



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

드론과 조류의 분별을 위한 효과적인  
미세도플러 특성벡터 연구



2019년 2월

부경대학교 대학원

전자공학과

윤세원

공 학 석 사 학 위 논 문

드론과 조류의 분별을 위한 효과적인  
미세도플러 특성벡터 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

윤 세 원

윤세원의 공학석사 학위논문을 인준함.

2019년 2월 22일



주 심 공학박사 이 원 창 (인)

위 원 공학박사 임 창 현 (인)

위 원 공학박사 박 상 홍 (인)

# 목 차

<b>Abstract</b> .....	iv
<b>제1장 서론</b> .....	1
<b>제2장 본론</b> .....	3
1. 미세운동 모델링 및 PO모델링 .....	3
가. 조류의 모델링 .....	3
나. 드론의 모델링 .....	6
2. 특성벡터 .....	10
가. RCS변화 주기 .....	10
나. 미세도플러 영상을 이용한 특성벡터 .....	11
(1) 미세운동 주파수와 미세도플러 변화 .....	12
(2) 양수와 음수 영역의 유사성 .....	12
(3) bi-static을 이용한 영상 비교 .....	13
<b>제3장 실험 결과</b> .....	14
1. 시뮬레이션 조건 .....	14
2. 시뮬레이션 결과 .....	17
<b>제4장 결론</b> .....	21
<b>참고문헌</b> .....	22
<b>부록</b> .....	24

## 그림 목차

[그림 2.1] 조류 미세운동의 기하구조 .....	3
[그림 2.2] 타원체 RCS의 기하구조 .....	5
[그림 2.3] 드론의 블레이드 미세운동의 기하구조 .....	6
[그림 2.4] 사각 평면의 RCS 기하구조 .....	7
[그림 2.5] bi-static의 기하 구조 .....	9
[그림 2.6] (a)시간-주파수 영상, (b)주파수-주파수 영상 .....	11
[그림 2.7] (a)시간-주파수 영상, (b)주파수-주파수 영상 .....	12
[그림 3.1] 시뮬레이션의 기하구조 .....	15
[그림 3.2] mono-static을 이용한 특성벡터별 분별능력 .....	18
[그림 3.3] bi-static을 이용한 특성벡터별 분별능력 .....	19

## 표 목차

[표 3.1] 훈련 DB 파라미터 .....	14
[표 3.2] 레이더 파라미터 .....	15
[표 3.3] 특성벡터의 within-between class .....	17
[표 3.4] mono-static과 bi-static 영상간의 비교 .....	18



# Study on Effective Micro-Doppler feature for classifying Drones and Birds

Se Won Yoon

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

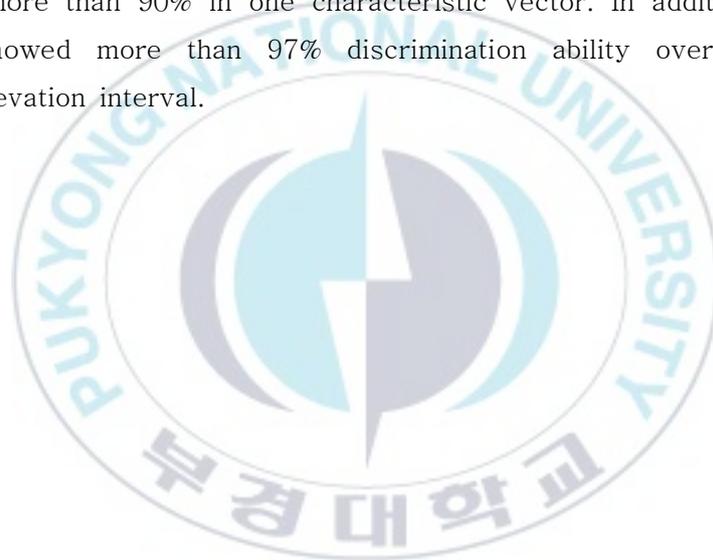
## Abstract

Conventional drones have been used for a few specific purposes with technical limitations and high prices. In recent years, however, the aforementioned problems have been alleviated to a large extent, making it easier for individuals to use them and for various purposes. However, the drones can go where people can not approach without difficulty, so the possession of the abuse is increasing. In particular, existing security systems do not target the public to humans, so the need for technology against the drones is particularly prominent.

However, drones are difficult to distinguish because they are similar in size and speed to birds and the Radar Cross Section (RCS) is very small. Therefore, it is necessary to identify each other using fine Doppler due to the proper motion of birds and drone.

Micro-Doppler uses the Doppler effect in which the frequency of the radar signal is modulated and reflected at the relative speed of the target to the radar. The velocity of the target portion in the direction of the line of sight (LOS) of the radar using a short-time Fourier transform (STFT) Can be represented as a time-frequency 2D image. The image implies an instantaneous change in motion of the target portion over time and can discover unique features such as the motion cycle of the target.

