

구분기 신뢰도에 기반한 HRRP 및 JEM 융합 항공기 식별

Aircraft Classification with Fusion of HRRP and JEM Based on the Confidence of a Classifier

김 시 호 · 이 상 인 · 채 대 영

Si-Ho Kim · Sang-In Lee · Dae-Young Chae

요 약

본 논문에서는 항공기 식별을 위해 서로 보완적인 특성을 갖는 HRRP 구분기와 JEM 구분기를 융합하여 식별하는 방법을 제안한다. 다양한 상황에서 단일 구분기보다 향상된 식별성능을 얻기 위하여 식별결과에 대한 구분기의 신뢰도를 가중치로 융합하는 방법을 제안한다. 신뢰도는 구분기의 식별성능으로부터 추정된 사후확률로 정의되며 식별결과에 대한 확신도 및 관측각도에 따라 변하는 특성을 가진다. 시뮬레이션 데이터를 사용한 식별실험을 통해 제안한 융합 방법이 단일 구분기를 효과적으로 융합하여 향상된 식별성능을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a fusion classification method combining HRRP and JEM classifier with complementary properties for the classification of aircraft. The fusion method is based on the confidence of a classifier for a classification result to improve performance compared with single classifier in various situations. The confidence is defined as the posterior probability estimated from the classification performance of a classifier and it depends on the aspect angle and the certainty for a classification result. Through the classification test using simulation data, we can verify that the proposed fusion method shows good performance by fusing the classifiers effectively.

Key words: JEM(Jet Engine Modulation), HRRP(High Resolution Range Profile), Target Classification, Fusion, Confidence

I. 서 론

레이다 반사 신호는 거리 정보뿐만 아니라, 표적의 특성을 반영한 크기 및 위상 정보를 포함하고 있어 표적의 식별에도 사용된다^{[1],[2]}. 레이다를 이용한 항공기 식별은 항공기 피아 식별(IFF: Identification of Friend or Foe)을 보완하고, 표적에 대한 추가적인 정보를 제공할 수 있어 활발히 연구가 진행되고 있다. 대표적인 항공기 식별 방법

인 JEM(Jet Engine Modulation) 기법^{[2]~[6]}은 항공기 제트 엔진의 회전에 의해 변조되는 레이다 반사 신호를 분석하여 항공기를 식별한다. JEM은 항공기 식별 방법 중에서 가장 오래된 기법이지만, 연산량이나 성능 면에서 가장 현실적인 방법으로 알려져 있다. 하지만 엔진 정면에서는 도플러가 발생하지 않고, 측면에서는 엔진 블레이드가 관측되지 않아 식별이 어렵다는 단점이 있다. 또한, 최근 개발되는 항공기들은 엔진 흡입구 자체가 노출이 되

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 20, 2017 ; Revised March 6, 2017 ; Accepted March 16, 2017. (ID No. 20170120-005)

· Corresponding Author: Si-Ho Kim (e-mail: si5kim@naver.com)

지 않기 때문에 JEM 신호 획득이 점점 어려워지고 있다.

항공기를 식별하는 또 다른 방법으로 HRRP(High Resolution Range Profile)나 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)를 이용하는 기법이 있다. HRRP는 항공기의 1차원 산란점 분포를 나타내는 신호로서 항공기마다 산란 특성이 달라서 기종을 식별하는데 유용하다^{[2],[7],[8]}. HRRP는 짧은 시간에 획득이 가능하고, 정면뿐만 아니라 360도 전 방위에서 관측이 가능하다는 장점을 가진다. 반면, HRRP는 표적 관측각도에 따라 민감하게 변하므로 각도에 따라 많은 양의 DB를 보유해야 하는 단점이 있다. HRRP를 연속적으로 측정하여 항공기 회전에 의한 도플러 정보를 방위각 방향의 산란점 분포로 표현한 것이 ISAR이다. ISAR는 2차원 산란 분포 정보를 가지고 있어 HRRP보다 좋은 식별 성능을 얻을 수가 있다. 하지만 방위각 방향의 해상도는 관측각도의 변화에 비례하기 때문에 원하는 해상도를 얻기 위해서는 일정시간 이상의 관측 시간이 필요하고, 이동보상(motion compensation) 등으로 연산량이 많다는 단점이 있다.

