



드론과 조류의 분별을 위한 효과적인 미세 도플러 특성벡터 연구

윤세원*¹, 차상빈*², 황석현*³, 정주호**², 박상홍***³

Study on Effective Micro-Doppler Feature for Classifying Drones and Birds

Se-Won Yoon*¹, Sang-Bin Cha*², Seok-Hyun Hwang*³, Joo-Ho Jung**², and Sang-Hong Park***³

‘이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음’

요 약

최근 들어 드론의 군사적사용과 민간에서의 활발한 사용으로 인해 보안을 목적으로한 탐지기술의 필요성이 대두되고 있다. 하지만 드론의 크기와 속력이 조류와 유사하고 레이더 단면적(RCS, Radar Cross Section)이 작기 때문에 서로의 미세운동 차이를 이용하여 분별할 필요가 있다. 본 논문에서는 점 산란 모델링보다 현실적인 PO(Physical Optics) 기반 모델링을 사용하여 미세도플러 영상을 기반으로 시간과 주파수 도메인에서의 반복주기를 특성벡터로 삼고 모노스테틱(Mono-static)과 바이스테틱(Bi-static) 각각의 기반에서 특성벡터의 적절성을 검토하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 각 SNR 환경에서 300번의 반복 시뮬레이션을 수행하였다. 결과적으로, SNR>15dB, 모노스테틱에서는 두 특징에서 90% 이상의 식별 능력을 나타내었고 바이스테틱에서는 하나의 특성벡터에서 90% 이상을 나타냈다.

Abstract

In recent years, military use of drones and active use in the private sector have led to the need for security technologies. However, because the size and speed of the drones are similar to those of birds and the Radar Cross Section(RCS) is small, it is necessary to distinguish between each other using the micro motion differences. In this paper, we use realistic physical optics (PO) -based modeling rather than point scattering modeling, and use it as a feature in the time and frequency domain based on Micro-Doppler images and examined the suitability of the features on the basis of 'mono-static' and 'bi-static' respectively. And we performed 300 repetitive simulations in each SNR environment through simulation. As a result, SNR > 15dB, in mono-static, showed more than 90% discrimination ability in both features and in bi-static showed, more than 90% in one feature.

Keywords

drones, birds, feature extraction, micro-doppler, UAV

* 부경대학교 전자공학과 석사과정
- ORCID¹: <https://orcid.org/00000003-0514-708X>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0001-7515-0650>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0002-3582-8591>
** 카이스트 무인 기술 연구 센터 연구교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7087-8079>

*** 부경대학교 전자공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8512-1431>

• Received: Dec. 26 2018, Revised: Feb. 21, 2019, Accepted: Feb. 24, 2019

• Corresponding Author: Sang-Hong Park
Dept. of Electronic Engineering, Pukyong National University Korea,
Tel.: +82-51-629-6224, Email: radar@pknu.ac.kr

1. 서론

기존의 드론은 기술적인 한계와 그로인한 고가의 가격으로 몇몇 특수한 목적에서만 이용되어왔다. 하지만 최근 들어 앞서 언급한 문제점이 상당부분 완화되어 개인이 쉽게 사용할 수 있게 되었고 다양한 목적의 드론들이 유통되고 있다. 하지만 드론은 사람이 접근할 수 없는 곳도 어려움 없이 갈수 있기에 그에 따른 악용의 소지도 증가하고 있다. 특히 기존의 보안 시스템은 사람을 대상으로 하여 공중을 대상으로 하고 있지 않기 때문에 특히나 드론에 대항하는 기술의 필요성이 두드러지며 그에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]-[3].

하지만 드론은 크기와 속력이 조류와 비슷하고 레이더 단면적(RCS, Radar Cross Section)이 매우 작기 때문에 서로를 구분하기가 힘들다[4]. 따라서 조류와 드론의 고유 운동으로 인한 미세도플러를 이용해 서로를 식별할 필요가 있다.

미세도플러는 레이더에 대한 표적의 상대속도로 레이더 신호의 주파수가 변조되어 반사되는 도플러 효과를 이용한다. 시간에 따른 반사 신호에 임의의 영역에 한정해 푸리에 변환을 하고 이를 시간지연을 통해 반복하는 STFT(Short-Time Fourier Transform)을 이용하여 레이더의 LOS(Line Of Sight) 방향에 대한 표적 각 부분의 속도 변화를 시간-주파수의 2D 이미지로 나타낼 수 있다[5]. 해당 이미지는 시간에 따른 표적 각 부분의 즉각적인 운동변화를 의미하고 표적의 운동주기와 같은 고유 특징을 발견할 수 있다.

하지만 기존의 기법들은 마이크로도플러 특징을 시간-주파수 영역에서 분석하거나, 또는 시간-주파수 영역 영상과 여기서 얻어내는 주파수를 이용한 식별에 중점을 두었으므로, 높은 식별 성능을 얻기 위하여 각각의 마이크로 도플러 신호를 정교하게 모델링한 후, 이를 바탕으로 한 효과적인 특성벡터 추출 및 분석이 추가적으로 필요하고 최근 들어 매우 활발히 연구되고 있는 서로 다른 송수신부를 가진 바이스태틱(Bi-static) 레이더를 이용한 특성벡터에 대한 연구 또한 필요하다[6].

