였다[11]. 기동 시나리오 기반 훈련 DB 구축을 위해, 송·수신기 위치를 설정하고, 3차원 공간에서의 비행 시작점에서 비행 표적은 일정한 방향 과 일정한 속도로 기동하였다. 훈련 DB 구축을 위한 조건은 표 1, 레이더의 시뮬레이션 조건은 표 2와 같으며 다음 조건으로 모노스테틱, 바이스테틱 HRRP 영상 훈련 DB을 구축하였다. 모노스테틱에 경우 수신기의 위치는 송신기의 위치와 같다. 본 논문에서는 총 4종류의 점산란원으로 구성된 비행표적(F-18, F-14, Su35, Rafal)을 사용하였으며[그림 3.1], 각 시나리오마다 10개의 HRRP를 얻었다. 훈련 DB를 구성하는 영상의 총 개수는 $2(\text{모노스테틱, 바이스테틱}) \times 4(\text{표적의 종류}) \times 16(\text{비행 시작점}) \times 10(\text{시나리오 별 갯수}) = 1280$ 개다.

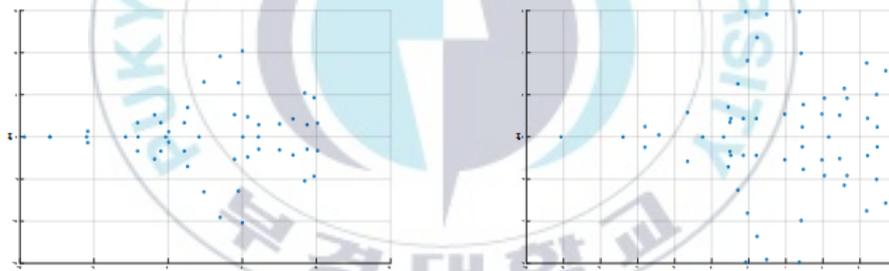
테스트 DB는 1~5대 대수를 갖는 편대비행 표적이다. 편대비행 시 각 표적간의 거리는 10m다. 레이더 파라미터, 비행 방향, 비행 속도, 비행 시작점은 훈련 DB와 동일하다 훈련 DB를 구성하는 영상의 총 개수는 $2(\text{모노스테틱, 바이스테틱}) \times 4(\text{표적의 종류}) \times 16(\text{비행 시작점}) \times 10(\text{시나리오 별 갯수}) \times 5(\text{편대비행 표적의 대수}) = 6400$ 개다.

레이더 위치	송신기	$[20\ 0\ 0]\ km$
	수신기	$[-20\ 0\ 0]\ km$
비행 방향	$[-1\ -1\ 0]$	
비행 속도	$300m/s$	
비행 시작점: x	$-15, -5, 5, 15\ km$	
비행 시작점: y	$30\ km$	
비행 시작점: z	$1, 3, 5, 7\ km$	

표 1 훈련 DB 파라미터

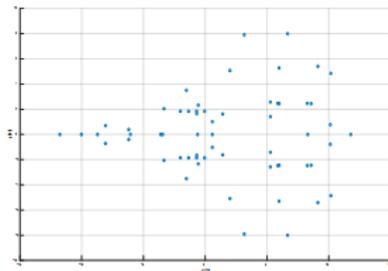
중심 주파수	$10GHz$
주파수 대역폭	$200MHz$
펄스 폭	$30\mu sec$