이와 같이 항공기를 식별하는 방법은 여러 가지가 존재하지만, 상황 및 조건에 따라서 각기 장단점을 가진다. 따라서 상황에 따라 여러 식별 방법을 선택적으로 사용하거나 효과적으로 융합하면 다양한 상황에서 단일 식별기보다 나은 성능을 얻을 수 있을 것이다. 이에 본 논문에서는 항공기 식별을 위해 서로 보완적인 특성을 가지는 HRRP와 JEM 식별기를 융합하여 보다 좋은 성능을 내는 융합 식별 기법을 제안하고자 한다. 융합 시 가장 중요한 점은 조건에 따라 단일 식별기 결과를 어떻게 효과적으로 융합하느냐 이다. 잘못 융합한다면 오히려 단일 식별 결과보다 성능이 떨어지는 결과를 얻을 수 있다. 식별 결과를 융합하는 방법^[9]은 여러 가지가 있으며, 본 논문에서는 관측각도 및 식별결과에 의존하는 구분기 신뢰도를 기반으로 융합하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 HRRP 및 JEM 단일 구분기에 대해서 간략히 설명하고, 3장에서는 두 단일 구분기를 융합하는 알고리즘에 대해서 설명한다. 4장에서는 제안한 알고리즘의 성능 확인을 위한 식별실험 결과를 제시하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. HRRP 및 JEM 단일 구분기

2-1 JEM 구분기

JEM 구분기는 항공기의 제트엔진으로부터 발생하는 JEM 신호의 스펙트럼을 분석하여 항공기 엔진을 식별하는 방법이다^{[5],[6]}. 그림 1은 전형적인 JEM 신호의 스펙트럼을 보이고 있다. 그림에서 촘촘하게 구성된 스펙트럼 성분들이 제트엔진의 축회전속도에 의한 하모닉 성분들이고, 중간에 크게 나타나는 하모닉 성분들이 각 단(stage)의 날개 수에 의해 결정되는 초핑(chopping) 주파수이다. 축회전속도와 초핑 주파수의 비가 각 단의 날개 수에 해당되며, 이러한 하모닉 성분들을 분석하면 날개 수를 추정할 수 있다. 엔진마다 단수와 날개 수가 다르기 때문에, 각 단의 날개 수 정보가 엔진을 구별하는데 중요한 정보로 사용된다. 일반적으로 JEM 신호는 동체신호에 비해 작기 때문에 신호를 분석하기 위해서는 높은 SNR이 요구되고, 흡입구 방향이 정면을 향하기 때문에 정면에서 $\pm 30^\circ$ 정도에서만 JEM 신호를 관측할 수 있다는 특성을 가진다.

본 논문에서는 JEM 단일 구분기로 참고문헌 [5]에서 제안한 주파수 마스킹 방법의 식별 알고리즘을 사용한다. 구분기의 식별결과로는 표적 클래스와 확신도를 출력한다. 여기서 확신도는 구분기 융합에 사용되는 신뢰도를 추정하는데 필요한 값으로 해당 식별결과에 대해 얼마만큼 확신을 가질 수 있는지를 정량적으로 표현한 값이다. 확신도 값이 크다는 것은 해당 식별결과가 맞을 가능성이 높다고 보는 것이고, 반대로 그 값이 작다면 틀릴 가능

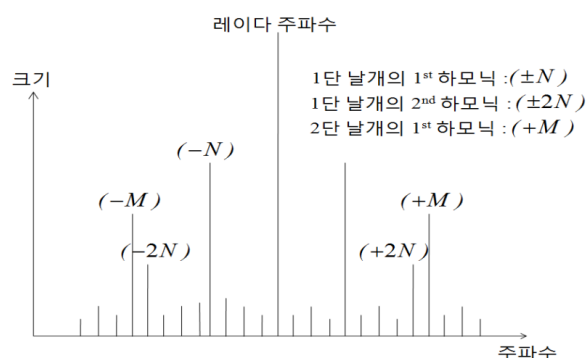


그림 1. 전형적인 JEM 스펙트럼
Fig. 1. Typical JEM spectrum.

성이 높다고 보는 것이다. 주파수 마스킹 기법에서는 식별결과로 표적 클래스와 함께 마스킹 스코어를 출력한다. 마스킹 스코어는 주파수 마스킹을 수행한 결과 값으로 그 값이 가장 큰 엔진 모델을 해당 표적으로 판단한다. 추정된 모델의 마스킹 스코어와 이외 모델들의 마스킹 스코어의 차이가 클수록 식별이 명확해지고, 식별결과에 대해 더 큰 확신을 가질 수 있을 것이다. 따라서 주파수 마스킹 기법의 JEM 구분기에서는 마스킹 스코어 값을 이용하여 다음과 같이 확신도를 계산한다.

$$\text{확신도}_{jem} = 1 - \frac{M_{2nd}}{M_{1st}} \quad (1)$$

식에서 M_{1st} 는 가장 큰 마스킹 스코어, M_{2nd} 는 두 번째로 큰 마스킹 스코어 값으로 두 마스킹 스코어의 차이가 클수록 확신도는 증가하는 특성을 보인다.