본 논문에서는 이러한 미세도플러 영상 추출에

대한 기하학적 원리를 소개하고 조류와 드론을 구분하기 위해 보편적으로 사용되는 반복적 운동주기를 이용한 특성벡터에 바이스태틱 레이더를 이용한 추출방법을 제안하였다[6].

특성벡터 추출을 위한 시뮬레이션에 사용된 드론 및 조류는 점 산란 모델링 보다 실제와 유사한 PO(Physical Optics)기반 모델링을 적용하였으며[7], 이를 이용하여 점 산란 모델링으로는 얻을 수 없는 특성벡터 추출에 대해 제안하며 해당 특성벡터의 유용성에 대한 결과를 도시하였다.

II. 신호 모델링 및 특성

2.1 미세운동 모델링 및 PO모델링

조류 미세운동의 기하구조는 그림 1과 같다.

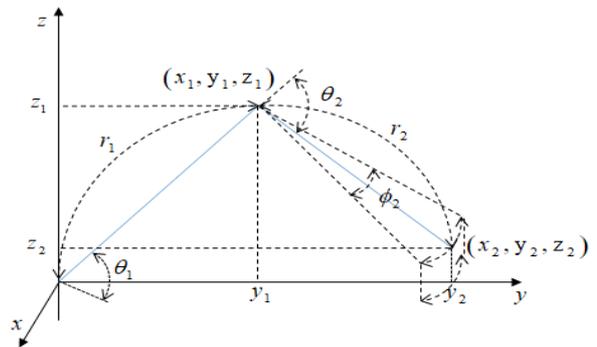


그림 1. 조류 미세운동의 기하구조
Fig. 1. Geophysical structure of birds micro motion

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 40\cos(2\pi f_1 t) + 15 \\ 0 \\ a_1 \cos \theta_1 \\ y_1 \tan(\theta_1) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \\ x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\cos(2\pi f_1 t) + 40 \\ 20\sin(2\pi f_1 t) \\ -(y_2 - y_1) \tan(\phi_2 / \cos(\theta_1 - \theta_2)) \\ y_1 + a_2 \cos \phi_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ z_1 + (y_2 - y_1) \tan(\theta_1 - \theta_2) \end{pmatrix}$$

조류의 운동주기 f_1 과 시간 t 에 따른 미세운동을 수식적으로 표현한 것은 식 (1)과 같다. 원점을 조류의 몸통으로 삼고 r_1 는 상완의 길이, r_2 는 하완의

길이, θ_1 는 상완의 각도, θ_2 는 상완에 대한 하완의 각도, a_1 는 상완의 길이, a_2 는 하완의 길이, ϕ_2 는 하완의 x축에 대한 변화 각도, (x_1, y_1, z_1) 는 상완 끝부분의 좌표, (x_2, y_2, z_2) 는 하완 끝부분의 좌표이다.

해당 기하구조에 보다 현실성 있는 RCS를 구현하기 위하여 운동부인 날개에만 PO기반 모델링을 적용하여 타원체의 형태를 적용하였으며 타원체의 RCS는 다음과 같이 계산되었다.

$$r_{cs} = \frac{\pi(a/2)^4(b/2)^2}{((a/2 \times \sin\theta)^2 + (b/2 \times \cos\theta)^2)^2} \quad (2)$$

$$\theta = \overline{LOS} \cdot \bar{V}$$

여기에서 a 는 타원체의 좁은 부분의 반지름이며 b 는 긴 부분의 반지름, \bar{V} 는 긴 부분의 방향벡터, θ 는 긴 부분에 대한 LOS의 각도이다.

θ 및 \bar{V} 에 따른 RCS를 계산하기 위해 날개 각 부분의 중심과 방향벡터를 구한다.

날개의 상완과 하완의 중심은

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y_1/2 \\ z_1/2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2/2 \\ y_1 + [0.5\cos\phi_2\cos(\theta_1 - \theta_1)]/2 \\ z_1 + [(y_2 - y_1)\tan(\theta_1 - \theta_1)]/2 \end{pmatrix}$$

이며 날개 각 부분의 방향 벡터는

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, V_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이다. 그리고 식 (1)~(4)에서 y축의 값에 역수를 취하면 반대편 날개의 기하구조가 성립한다.

드론의 블레이드 미세운동의 기하구조는 그림 3과 같다.