In this paper, we propose extracting Micro-Doppler from micro-motion of drones and birds to obtain several feature for discrimination. And the efficiency of the proposed method is verified through simulations using Physical Optics (PO) based modeling which is similar to realistic point scattering modeling. The reflection signals of the two objects being formed were generated by randomly selecting each variable within a certain range. In order to reduce the measurement error, 300 repetitive simulations were performed in each SNR environment. As a result, mono-static with  $\text{SNR} > 15\text{dB}$  showed more than 90% discrimination ability in two features and bi-static more than 90% in one characteristic vector. In addition, another feature showed more than 97% discrimination ability over 15dB and specific elevation interval.



# I. 서론

기존의 드론은 기술적인 한계와 그로인한 고가의 가격으로 몇몇 특수한 목적에서만 이용되어왔다. 하지만 최근 들어 앞서 언급한 문제점이 상당부분 완화되어 개개인이 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 두드러진다[1].

하지만 드론은 크기와 속력이 조류와 비슷하고 Radar Cross Section(RCS)이 매우 작기 때문에 서로를 구분하기가 힘들다[2]. 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 Short-time Fourier transform(STFT)을 이용하여 레이더의 Line of sight(LOS) 방향에 대한 표적 각 부분의 속도 변화를 시간-주파수의 2D 이미지로 나타낼 수 있다[3]. 해당 이미지는 시간에 따른 표적 각 부분의 즉각적인 운동변화를 의미하고 표적의 운동주기와 같은 고유 특징을 발견할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 미세도플러 영상 추출에 대한 기하학적 원리를 소개하고 조류와 드론을 구분하기 위해 반복적 운동주기를 이용한 특성벡터 추출방법을 제안하였다. 먼저 2장 1절에서 특성벡터 추출을 위한 시

물레이션에 사용하기 위해 드론 및 조류는 점 산란 모델링 보다 실제와 유사한 (Physical Optics)PO기반 모델링을 적용하였고[4], 2장 2절에서 PO모델링이 적용된 반사신호에 대한 특성벡터 추출에 대해 서술한다. 그리고 3장에서 앞서 서술한 기법들의 실험결과를 통한 효율성을 검증한다. 4장에서는 제안된 기법들에 대한 결론을 간략하게 기술한다.



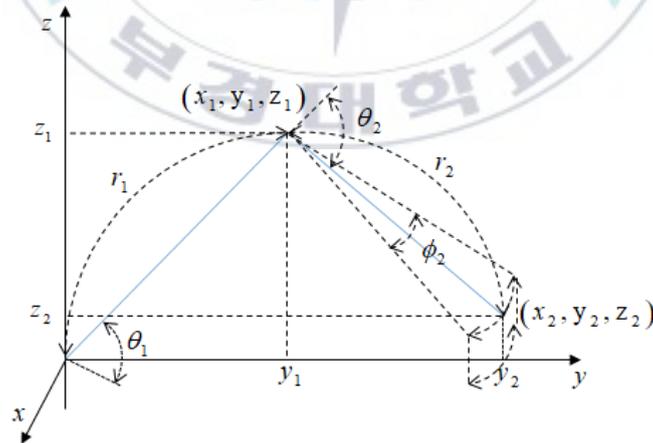
## II. 본론

본론에서는 조류와 드론의 신호모델링 및 수신된 신호로부터 획득되는 신호성분에 대해 설명하고 조류와 드론의 상호분별을 위한 특성벡터 추출에 대해 제안한다.

### 1. 미세운동 모델링 및 PO모델링

#### 가. 조류의 모델링

원점을 중심으로 조류 미세운동의 기하구조는 [그림 2.1]과 같다.



[그림 2.1] 조류 미세운동의 기하구조

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 40\cos(2\pi f_1 t) + 15 \\ 0 \\ a_1 \cos \theta_1 \\ y_1 \tan(\theta_1) \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

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

조류의 운동주기  $f_1$ 와 시간  $t$ 에 따른 미세운동을 수식적으로 표현한 것은 식 (2.1)과 같으며 원점을 조류의 몸통으로 삼고  $r_1$ 는 상완의 길이,  $r_2$ 는 하완의 길이,  $\theta_1$ 는 상완의 각도,  $\theta_2$ 는 상완에 대한 하완의 각도,  $a_1$ 는 상완의 길이,  $a_2$ 는 하완의 길이,  $\phi_2$ 는 하완의 x축에 대한 변화각도,  $(x_1, y_1, z_1)$ 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.