표 2 레이더 파라미터

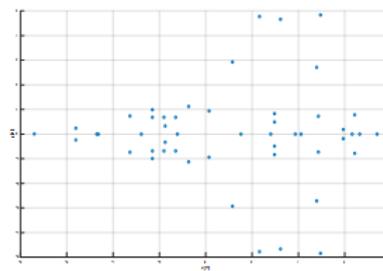


(a) F-14

(b) F-18



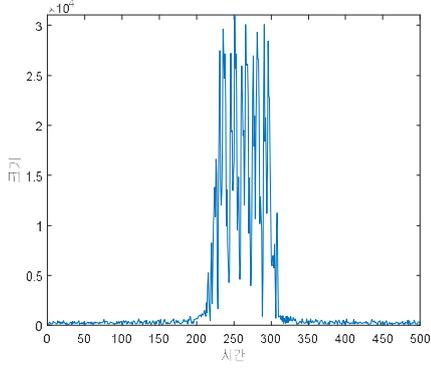
(c) su-35



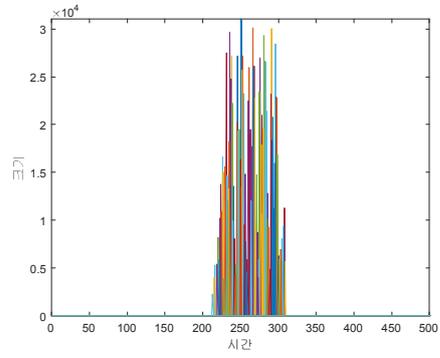
(d) rafal-50

[그림 3.1] 전투기 모형

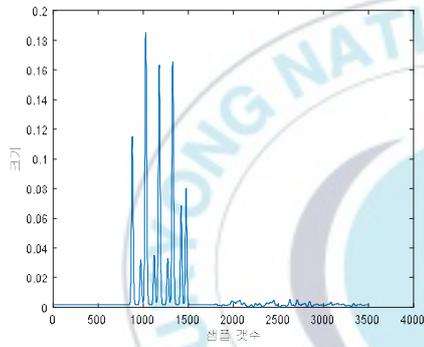
그림 3.2(a)는 정합필터링 및 역푸리에변환을 통하여 형성된 편대비행하는 5대 F-18의 HRRP이다. 그림에서 보는 바와 같이, 인접한 산란원들의 간섭으로 인하여 HRRP 주변으로 잡음이 많이 존재함을 알 수 있다. 이 HRRP에 RELAX Algorithm을 적용할 경우, 그림 3.2(b)와 같이 잡음이 저하된 새로운 HRRP를 형성할 수 있었다. 하지만 역푸리에변환 HRRP와 유사하게 표적의 산란점들이 명확히 구분되지 않으므로, 매우 많은 수의 산란점들이 형성되었으며, 이러한 산란점들이 서로 영향을 주어서 표적 대수를 추출하는데 많은 방해가 됨을 알 수 있다. MUSIC 알고리즘을 적용할 경우, 표적의 주 산란점만 추출되기 때문에 그림 3.2(c)와 같이 수 개의 적절히 분리된 산란점으로 구성된 HRRP를 얻을 수 있었다. 적절히 분리된 산란점을 얻고, 훈련 DB와의 상호상관관계를 통해 단일표적 HRRP를 얻는다. 이 단일표적 HRRP를 테스트 DB와의 상호상관을 통해 구해진 피크에 재배치하면 그림 3.2(e)가 된다. 그림 3.2(e)와 테스트 DB의 상호상관 결과는 그림 3.2(f)와 같다. 표적의 대수가 정확하게 추정되었으므로, 상호상관 값이 높은 것을 볼 수 있다. 또한 그림 3.2(d)과 그림 3.2(f)에서 보는 바와 같이, 5대 표적 HRRP의 상호상관으로 인하여 표적 피크점이 9개인 것을 확인할 수 있다. 즉, 표적 대수에 대하여 2-1 개의 피크가 나타나게 됨을 알 수 있다. 그림 3.3은 SNR에 따른 편대비행 표적대수 추정 정확도 결과다. 그림에서 보는 바와 같이, 제안된 알고리즘이 SNR에 관계없이 100%에 가깝게 편대비행 표적대수 추정을 하였음을 알 수 있다. 이는 제안된 알고리즘을 통하여 잡음에 취약한 역푸리에변환 HRRP가 RELAX 알고리즘을 통하여 개선되었으며, MUSIC 알고리즘이 피크 사이의 간섭을 최소화 시킨 결과이다. 또한 표적의 피크 위치를 이용하여 구성된 HRRP와 편대비행 표적의 HRRP 사이의 상호상관관계가 표적대수 추정에 매우 효과적인 비용함수로서 작용함을 의미한다.