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2a\cos(2\pi f_2 t) \\ -2a\sin(2\pi f_2 t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

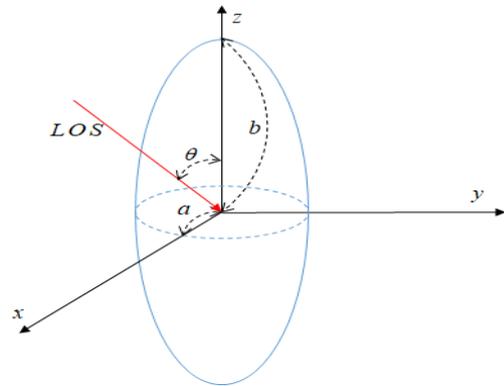


그림 2. 타원체 RCS의 기하구조
Fig. 2. Geometry of the ellipsoid RCS

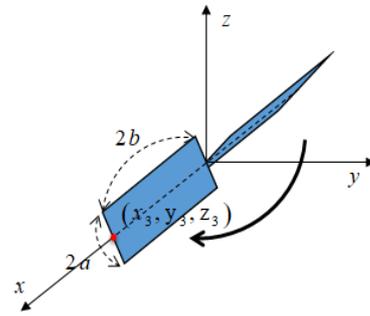


그림 3. 드론의 블레이드 미세운동의 기하구조
Fig. 3. Geophysical structure of drone's blade micro motion

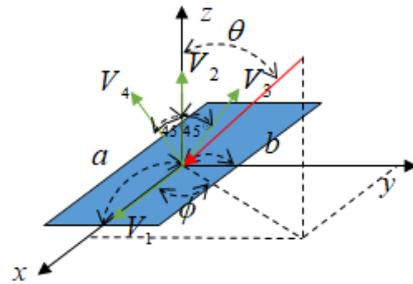


그림 4. 사각 평면의 RCS 기하구조
Fig. 4. Geometry of rectangular flat RCS

원점을 프로펠러의 중심으로 두고 회전방향으로 45° 기울어진 블레이드가 회전축 양단에 배치되어 있는 형태이며 블레이드 끝부분의 좌표는 식 (5)와 같다. f_2 는 드론 블레이드의 회전주파수이다. 조류의 경우와 마찬가지로 운동부인 블레이드에 PO 모델링을 적용하기 위해 점 산란원이 아닌 사각 평면에 대한 반사를 구현한 기하학적 구조는 그림 4와 같다.

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & (6) \\
 V_2 &= \begin{bmatrix} \cos(90) & -\sin(90) & 0 \\ \sin(90) & \cos(90) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot V_1 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 V_3 &= \begin{bmatrix} \cos(45w) & 0 & \sin(45w) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(45w) & 0 & \cos(-45w) \end{bmatrix} \cdot V_2 \\
 V_4 &= \begin{bmatrix} \cos(-45w) & 0 & \sin(-45w) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-45w) & 0 & \cos(45w) \end{bmatrix} \cdot V_2
 \end{aligned}$$

$$\dot{V} = R(t) \cdot V$$

여기에서 a 는 사각평면 긴 변의 절반, b 는 짧은 변의 절반, V_1 은 사각평면 긴 방향의 방향벡터, V_2 는 사각평면 수선의 방향벡터, V_3 는 수선이 y 축 방향으로 45° 기울어진 방향벡터, V_4 는 수선이 -45° 기울어진 방향벡터이며 \dot{V} 는 각 방향벡터에 매 시간에 따른 회전매트릭스 $R(t)$ 을 내적하여 변화된 방향벡터를 나타낸다.

방향벡터는 식 (7)을 통해 RCS를 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 rcs &= \left(\cos\theta \frac{\sin x_k}{x_k} \frac{\sin y_k}{y_k} \right) & (7) \\
 x_k &= (2\pi/\lambda)a \sin\theta \sin\phi \\
 y_k &= (2\pi/\lambda)b \\
 \theta &= \cos^{-1}(-LOS \cdot V_3) \\
 \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{\|LOS \cdot V_4\|}{\|LOS \cdot V_1\|} \right)
 \end{aligned}$$

θ 는 LOS를 xy 평면에 투영 했을 때 V_1 과의 각도, ϕ 는 LOS와 V_2 와의 각도, λ 는 신호의 파장이다.

이를 이용해 상기 모델링된 표적으로부터의 반사 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{k=1}^K rcs_k(t) \exp(j2\pi f_0(t - 2R_k/c)) \quad (8)$$

식 (8)에서 $k(k=1,2,\dots,K)$ 는 산란점의 개수, f_0 는 중심주파수, R 는 레이더에서 산란점까지의 거리, c 는 빛의 속도이다.

레이더의 발신부와 수신부가 다른 바이스테틱의 경우 그림 5와 같은 기하 구조를 가진다.

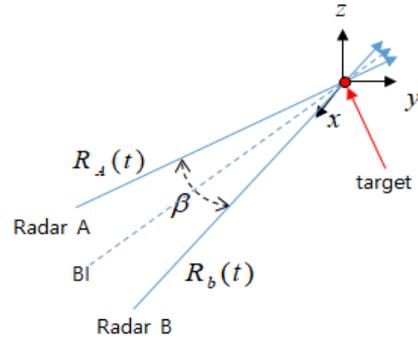


그림 5. 바이스테틱의 기하 구조
Fig. 5. Geophysical structure of bi-static radar

단일 레이더를 사용한 모노스테틱(Mono-static)과 달리 바이스테틱의 경우 서로 다른 송, 수신기의 위치에 따라서 위상의 변화가 생긴다[6]. 이는 두 레이더의 LOS를 내적 한 방향벡터에서 바라본 모노스테틱 반사 신호의 위상과 동일하므로 표적을 $\beta/2$ 만큼 회전시켜 관측한 반사 신호와 같다. 이는 모노스테틱과 다른 방향에서 바라본 것이며 관측각도에 따라 변화하는 특성벡터를 분별에 이용하는데 필요하다. 바이스테틱 반사 신호의 수식적 표현은 식 (9)와 같으며 모노스테틱의 $2R$ 이 각 레이더에서의 표적까지 거리의 합인 $R_A + R_B$ 로 바꾸어 표현되었다.