2-2 HRRP 구분기

HRRP는 레이더와 표적의 거리 방향으로 1차원적인 산란특성을 나타낸 신호로서, 표적의 모든 관측방향에서 짧은 시간 내에 신호를 획득할 수 있다. 반면, 관측 각도에 따라 민감하게 산란 특성이 변하므로 식별을 위해서는 각도별로 방대한 양의 HRRP DB가 필요하다. 그림 2는 항공기의 HRRP 신호 예를 보이고 있는데, 항공기의 위치에 따라 산란특성이 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. HRRP를 이용한 식별 방법 중 가장 간단한 방법은 HRRP 또는 HRRP의 스펙트럼을 DB의 템플릿과 비교하는 방법

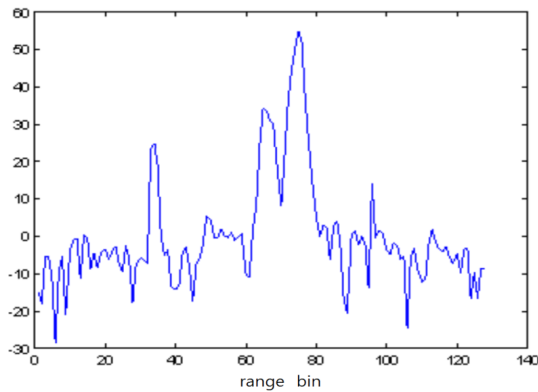


그림 2. 전형적인 HRRP 신호

Fig. 2. Typical HRRP signal.

(template matching)이다^[8]. PCA, LDA 등의 기법을 이용하여 신호로부터 특징벡터를 추출하여 식별을 수행하는 특징벡터 기반의 알고리즘도 있다. 구분 알고리즘으로 상호상관계수 비교, Nearest Neighbor 방법, SVM, AdaBoost 등이 있다. 본 논문에서는 HRRP 구분기의 가장 간단한 형태로 HRRP 템플릿 신호의 상호상관계수를 비교하는 알고리즘을 사용한다. JEM 구분기의 마스킹 스코어와 유사하게 상호상관계수 비교 방법에서도 가장 큰 상관계수와 두 번째로 큰 상관계수와의 비를 확신도 계산에 사용한다.

$$\text{확신도}_{hrrp} = 1 - \frac{P_{2nd}}{P_{1st}} \quad (2)$$

식에서 P_{1st} 는 가장 큰 상관계수, P_{2nd} 는 두 번째로 큰 상관계수를 나타낸다. 두 상관계수의 차이가 클수록 확신도는 커지고, 반대로 비슷할수록 확신도는 낮아지게 된다.

각 단일 구분기에서 출력되는 확신도는 제안한 융합 기법에서 중요한 요소로써 각 구분기의 식별 성능과 상관성이 있는 값이어야 한다. 따라서 각 구분기마다 고유한 방법으로 식별성능에 영향을 주는 인자를 선택하여 확신도를 계산할 수 있다.

III. HRRP 및 JEM 식별 융합

3-1 신뢰도 기반 융합

본 논문에서는 HRRP 및 JEM 단일 구분기의 식별결과를 각 구분기의 신뢰도를 기반으로 융합하는 방법을 제안한다. 신뢰도가 높은 구분기의 식별결과는 크게 반영하고, 신뢰도가 낮은 구분기의 식별결과는 작게 반영한다. 즉, 식 (3)과 같이 각 단일 구분기의 식별결과에 대한 신뢰도를 가중치로 더하는 방법을 사용한다.

$$i_f = \arg \max_{i=1 \sim T} (C_h(i/\hat{i}_h) + C_j(i/\hat{i}_j)) \quad (3)$$

식에서 i 는 클래스, T 는 전체 클래스의 개수를 나타낸다. \hat{i}_h 와 \hat{i}_j 는 각각 HRRP 구분기와 JEM 구분기의 식별결과(클래스)를, i_f 는 융합 식별결과를 나타낸다. C_h 와

C_j 는 HRRP 구분기와 JEM 구분기의 각 식별결과에 대한 신뢰도를 나타낸다. 신뢰도 $C(i/\hat{i})$ 는 구분기가 클래스 \hat{i} 로 식별하고, 실제 클래스는 i 가 되는 경우에 대한 신뢰도를 나타낸다.