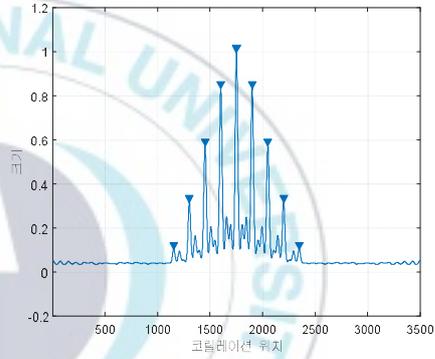
(a) F-18 5기의 HRRP



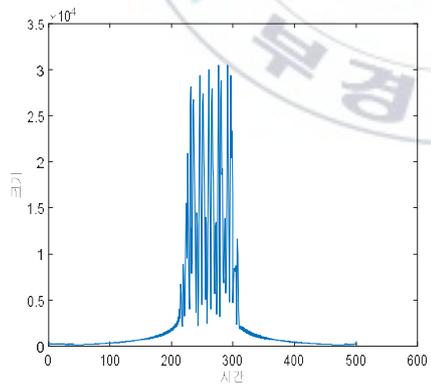
(b) RELAX 결과 값



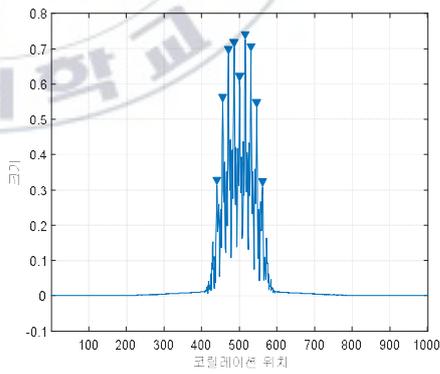
(c) MUSIC 및 CFAR 결과 값



(d) Correlation 결과 값

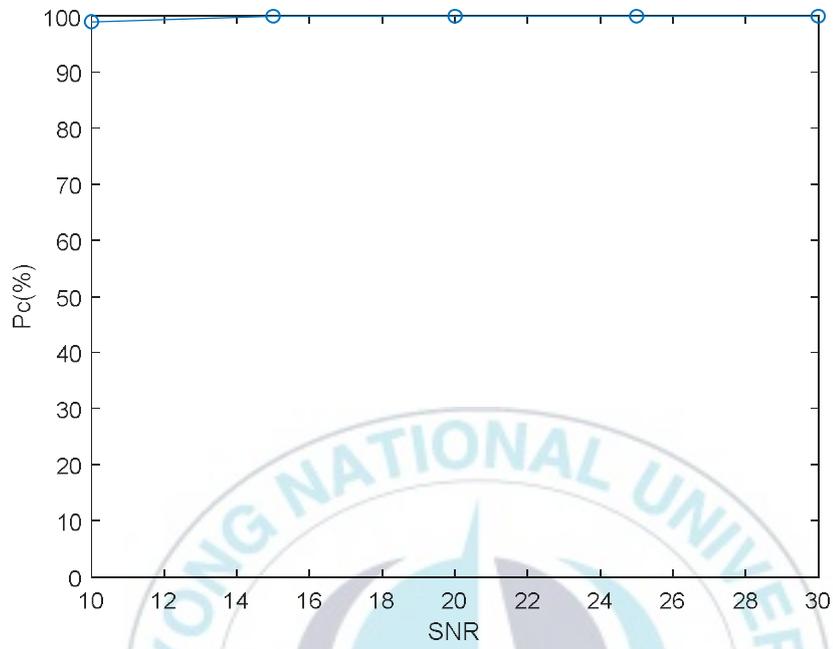


(e) 피크점에 단일표적이 배치된 HRRP



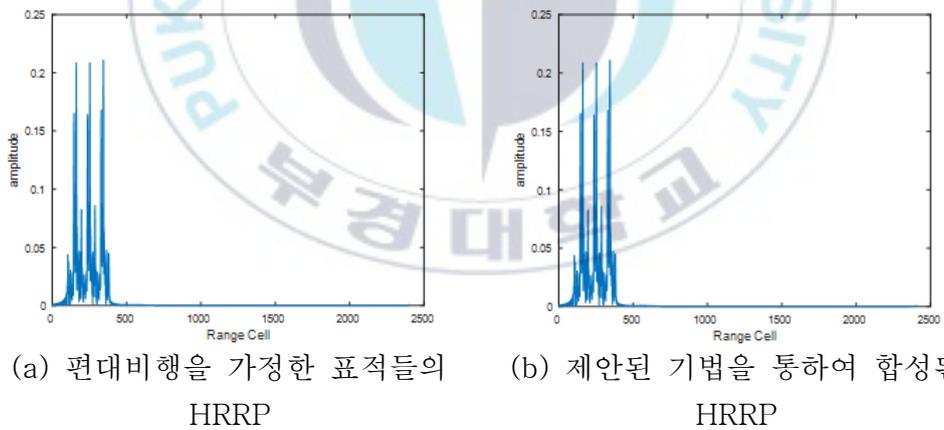
(f) 최종 Correlation 결과 값

[그림 3.2] 편대비행 대수추정 결과



[그림 3.3] SNR에 따른 표적대수 추정결과

편대비행 표적대수 추정 후, 식 (2.24)를 통하여 투영 위치 후보벡터 $\bar{l}_1, \bar{l}_2, \dots, \bar{l}_{13}$ 을 구성할 수 있다. 각 위치벡터는 3번째로 큰 침두치($q_k=3$)를 갖는 위치까지 포함된다. 