$$s(t) = \sum_{k=1}^K rcs_k(t) \exp(j2\pi f_0(t - (R_A + R_B)_k/c)) \quad (9)$$

2.2 특성벡터

표적을 분별하기 위해 반사 신호로부터 효과적으로 표적들을 분류하기 위한 특성벡터를 추출할 필요가 있다. 본 논문에서는 RCS의 변화주기, 미세도플러 영상을 이용한 미세운동 변화주파수와 미세도플러 변화폭, 레이더 방향으로의 미세운동과 레이더로부터 멀어지는 방향에 대한 미세운동의 유사도, 모노스테틱 및 바이스테틱 기반의 미세도플러 영상의 유사도의 총 4가지의 특성벡터를 제안한다.

2.2.1 RCS 변화 주기

표적의 미세운동은 일정한 주기를 가지고 있으며 RCS 또한 그 주기를 따라 변해 미세운동의 주기를

알 수 있는 지표가 된다. 따라서 RCS 변화 주기는 다음과 같은 과정을 통해 계산 할 수 있다.

수집된 반사 신호에서 RCS만을 고려하기 위해 절댓값을 취하면 식 (10)과 같다.

$$\|s(t)\| = \|rcs(t)\exp(j2\pi f_0(t-2R/c))\| \quad (10)$$

$$= rcs(t)$$

위상 성분이 제거되어 온전히 시간에 따른 RCS 변화만을 얻을 수 있고 이렇게 얻어진 RCS 변화에 푸리에 변환을 적용하면 RCS 변화 주파수를 얻을 수 있다.

2.2.2 미세도플러 영상을 이용한 특성벡터

미세도플러 영상은 미세도플러를 시간-도플러 영역의 가시적 구분이 가능한 영상으로 나타낼 수 있는 특성을 가져, 조류와 드론의 중요한 특성벡터로 나타낼 수 있다.

이러한 미세도플러 영상을 얻기 위해 수집된 반사 신호를 바탕으로 식 (11)과 같이 STFT를 적용하여 시간-도플러 영상(그림 6(a))을 얻는다.

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-j2\pi fu} du \quad (11)$$

여기서 x 는 수집된 반사 신호이며 $h^*(u-t)$ 는 임의의 영역함수이다[5].

LOS 방향에 대한 미세운동이 없는 주파수 1이하의 저주파 성분을 제거한 뒤 시간 축에 대해 푸리에 변환을 함으로서 시간에 대한 천이 불변을 특징으로 하는 주파수-주파수 도메인의 특성벡터 기반 영상(그림 6(b))으로 가공한다.

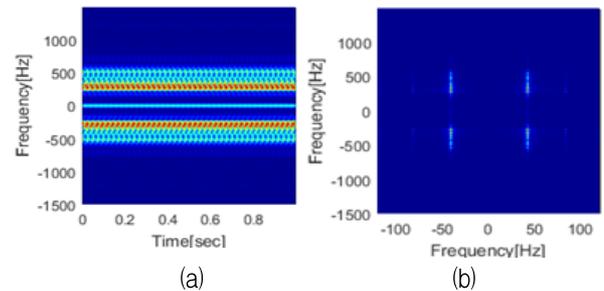


그림 6. (a) 시간-주파수 영상, (b) 주파수-주파수 영상
Fig. 6. (a) Time-frequency image, (b) Frequency-frequency image