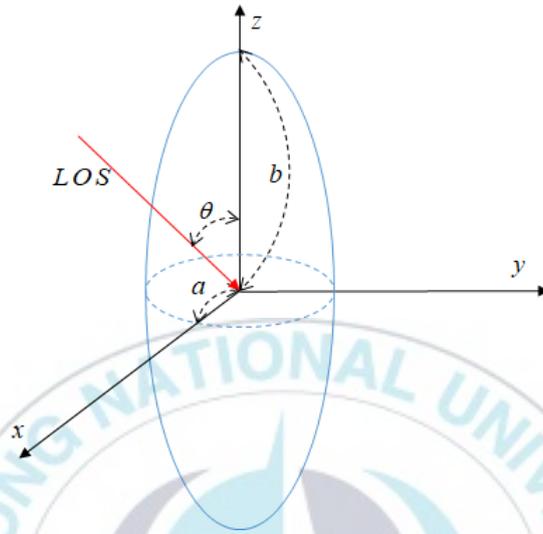
$$r_{cs} = \frac{\pi(a/2)^4(b/2)^2}{((a/2 \times \sin\theta)^2 + (b/2 \times \cos\theta)^2)^2} \quad (2.2)$$

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

$a$ 는 타원체의 좁은 부분의 반지름이며  $b$ 는 긴 부분의 반지름,  $\overline{V}$ 는 긴 부분의 방향벡터,  $\theta$ 는 긴 부분에 대한 LOS의 각도 이다.

$\theta$  및  $\overline{V}$ 에 따른 RCS를 계산하기 위해 날개 각 부분의 중심과 방향벡

터를 구한다.



[그림 2.2] 타원체 RCS의 기하구조

날개의 상완과 하완의 중심은 식 (2.3)과 같이 나타낼 수 있으며 날개 각 부분의 방향 벡터는 식 (2.4)와 같다.

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y_1/2 \\ z_1/2 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

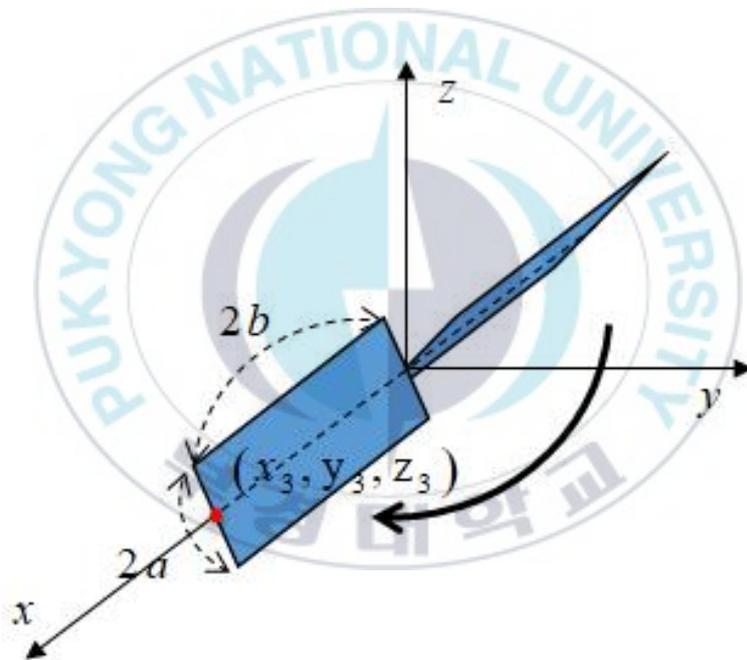
$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2/2 \\ y_1 + [0.5 \cos \phi_2 \cos(\theta_1 - \theta_1)]/2 \\ z_1 + [(y_2 - y_1) \tan(\theta_1 - \theta_1)]/2 \end{pmatrix}$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, V_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

그리고 식(2.1)~(2.4)에서  $y$ 축의 값에 역수를 취하면 반대편 날개의 기하구조가 성립한다.

## 나. 드론의 모델링

드론의 블레이드 미세운동의 기하구조는 [그림 2.3]과 같다.