식별결과에 대한 구분기의 신뢰도는 그 구분기의 식별 성능과 밀접한 관계에 있다. 즉, 식별 성능이 좋은 구분기는 식별 결과가 맞을 가능성이 높기 때문에 신뢰도가 높고, 반대로 식별 성능이 낮은 구분기의 식별 결과는 맞을 가능성이 낮기 때문에 신뢰도가 떨어진다고 볼 수 있다. 이러한 신뢰도의 특성을 반영하여 본 논문에서는 사후확률(*posterior probability*)을 각 구분기의 식별결과에 대한 신뢰도로 정의하여 사용한다. 베이즈 정리를 이용하여 사후확률을 신뢰도로 표현하면 다음과 같다.

$$C(i/\hat{i}) = \frac{P_{lik}(\hat{i}/i)P_{pri}(i)}{P(\hat{i})} \quad (4)$$

여기서, P_{lik} 는 우도함수(*likelihood function*), P_{pri} 는 사전 확률, $P(\hat{i})$ 는 정규화 상수를 나타낸다. 식 (4)에서 우도함수는 구분기의 식별 성능(식별률)을 나타내는 값으로서 신뢰도가 식별 성능이 비례한다는 특성을 잘 반영하고 있다.

3-2 신뢰도 인자

식 (4)에서 우도함수 $P_{lik}(\hat{i}/i)$ 는 각 기종에 대한 단일 구분기의 평균적인 식별 성능을 나타낸다. 따라서 추정된 기종이 같다면 우도함수는 항상 같은 값을 가지기 때문에 동일한 신뢰도 값을 가지게 된다. 예를 들어 단일 구분기의 식별결과가 기종 1번이면 해당 구분기의 우도함수와 식 (4)로부터 식별결과에 대한 신뢰도 값을 계산할 수 있다. 만약 다음 시도에서도 같은 기종 1번으로 추정되었다면 동일한 우도함수를 사용하므로 신뢰도 값도 동일할 것이다. 이것은 식 (4)의 우도함수가 식별조건이나 식별 결과를 고려하지 않고 구분기의 평균적인 식별 성능을 나타낸 값이기 때문이다. 따라서 이를 사용하여 두 구분기를 융합하면 추정된 기종이 같다면 항상 구분기 융합 가중치도 같아지게 된다. 구분기의 식별 성능은 식별이 이루어지는 조건(관측각도, SNR 등)이나 식별수행 결과

(확신도 등)에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 JEM 구분기의 경우에 항공기 정면을 기준으로 10~30도의 관측각도에서 좋은 식별 성능을 나타내지만, 정면이나 측면에서는 식별 성능이 떨어지거나 불가능할 수 있다. 반면, HRRP 구분기는 전 방위에서 식별이 가능하지만, 정면에서 보다 우수한 식별 성능을 보이고, 측면으로 갈수록 성능이 떨어지는 특성을 보인다. 따라서 관측각도는 JEM 및 HRRP 구분기의 식별 성능을 좌우하는 인자로 볼 수 있다. 일반적으로 항공기의 관측각도는 추적 레이더로부터의 비행 궤적 정보를 이용하여 추정이 가능하다. 또한, 2-1 및 2-2장에서 언급된 확신도도 신뢰도에 영향을 주는 요소라고 할 수 있다. 확신도가 높으면 식별결과가 맞을 가능성이 높고, 반대로 확신도가 낮으면 틀릴 가능성이 높기 때문이다. 이렇게 신뢰도에 영향을 주는 요소를 본 논문에서는 신뢰도 인자로 정의하고, 신뢰도를 계산하는데 반영한다. 따라서 관측각도 및 확신도에 따라 달라지는 각 구분기의 식별 성능을 반영하여 신뢰도를 표현하면 식 (5)와 같다.

$$C(i/\hat{i}) = \frac{P_{lik}(\hat{i}/i, m, a) P_{pri}(i)}{P(\hat{i})} \quad (5)$$

여기서, m 은 식별 결과에 대한 확신도를, a 는 관측각도를 의미하며, 관측각도와 확신도에 따라 달라지는 우도함수가 된다.