산정된 위치 후보벡터는 8000개의 개체군 (population) 및 $\phi=0.6$ 의 관성가중치를 갖는 식 (2.27), (2.28)의 PSO 알고리즘에 적용하여 10번의 반복을 통해 1에 가까운 매칭 점수로 최적화되어지며 [그림 3.4]의 (b)와 같다. 그 결과 *HRRP*와 동일한 *HRRP_{com}*을 합성할 수 있었다.

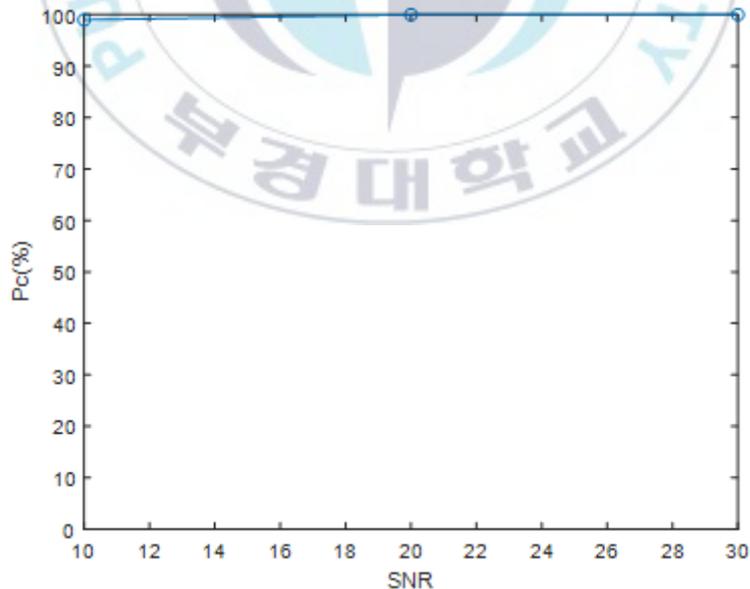


[그림 3.4] HRRP 합성결과

2. 표적식별 구분 결과

구분결과를 위한 실험은 SNR = 10, 20, 30dB 환경에서 수행되었다. 또한 편대비행 중 표적의수는 $2 \leq H \leq 5$ 의 범위 내에서 임의로 선택되었으며 기동 시나리오 데이터베이스를 사용했다. HRRP의 경우 각 표적들이 투영되는 위치 l_h 는 HRRP의 총 샘플의 범위 $1 \leq l_h \leq 501$ 중 임의로 선택되었다. AWGN (Additive White Gaussian Noise)에 기인한 측정오차를 줄이기 위하여 시뮬레이션은 각 SNR 환경에서 50번 반복 실시되었다

합성된 HRRP를 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, PSO 적용 시 표적대수 알고리즘의 사용유무에 따라 최대 5배의 데이터 처리시간이 차이났다.