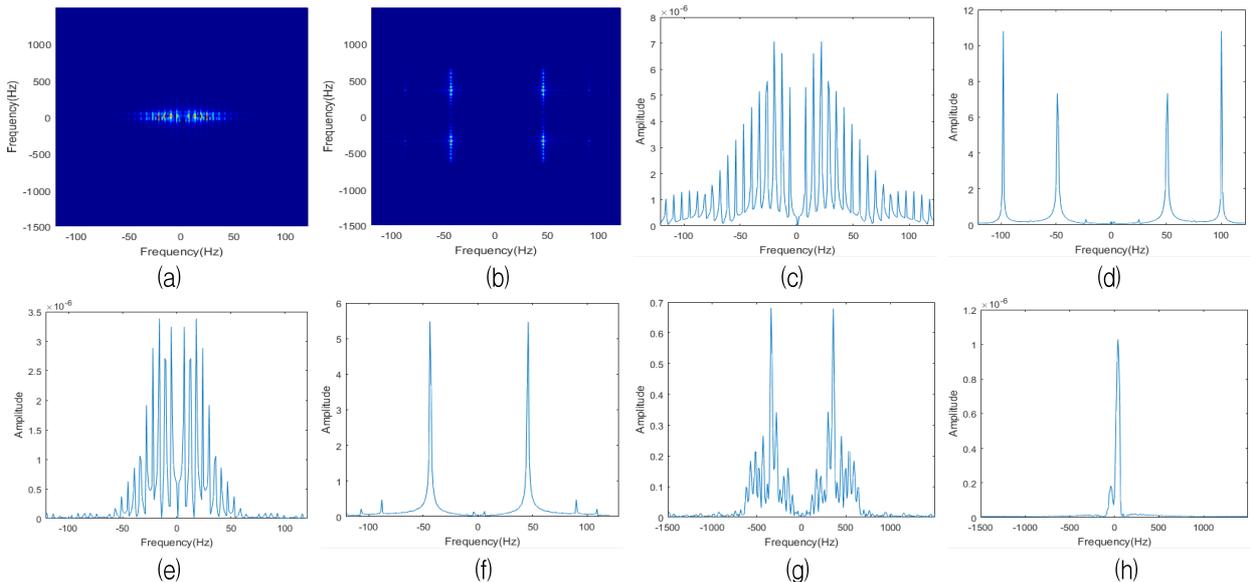


그림 7. (a) 조류의주파수-주파수 영상, (b) 드론의 주파수-주파수 영상, (c) 조류의 RCS변화 주파수 영상, (d) 드론의 RCS변화 주파수 영상, (e) 그림 7(a)의 x축 투영 영상 (f) 그림 7(b)의 x축 투영 영상, (g) 그림 7(a)의 y축 투영 영상, (h) 그림 7(b)의 y축 투영 영상

Fig. 7. (a) Frequency-frequency image of birds, (b) Frequency-frequency image of drones, (c) RCS change frequency image of birds, (d) RCS change frequency image of drones, (e) x-axis projection image of Fig. 7(a), (f) x-axis projection image of Fig. 7(b), (g) y-axis projection image of Fig. 7(a), (h) y-axis projection image of Fig. 7(b)

가) 미세운동 주파수와 미세도플러 변화

이렇게 얻어진 주파수-주파수 영상에서 x축은 기존 시간의 변화에 따른 미세운동 도플러 주파수 변화에 대하여 푸리에 변환한 것이므로 미세운동 변화를 주파수로서 나타낸다. 이에 각 x축에 대해 모든 y축의 값을 합산하는 것으로 2차원 영상을 1차원으로 압축시켜 그림 7(e)(f)와 같은 결과를 얻었으며 미세도플러 변화를 의미하는 y축에 대해 동일한 과정을 거쳐 그림 7(g)(h)의 결과를 얻었다. 이를 이용하여 피크 점의 위치를 특정 하는 것으로 미세운동의 주파수와 변화폭을 얻어낼 수 있었다.

나) 양수와 음수 영역의 유사성

레이더 방향에 대한 운동은 증가된 도플러 주파수의 신호를 반사하고 레이더 반대 방향에 대한 운동은 감소된 도플러 주파수의 신호를 반사한다. 이는 그림 6(b)의 y축 상의 양수와 음수에 해당한다.

드론 프로펠러의 경우 회전 운동을 하므로 레이더방향과 반대방향의 운동이 유사한 반면 조류 날개의 경우 그렇지 않아 이와 같은 특성을 분별에 이용할 수 있다. 이에 주파수-주파수 영상의 y축 중심을 기준으로 양수 영역과 음수 영역의 유사성을 특성 벡터로 이용하였다.

2.2.3 바이스테틱을 이용한 영상 비교

드론의 프로펠러는 회전운동하기 때문에 어느 방향에서 반사 신호를 수집했는가 큰 변수가 되지 못한다. 반면 조류의 경우는 관측 방향에 따른 변화가 크기 때문에 모노스테틱과 바이스테틱의 미세도플러 영상에서 차이가 있다[8][9]. 이를 이용하여 한 표적에 대한 두 가지 주파수-주파수 영상이 얼마나 유사한가를 영상관 영상간의 1대1 매칭을 이용해 특성벡터로 삼았고 기존의 특성벡터 또한 바이스테틱을 이용하여 성능을 비교하였다.

III. 시뮬레이션 결과

3.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션은 매트랩을 이용하였고 표적 식별을

위한 학습데이터는 고정된 지점에서 병진운동이 존재하지 않는 정지비행 시나리오를 바탕으로 구성된 미세도플러 영상 데이터베이스(DB)를 사용하였다. 정지비행 시나리오 기반 훈련 DB 구축을 위해 레이더의 위치를 설정하고 3차원 공간에서 표적은 정지비행 한다. 이때 표적을 다양한 방향에서 관측하여 훈련 DB로 삼으며 훈련 DB 구축을 위한 조건은 표 1과 같다.