일반적으로 각 구분기의 우도함수는 식별성능 실험을 통해 도출된 혼돈함수(*confusion matrix*)로부터 추정할 수 있다. 우도함수를 정확히 추정하기 위해서는 식별실험에 사용되는 샘플의 수가 많아야 한다. 그러나 식 (5)와 같이 신뢰도 인자 m 및 a 에 따라 구분하고, 각 인자 내에서도 구간별로 나누다 보면 혼돈함수 추정에 필요한 샘플 수가 부족하여 추정 신뢰도가 낮아지게 된다. 특히 발생 빈도가 낮은 경우에는 해당 샘플 자체가 없어서 추정이 불가능할 수도 있다. 따라서 제한된 수의 샘플 데이터를 사용하여 우도함수를 추정할 때 보다 안정적으로 추정할 수 있는 방법이 필요하다. 확신도 m 에 따라 변화하는 우도함수는 m 이 커지면 식별성능이 좋아지고, m 이 작아지면 식별성능이 나빠지는 경향을 보인다. m 의 변화에 따라 평균 식별률은 변하지만, 각 클래스 간의 상대적인 식

별률은 변하지 않는다고 가정하면 m 에 따라 변하는 우도함수 $P_{lik}(\hat{i}/i, m)$ 은 $P_{lik}(\hat{i}/i)$ 와 m 의 곱에 비례한다고 볼 수 있다. 관측각도를 포함하여 좀 더 정확히 표현하면 확신도 및 관측각도에 따라 달라지는 평균 식별률 $P_c(m, a)$ 에 비례한다고 볼 수 있다. 따라서 확신도 및 관측각도에 따라 변하는 우도함수 $P_{lik}(\hat{i}/i, m, a)$ 은 식 (6)과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$P_{lik}(\hat{i}/i, m, a) \simeq \frac{P_c(m, a)}{\overline{P_c}} P_{lik}(\hat{i}/i), \text{ for } \hat{i} = i \quad (6)$$

여기서, $\overline{P_c} = \frac{1}{T} \sum_{i=1, \hat{i}=i}^T P_{lik}(\hat{i}/i)$ 로 구분기의 전체 평균 식별률을 나타낸다. 어느 클래스의 식별률이 증가하면 타 클래스로 잘못 식별하는 오식별($\hat{i} \neq i$ 인 경우)은 감소하므로 오식별률은 $P_c(m, a)$ 에 반비례한다고 볼 수 있다. 따라서 $\hat{i} \neq i$ 인 경우의 $P_{lik}(\hat{i}/i, m, a)$ 은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{lik}(\hat{i}/i, m, a) \simeq \beta_i \cdot P_{lik}(\hat{i}/i), \text{ for } \hat{i} \neq i \quad (7)$$

여기서, $\beta_i = \frac{1 - P_{lik}(i/i, m, a)}{1 - P_{lik}(i/i)}$ 으로 우도함수에서 각 클래스 별 식별률 합이 1이 되면서 오식별률 변화를 반영한 값이다. 식 (6) 및 (7)과 같이 $P_c(m, a)$ 를 사용하여 우도함수를 근사적으로 추정하면 각 클래스별로 샘플을 나눌 필요가 없어 샘플 수 부족 문제를 완화시킬 수 있다. 여기서 $P_c(m, a)$ 는 훈련 데이터를 이용한 식별률 실험으로부터 추정할 수 있다. 즉, 확신도 및 관측각도를 다수의 구간으로 나누어 각 구간별로 식별률을 계산함으로써 이산적인 $P_c(m, a)$ 를 추정할 수가 있다.

지금까지 제안한 HRRP 및 JEM 융합 식별기의 구성도를 도시하면 그림 3과 같다. 그림에서 HRRP 단일 구분기와 JEM 단일 구분기는 2장에서 설명한 구분기를 사용한다. 각 단일 구분기의 식별결과인 클래스(\hat{i})와 확신도(m)를 관측각도(a)와 함께 식 (5)에 대입하여 각 단일 구분기의 신뢰도를 추정한다. 추정된 각 단일 구분기의 신뢰도를 더하여 그 값이 최대가 되는 클래스를 융합식별 결과로 출력한다.

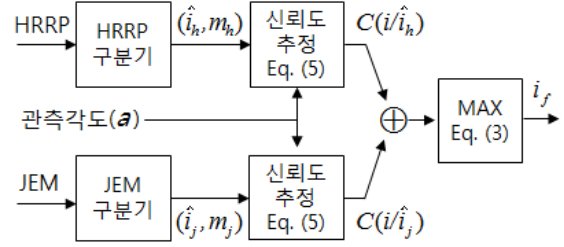


그림 3. 제안한 융합 식별기 구성도

Fig. 3. Structure of the proposed fusion classifier.

IV. 식별 실험 결과

본 장에서는 3장에서 제안한 융합식별 알고리즘을 적용하여 식별실험을 수행하고, 그 결과를 분석한다. 실험에 사용된 HRRP 및 JEM 신호 데이터는 민항기, 전투기, 수송기 등 20종의 항공기를 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 생성하였다.