[그림 3.5] 합성된 HRRP를 이용한 식별결과

IV. 결론

본 연구에서 레이더를 이용한 효과적인 편대비행 표적식별을 위하여 기존의 편대비행 표적의 HRRP로부터 각각의 표적의 HRRP를 추출하여 표적식별을 수행하는 기법을 사용하는 대신 편대비행의 대수를 추정 후 단일 표적의 모노스테틱, 바이스테틱 HRRP를 합성하여 편대비행 표적식별을 수행하는 기법을 제안하였다. 역푸리에변환 HRRP의 잡음 취약성을 RELAX 알고리즘을 이용하여 개선하였으며, 또한 MUSIC 및 CFAR Detector를 이용하여 표적의 산란점간의 영향을 최소화 하였다. 마지막으로 피크 점 및 이를 이용한 단일 표적들의 HRRP로 구성된 HRRP와 편대비행 표적의 HRRP 간의 상호상관을 이용하여 표적의 대수를 추정하였다. 점산란원 표적을 이용한 시뮬레이션 결과, 낮은 SNR에서도 100%에 가까운 대수 추정이 가능하였다. HRRP의 합성은 효율적인 실시간 데이터 처리를 위한 기동 시나리오 기반의 데이터베이스를 기반으로 한 HRRP를 통해 이뤄졌다. 경우의 수가 가장 많은 투영위치는 각각 상관관계 및 템플릿 매칭을 통하여 후보가 산정되었으며 PSO 알고리즘을 통하여 각각의 변수를 최적화하여 미확인 편대비행 표적의 HRRP와 동일하게 합성할 수 있었다.

합성된 HRRP를 이용하여 상관관계를 통하여 식별 시뮬레이션을 수행한 결과 낮은 SNR 환경에서도 98%이상의 높은 식별 확률을 보였다.

본 연구자는 향후 HRRP를 통한 편대비행 표적식별을 위하여 더 많은 종류의 구분기를 적용하여 실시간으로 가장 효율적이며 정확한 표적식별이 수행될 수 있도록 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] B.R. Mahafza, "Radar System Analysis and Design using MATLAB," Chapman & 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. On 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] Seung-Jae LEE, Ji-Hoon Bae, Seong-Jae Jeong, Eun-jung Yang, and Kyung-Tae Kim, "Analysis of Target Identification Performances against the Moving Targets Using a Bistatic Radar", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic and Science*, Vol. 27, No. 2, pp.198-207, Feb. 2016.
- [5] Jina Li, Petre Stoica, "Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction", *IEEE Trans. Singal Processing*, vol. 44, no. 2, Feb. 1996.
- [6] J. W. Odendaal, E. Barnard, C. W. I. Pistorius, "Two-dimensional superresolution radar imaging using the music algorithm", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 42, Oct. 1994.
- [7] Kim, K.-T., Seo, D.-K., Kim, H.-T.: 'Efficient radar target