표 1. 훈련 DB 파라미터
Table 1. Parameters for training DB

	발신레이더(Tx)	수신레이더(Rx)
Azimuth	0,3,6,...,180°	0,3,6,...,180° + 90°
Elevation	0,-3,-6,...,-90°	0,-3,-6,...,-90°
표적과의 거리	100m	
	드론	조류
회전/날개짓 주기	20~25/s	1.5~3.5/s

표 2. 레이더 파라미터
Table 2. Parameter of radar

신호의 종류	continuous wave
중심 주파수	10GHz
샘플링 주파수	3kHz

본 논문에서 사용된 드론과 조류 두 가지 표적은 PO기반 모델링 되었으며, 훈련 DB를 구성하는 영상의 총 개수는 3600개 이다. 표적은 제자리에서 정지 비행을 가정하였으며 하며 레이더의 관측방향의 Azimuth와 Elevation을 조정하며 데이터를 수집하였다. 관측 레이더의 위치는 표적을 정만으로 바라본 지점에서 Azimuth 각도 $0 \leq \theta_{azi} \leq 180$, Elevation 각도 $-90 \leq \theta_{ele} \leq 0$ 범위 내에서 3° 간격의 변화를 주며 표적의 반사 신호를 수집하였다.

시뮬레이션에서 표적분별을 위한 총 600개의 시험 DB를 구성하였다. 시뮬레이션 기하 구조는 다음 그림 8과 같다.

시험 데이터의 경우 훈련데이터와 동일한 관측 범위 내의 무작위 각도에서 표적을 관측한 반사 신호를 사용하였다. 모노스테틱의 경우 발신레이더(Tx)로 신호를 쏘고 받았으며 바이스테틱의 경우 Tx에 대해 Azimuth 각도가 90° 벌어져있는 위치에 수신레이더(Rx)가 위치하여 신호를 수집하였다.

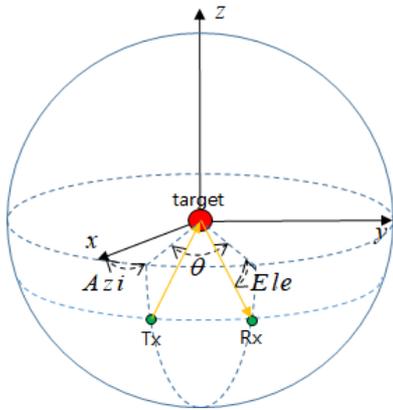


그림 8. 시뮬레이션의 기하구조
Fig. 8. Geophysical Structure of simulation

이를 nearest neighbor 구분기를 이용해 조류와 드론을 분별하고 within-between class를 통해 얼마나 잘 분리 되었는가를 수치적으로 나타내었다[10].

표적 식별 성능은 식 (12)와 같이 전체 시험 데이터 중에서 올바르게 구분한 수의 비율로 정의하였다.

$$P_c = \frac{\text{올바르게 구분한 수}}{\text{전체 시험 데이터 수}} \times 100[\%] \quad (12)$$

그리고 within-between class를 표현하는 수식적 표현은 식 (13)과 같다.

$$S_w = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \left[\frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} (y_i^k - \mu_k)^T (y_i^k - \mu_k) \right] \quad (13)$$

$$S_b = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c (\mu_k - \mu)^T (\mu_k - \mu)$$

$$S_t = \frac{S_b}{S_w}$$

여기서 S_w 는 단일 클래스가 얼마나 잘 모여 있는지를 보여주는 within-class, S_b 는 각 클래스의 평균이 서로 얼마나 멀리 떨어져 있는지를 보여주는 between-class, S_t 는 S_w 와 S_b 를 이용하여 각 클래스 간 얼마나 잘 구분되는지를 보여주는 척도이다. c 는 클래스의 수, n_k 는 클래스별 데이터의 수이며 y_i 는 각 데이터, μ_k 는 클래스별 평균, μ 는 전체 데이터의 평균을 의미한다[11].

3.2 시뮬레이션 결과

훈련데이터를 기반으로 식 (10)을 통해 얻어진 특성벡터간의 within-between class는 표 3과 같이 얻을 수 있었다.

특이점으로는 ‘모노스테틱과 바이스테틱 영상간의 비교’의 경우 elevation에 따라 다른 within-between class를 보여주며 이는 표 4와 같으며 elevation 0° ~ -45° 구간에서 높음을 확인할 수 있다.

표 3. 특성벡터의 within-between class
Table 3. Within-between class of feature

특성벡터	within-between class
RCS 변화 주기	67.8890
미세운동 주파수	42.3524
미세도플러 변화	11.6796
양수와 음수 영역의 유사성	0.2068
mono-static과 bi-static 영상간의 비교	2.2792

표 4. 모노스테틱과 바이스테틱 영상간의 비교
Table 4. Comparison between mono static and bi-static images

elevation	within-between class
0° ~ -15°	270.1242
-15° ~ -30°	249.1089
-30° ~ -45°	17.9141
-45° ~ -60°	4.3299
-60° ~ -75°	0.0222
-75° ~ -90°	1.3364

그림 9는 특성벡터 ‘RCS 변화 주기’에 대해 각 시뮬레이션 반사신호에 가우시안 백색잡음을 더하여 조정된 SNR에 대한 정확한 표적분별 확률을 나타낸다. 그림 8에서 보는 바와 같이, 0dB 이상의 SNR에서 모노스테틱과 바이스테틱 모두 90% 이상의 높은 분별 성능을 확인할 수 있었다.