먼저 JEM 신호는 참고문헌 [10], [11]의 수식 모델링을 기반으로 제트엔진의 단(stage) 간의 상호변조(inter-modulation) 및 축회전속도(spool rate) 하모닉 특성을 반영하여 생성하였다. JEM 신호 생성을 위한 레이더의 주파수는 10 GHz, PRF는 120 kHz, 펄스의 개수는 16,384를 사용하였다. JEM 신호는 360도 범위에서 5도 간격으로 생성하여 JEM 신호 DB를 구성하였다. JEM 구분기의 식별용 DB는 제트 항공기 20종의 엔진 블레이드(1~3단)의 개수로 구성된다.

HRRP 데이터를 생성하기 위하여 항공기 CAD 모델로부터 RCS를 해석을 수행하였다. RCS 해석을 위한 레이더의 주파수는 10 GHz, 대역폭은 500 MHz이고, 고각은 0도, 방위각은 360도 범위에서 0.1도 간격으로 해석하였다. 해석된 RCS로부터 생성한 HRRP(해상도 0.3 m)를 1도 간격으로 평균하여 HRRP 구분기의 식별용 DB(HRRP template)를 구성하였다. 또한, 해석된 RCS로부터 360도 범위에서 5도 간격으로 72개의 산란점 세트로 산란점 DB를 구성하였다.

우도함수 추정 및 융합 식별용 시험 데이터를 생성하기 위하여 JEM 신호 DB와 산란점 DB를 이용하여 임의의 각도에 대한 JEM 및 HRRP 신호 12,000세트(기종 당 600세트)를 생성하였다. 신호 생성을 위해 사용된 레이더

의 파라미터는 RCS 해석에서 사용된 것과 동일하다. 12,000세트 중에서 10,000 세트는 각 단일 구분기의 우도 함수를 추정하는데 사용하고, 나머지 2,000세트는 융합 식별 실험을 수행하는데 사용하였다.

그림 4는 확신도 따른 식별률을 나타낸 그림이다. 확신도가 증가함에 따라 식별률이 증가하는 특성이 있지만, 확신도에 따른 식별률 값은 각 구분기별로 다른 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 관측각도에 따른 식별률을 나타낸 그림이다. HRRP의 경우에 측방위를 제외하고, 우수한 식별 성능을 보이고 있다. JEM의 경우에는 정면 부근에서는 도플러가 관측이 되지 않아 식별률이 낮고, 30도 이상의 측면에서는 신호가 관측되지 않아 식별을 수행하지 않았다.

그림 6은 제안한 HRRP 및 JEM 융합식별 기법에 대하여 관측각도에 따른 식별률을 도시한 그림이다. JEM 식별기 단독으로 사용할 때는 정면에서 식별이 어려웠지만,

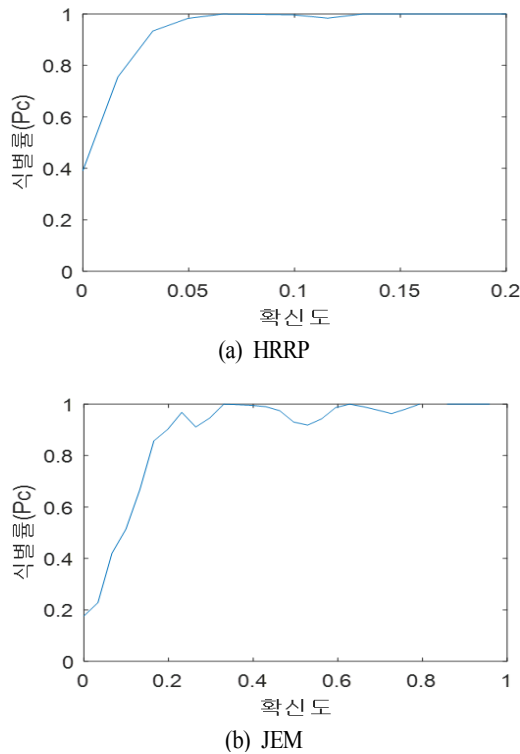


그림 4. 신뢰도 인자에 따른 식별률($P_c(m)$)
Fig. 4. Classification rate with respect to confidence factor.