- recognition using the MUSIC algorithm and invariant features',
IEEE Trans. Antennas Propag, vol. 50, no.3, pp. 325 - 337, mar.
2002.
- [8] L. Scharf, Statistical Signal Processing: Detection Estimation and
Time Series Analysis, Addison Wesley, 1991.
- [9] M. Martorella, J. Palmer, J. Homer, B. Littleton, and I. D. Longstaff,
"On bistatic inverse synthetic aperture radar", IEEE Trans. Aerosp.
Electron. Syst., vol. 43, no. 3, pp. 1125-1134, Jul. 2007.
- [10] Seung-Jae Lee, Seong-Jae Jeong, Eunjung Yang, and Kyung-Tae
Kim, "Target identification using bistatic high-resolution range
profiles", IET Radar, vol. 11, no. 3, pp. 498-504, mar. 2017.
- [11] Park, J.-I., Kim, K.-T.: 'Efficient construction of training database
for identification of aircraft HRR profiles'. Proc. IEEE Radar Conf.
pp. 590 - 595, 2010.
- [12] 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
- [13] J. Kennedy and R. C. Eberhart, *Swarm Intelligence*, Academic
Press, 2001.
- [14] 김민, "레이더를 이용한 효과적인 편대비행 표적식별", 부경대학교 대
학원 학위논문, 2017년.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] V. C. Chen and Z. Z. Lu, “Radar imaging of multiple moving targets,” *Proc. SPIE*, vol. 3161, pp. 102 - 112, Sep. 2004.



부 록

[게제 논문]

논문제목 (Paper Title)	논문 발표일 (Date)	논문지명 (Journal Title)	논문지 구분 ¹⁾	저자 구분 ²⁾
Monostatic, Bistatic HRRP를 이용한 편대비행 대수	심사	Journal of KIIT	학진 등재지	제1저자
추정드론과 조류의 분별을 위한 효과적인 미세 도플러 특성벡터 연구	심사	Journal of KIIT	학진 등재지	제2저자
Monostatic, Bistatic ISAR 영상 융합을 통한 표적 식별 연구	2018.09	Journal of KIIT	학진 등재지	제2저자
편대비행 ISAR 영상 형성을 위한 위상보정 기법 분석	2018.05	Journal of KIIT	학진 등재지	제2저자

[학술 학회]

논문제목 (Paper Title)	발표일 (Date)	학술회명 (Conference Title)
Monostatic, Bistatic HRRP를 이용한 편대비행 대수 추정	2018.06	한국전자과학회 전파 및 광파기술 학술대회
ICA와 SVD를 사용한 미사일 표적의 3차원 점산란원 영상 추정	2017.08	한국전자과학회 하계 종합학술대회

감사의 글

초심과는 다르게 부족한 2년이란 시간의 마침표를 찍게 되어 기쁜 마음입니다. 많이 부족한 저를 인생이란 길의 초석을 다지게 해주신 분들에게 감사의 인사를 드리고 싶습니다.

먼저, 배움의 길을 넘어 제가 앞으로 나아갈 인생의 방향의 지표가 되어주신 박상홍 교수님께 감사 인사를 드립니다. 때론 아버지같이, 때론 친구같이 곁을 지켜주신 교수님께서 베풀어주신 은혜 잊지 않겠습니다.

앞에서 같이 저희를 이끌어 주신 선배님들께도 감사 인사를 전합니다. 인오형, 민이형, 기봉이형 선배란 어떤 것임을 보여주며, 제가 후배들 앞에 어떤 모습으로 서야 될 지 알려 주셔서 감사합니다.

곁에서 철없는 푸념을 묵묵히 들어주며 격려해주신 분들께도 감사의 인사를 드립니다. 수석이형을 비롯한 평생 함께할 형들, 친구들에게 누구보다 힘이 되어주어 감사한 마음을 전합니다.

마지막으로 저에겐 세상에서 제일 든든한 아버지, 어머니 이 자리를 빌어서 감사의 인사를 드립니다. 짧다고 할 수 있지만, 그래도 아버지, 어머니가 저희를 키우며 하셨을 고난의 세월을 생각하면 결코 짧지 않은 시간동안 무뎌진 아들이 감사 인사 한 번 제대로 못 드려 죄송한 마음뿐입니다. 아버지, 어머니 사랑합니다. 그리고 철없는 형 뒤를 묵묵히 지켜주는 내 동생 석빈이에게도 감사한 마음을 전합니다.

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

2019. 02. 22

황 석 현