그림 9에서 모노스테틱 상에서 SNR에 따른 특성벡터별 분별능력을 나타낸다. RCS 변화 주기의 경우 0dB 이상의 SNR에서 90% 이상의 높은 분별 성능 보이고 ‘미세운동 주파수’의 경우 15dB 이상에서 97.5% 이상의 정확도를 보이지만 나머지 특성벡터 ‘미세도플러 변화폭’, ‘양수와 음수 영역의 유사도’의 경우 분별이 전혀 되지 않음을 확인할 수 있었다.

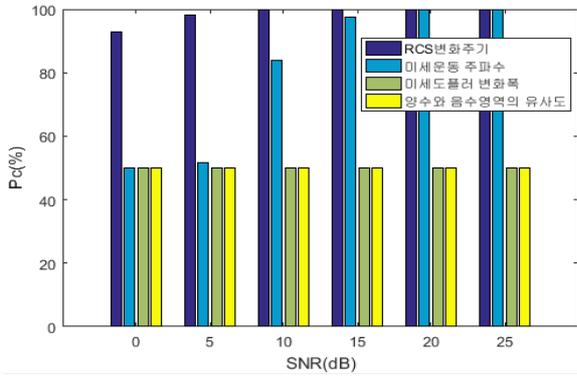


그림 9. 모노스테틱을 이용한 특성벡터별 분별능력
Fig. 9. Ability to identify by feature using mono-static

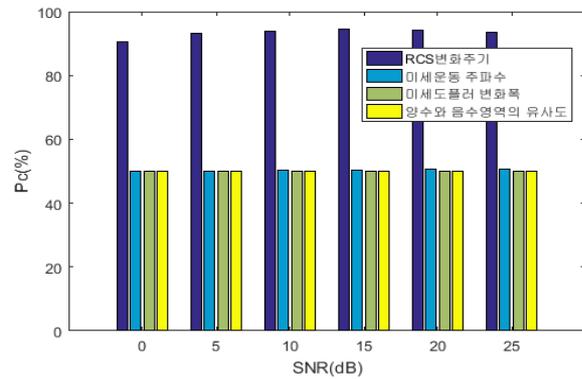


그림 10. 바이스테틱을 이용한 특성벡터별 분별능력
Fig. 10. Ability to identify by feature using bi-static

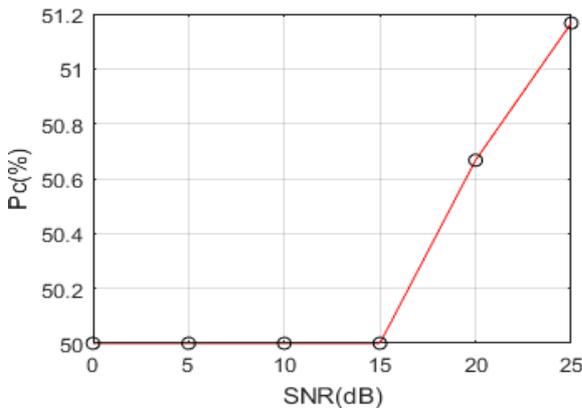


그림 11. 모노스테틱과 바이스테틱 영상간의 유사성
Fig. 11. Similarity between mono-static and bi-static images

모노스테틱이 아닌 바이스테틱을 이용한 분별능력은 그림 10에서 확인할 수 있으며 ‘RCS 변화 주기’만이 0dB 이상에서 90% 이상의 분별능력을 보여주었지만 모노스테틱에 비해 낮은 수치를 보여주었고 나머지 특성벡터의 경우 전혀 분별되지 않았다.

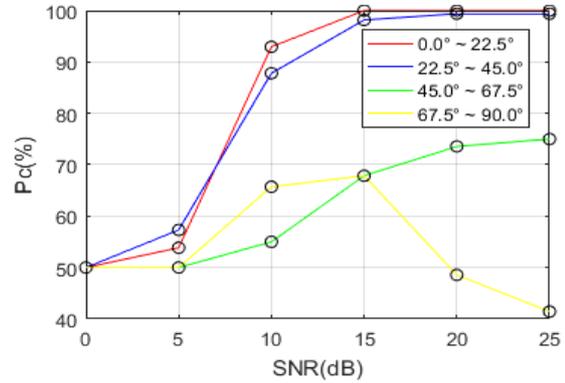


그림 12. elevation에 따른 모노스테틱과 바이스테틱 영상간의 유사성

Fig. 12. Similarity between mono-static and bi-static images due to elevation

그림 11의 모노스테틱과 바이스테틱 영상간의 유사도를 이용한 분별능력이며 분별이 되지 않음을 확인했지만 표 4에서의 높은 분별정도를 나타내었던 0° ~ 45°에 해당하는 표적의 훈련데이터를 기반으로 삼아 elevation별 표적의 분별정도를 나타내었으며 0° ~ 45°의 표적에 대해 15dB 이상에서 98% 이상의 정확도를 보였다(그림 12).