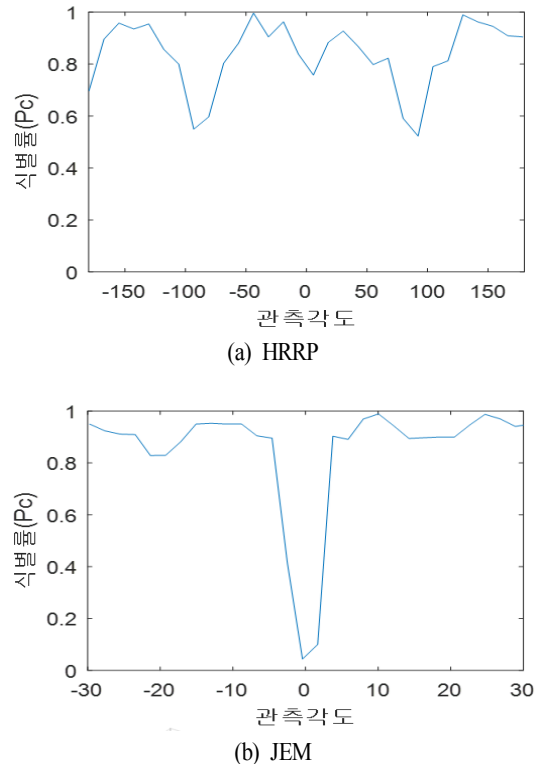


그림 5. 관측각도에 따른 식별률($P_c(a)$)
Fig. 5. Classification rate with respect to aspect angle.

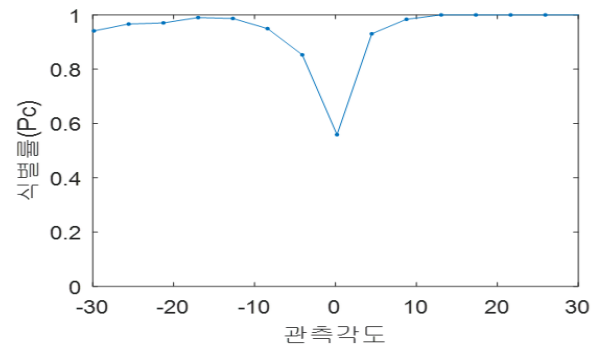


그림 6. HRRP-JEM 융합 구분기의 관측각도에 따른 식별률($P_c(a)$)
Fig. 6. Classification rate of the HRRP-JEM fusion classifier with respect to aspect angle.

융합한 후에는 정면에서도 식별률이 좋으며, 전반적으로 식별률이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 HRRP-JEM 융합 식별기의 표적별 식별결과를 나타내고 있

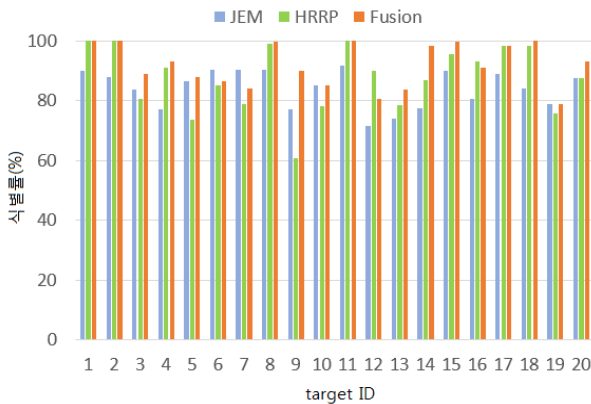


그림 7 HRRP-JEM 융합 구분기의 표적별 식별률
Fig. 7. Classification rate of the HRRP-JEM fusion classifier with respect to targets.

다. 대부분의 표적에 대해서 JEM 또는 HRRP 단독으로 사용할 때보다 높은 식별 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

표 1은 융합 방법에 따른 식별률을 비교하고 있다. 실험에 사용된 각 융합 방법에 대한 정의는 아래와 같다.

- 매칭 스코어 합: 각 단일 구분기의 식별과정에서 계산되는 클래스별 매칭 스코어(JEM 구분기에서는 마스크 스코어, HRRP 구분기에서는 상호상관계수를 의미함)를 더하여 그 값이 최대가 되는 클래스를 선택^[9]
- 선택 융합(확신도 비교): 각 단일 구분기에서 출력되는 확신도 값을 비교하여 큰 값을 가지는 구분기의 결과를 선택
- 신뢰도 합(제안한 방법): 관측각도 및 확신도에 따른

표 1. 융합 방법에 따른 식별률 비교
Table 1. Comparison of classification rate according to fusion methods.

융합 방법	식별률(%)
HRRP 단일 구분기	88.9
JEM 단일 구분기	84.2
매칭 스코어 합	90.8
선택 융합(확신도 비교)	88.4
신뢰도 합(제안한 방법)	93.6

단일 구분기의 신뢰도 합이 최대가 되는 클래스를 선택

식별결과 표를 보면, HRRP 및 JEM 단일 구분기는 각각 88.9 %와 84.2 %의 식별률을 보이고 있다. 매칭 스코어 합 비교 융합 방법은 식별률이 90.8 %로 단일 구분기보다 2 % 정도 향상된 성능을 얻었다. 두 단일 구분기의 식별과정에서 계산되는 매칭스코어를 더하여 동시에 고려함으로써 단일 식별보다 나은 식별성능을 얻을 수 있었다. 하지만 각 구분기의 매칭 스코어는 그 특성이 서로 달라, 단순히 더하는 것만으로는 최적의 융합 성능을 얻을 수는 없었다. 확신도를 비교하여 선택하는 융합 방법의 식별률은 88.4 %로 단일 구분기의 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 그림 4에서 보는 바와 같이, 확신도가 식별 성능에 비례하는 특성을 보이긴 하지만, 두 구분기의 비례관계 특성이 서로 다르기 때문이다. 즉, 같은 확신도를 가지더라도 두 구분기는 서로 다른 식별성능을 보이기 때문에 단순히 확신도를 비교하여 좋은 구분기를 선택할 수는 없었다. 마지막으로 제안한 신뢰도 비교 방법은 93.6 %로 가장 좋은 식별 결과를 보였다. 제안한 방법은 확신도에 따른 식별성능과 표적별 식별성능을 모두 반영하여 보다 정확하게 구분기의 신뢰도를 추정함으로써 가장 좋은 식별 성능을 얻을 수가 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 항공기 식별을 위해 HRRP 구분기와 JEM 구분기를 융합하여 식별하는 방법을 제안하였다. 관측각도 및 식별 결과에 대한 각 단일 구분기의 신뢰도를 가중치로 융합함으로써 다양한 상황에서 단일 구분기보다 향상된 식별 성능을 얻을 수 있었다. 각 구분기의 신뢰도는 식별결과와 확신도 및 관측각도에 따른 구분기의 성능으로부터 추정한 사후확률을 사용하였다. 20종의 항공기에 대하여 RCS 예측 시뮬레이션을 통해 모의한 HRRP 데이터와 수학적으로 모델링된 JEM 신호를 사용하여 식별실험을 수행한 결과, 제안한 융합 식별 기법이 단일 식별결과보다 나은 결과를 얻을 수 있었다. 제안한 신뢰도 기반 융합 방법은 단일 구분기의 식별 알고리즘에 관계없이 서로 보완적인 단일 구분기를 효과적으로 융합하

는데 폭넓게 적용 가능하다는 장점을 가진다.

References

- [1] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 2001.
- [2] Peter Tait, "Introduction to radar target recognition", *IEE*, 2005.
- [3] J. Chadwick, G. L. Williams, "Air target identification - Concept to reality", *Radar Systems, 2007 IET International Conference* on, pp. 1-5, 2007.
- [4] Mark R. Bell, Robert A. Grubbs, "JEM modeling and measurement for radar target identification", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 73-87, 1993.
- [5] 김시호, 김찬홍, 채대영, "제트 엔진 변조신호에서 주파수 마스킹을 이용한 표적의 특징 추출 및 식별", *한국전자과학회논문지*, 25(4), pp. 459-466, 2014년.
- [6] 박지훈, 배준우, 강성철, 김찬홍, 명로훈, "항공기 표적의 레이더 반사 신호에서 제트엔진 정보를 추출하기 위한 자동화 알고리즘", *한국전자과학회논문지*, 25(6), pp. 690-699, 2014년.
- [7] A. Zyweck, R. E. Bogner, "Radar target classification of commercial aircraft", *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 598-606, 1996.
- [8] H. Li, S. Yang, "Using range profiles as feature vectors to identify aerospace objects", *IEEE Trans. Antennas. Propag.*, vol. 41, no. 3, pp. 261-268, 1993.
- [9] U. G. Mangai, S. Samanta, S. Das, and P. R. Chowdhury, "A survey of decision fusion and feature fusion strategies for pattern classification", *IETE Technical Review*, vol. 27, iss. 4, 2010.
- [10] J. Martin, B. Mulgrew, "Analysis of the theoretical radar return signal from aircraft propeller blades", *IEEE International Radar Conference*, pp. 569-572, 1990.
- [11] J. Martin, B. Mulgrew, "Analysis of the effect of blade pitch on the return signal from rotating aircraft blades", *IEE Radar 92 International Conference*, Brighton, UK, pp. 446-449, 1992.

김 시 호



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2006년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
 2011년 1월~현재: 국방과학연구소 연구원

원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 표적 인식

채 대 영



2006년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
 2008년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2008년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

표적 인식

이 상 인



1983년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1988년 10월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템, 표적특성

분석 및 식별