IV. 결 론

본 논문에서는 정지비행 표적에 대해 도플러효과로 인한 반사 신호를 획득하고, 이를 이용해 얻어낸 특성벡터의 표적 분별 성능을 분석하였으며, 또한 모노스테틱 뿐만 아니라 과 바이스테틱을 이해용한 분별을 제시하였다. ‘RCS 변화 주기’의 경우 낮은 SNR에 대해서도 높은 분별 능력을 확인 할 수 있었으며 ‘미세운동 주파수’에서도 모노스테틱의 경우 15dB 이상에서 높은 분별 성능을 보여주었다. 다른 종류의 특성벡터의 경우 분별에 실패하였고 바이스테틱의 모든 특성벡터에 대해 모노스테틱보다 낮은 확률의 분별정도를 나타내었다. 그럼에도 모노스테틱과 바이스테틱을 동시에 사용하여 서로의 영상을 비교하는 것으로 elevation 0° ~ 45° 사이에서 높은 분별 능력을 보였다. 해당 각도는 실질적으로 표적이 존재하는 대부분의 영역이므로 작은 사각을 제외하면 대부분의 표적을 분별할 수 있다.

본 논문은 가상의 정지비행만을 고려하였으며,

실제 표적의 경우 병진운동이 포함되어 그에 대한 보상이 필요할 것으로 보인다. 본 저자는 이에 더해 편대비행 표적까지 고려하여 연구를 수행 할 예정이며 계속해서 보다 정확도 높은 특성벡터를 찾을 예정이다.

References

[1] W. S. Lee, "A Study on Legal Issues of Crime Prevention with Advanced Science Technology", KOREAN CRIMINOLOGICAL REVIEW, Vol. 27, No. 2, pp. 231-262, Jun. 2016.

[2] P. Molchanov, K. Egiazarian, J. Astola, R. I. A. Harmanny, and J. J. M. de Wit, "Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures", 2013 European Radar Conference, Nuremberg, pp. 172-175, 2013.

[3] M. Ritchie, F. Fioranelli, H. Griffiths, and B. Torvik, "Micro-drone RCS analysis", 2015 IEEE Radar Conference, Johannesburg, pp. 452-456, 2015.

[4] E. Vattapparamban, İ. Güvenç, A. İ. Yurekli, K. Akkaya and S. Uluğaç, "Drones for smart cities: Issues in cybersecurity, privacy, and public safety", 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Paphos, pp. 216-221, 2016.

[5] W. Lu and Q. Zhang, "Deconvolutive Short-Time Fourier Transform Spectrogram", in IEEE Signal Processing Letters, Vol. 16, No. 7, pp. 576-579, Jul. 2009.

[6] J. I. Glaser, "Some results in the bistatic Radar Cross Section(RCS) of complex objects", Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 5, pp. 639-648, May 1989.

[7] V. Chen, "The Micro-Doppler Effect in Radar", Artech House, Norwood, MA, 2011.

[8] M. Martorella, D. Cataldo, and S. Briskin, "Bistatically equivalent monostatic approximation for bistatic ISAR", 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13), Ottawa, ON, pp. 1-5, 2013.

[9] Sung-Jun Lee and In-Sik Choi, "Performance Comparison for Radar Target Classification of Monostatic RCS and Bistatic RCS", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 21, No. 12, pp. 1460-1466, Dec. 2010.

[10] T. Cover and P. Hart, "Nearest neighbor pattern classification", in IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 13, No. 1, pp. 21-27, Jan. 1967.

[11] P. Debba, M. A. Cho, and R. Mathieu, "Within- and between-class variability of spectrally similar tree species", 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, pp. IV-272-IV-275, 2009.

저자소개

윤 세 원 (Se-Won Yoon)



2017년 2월 : 부경대학교
전자공학과(공학사)
2017년 3월 ~ 현재 : 부경대학교
전자공학과(석사과정)
관심분야 : 레이더표적인식, 레이더
영상, 레이더 신호처리

차 상 빈 (Sang-Bin Cha)



2017년 2월 : 부경대학교
전자공학과(공학사)
2017년 3월 ~ 현재 : 부경대학교
전자공학과(석사과정)
관심분야 : 레이더표적인식, 레이더
영상, 레이더 신호처리

황 석 현 (Seok-Hyun Hwang)



2017년 2월 : 부경대학교
전자공학과(공학사)
2017년 3월 ~ 현재 : 부경대학교
전자공학과(석사과정)
관심분야 : 레이더표적인식, 레이더
영상, 레이더 신호처리

정 주 호 (Joo-Ho Jung)



1991년 2월 : 공군사관학교
전자공학과(공학사)
1995년 2월 : 서울대학교
전자공학과(공학사)
1998년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2007년 2월 : 포항공과대학교

전자전기공학과(공학박사)

2013년 2월 : 고려대학교 경영학과(MBA)

2016년 1월 ~ 현재 : KAIST 무인화기기술연구센터 교수

관심분야 : 풍력단지 EMI/EMC 분석, 포탄 RCS 분석 등

박 상 흥 (Sang-Hong Park)



2004년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학사)
2007년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2010년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학박사)
2010년 9월 ~ 현재 : 부경대학교

전자공학과 교수

관심분야 : 미세도플러 분석, 풍력단지 EMI/EMC 분석,
레이더표적인식, 레이더영상, 레이더 신호처리, 등