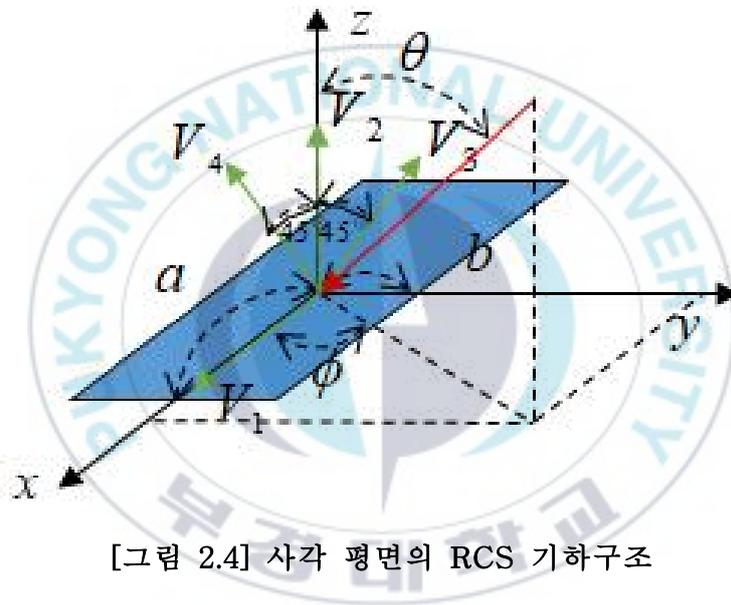


[그림 2.3] 드론의 블레이드 미세운동의 기하구조

원점을 프로펠러의 중심으로 두고 회전방향으로  $45^\circ$  기울어진 블레이드가 회전축 양단에 배치되어있는 형태이며 블레이드 끝부분의 좌표는 식 (2.5)와 같다.  $f_2$ 는 드론 블레이드의 회전주파수이며 조류의 경우와 마

찬가지로 운동부인 블레이드에 PO모델링을 적용하기 위해 점 산란원이 아닌 사각 평면에 대한 반사를 구현하였고 그 기하학적 구조는 [그림 2.4]와 같다.

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2a\cos(2\pi f_2 t) \\ -2a\sin(2\pi f_2 t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$



[그림 2.4] 사각 평면의 RCS 기하구조

[그림 2.4]에서  $a$ 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  $45^\circ$  기울어진 방향벡터,  $V_4$ 는 수선이  $-45^\circ$  기울어진 방향벡터이며  $\hat{V}$ 는 각 방향벡터에 매 시간에 따른 회전매트릭스 을 내적 하여 변화된 방향벡터를 나타낸다. 이를 수식화하면 식 (2.6)과 같다

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$V_2 = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\sin(90) & 0 \\ \sin(90) & \cos(90) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot V_1 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

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

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

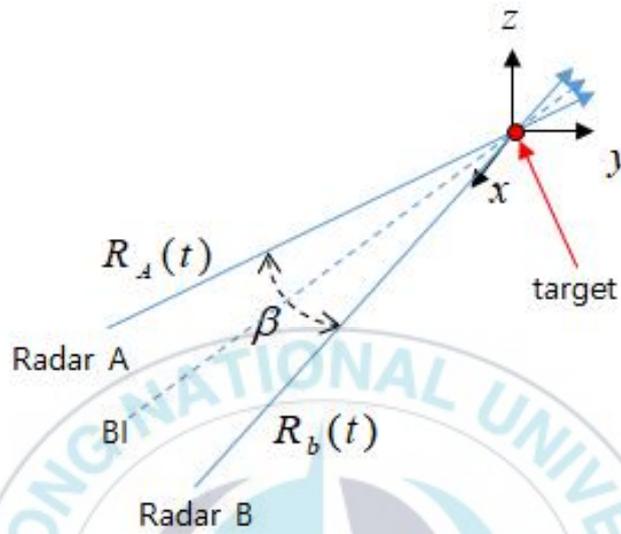
방향벡터는 식 (2.7)을 통해 RCS를 계산하였다.

$$rcs = \begin{pmatrix} \cos\theta \frac{\sin x_k}{x_k} \frac{\sin y_k}{y_k} \\ x_k = (2\pi/\lambda)a \sin\theta \sin\phi \\ y_k = (2\pi/\lambda)b \\ \theta = \cos^{-1}(-LOS \cdot V_3) \\ \phi = \tan^{-1} \left( \frac{\|LOS \cdot V_4\|}{\|LOS \cdot V_1\|} \right) \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$\theta$ 는 LOS를 xy평면에 투영 했을 때  $V_1$ 과의 각도,  $\phi$ 는 LOS와  $V_2$ 와의 각도,  $\lambda$ 는 신호의 파장이다. 이를 이용해 상기 모델링된 표적으로부터의 반사 신호는 식 (2.8)과 같이 표현할 수 있으며  $k(k=1,2,\dots,K)$ 는 산란점의 개수,  $f_0$ 는 중심주파수,  $R$ 는 레이더에서 산란점까지의 거리,  $c$ 는 빛의 속도이다.

$$s(t) = \sum_{k=1}^K rcs_k(t) \exp(j2\pi f_0(t - 2R_k/c)) \quad (2.8)$$

레이더의 발신부와 수신부가 다른 bi-static의 경우 [그림 2.5]와 같은 기하 구조를 가진다.



[그림 2.5] bi-static의 기하 구조

단일 레이더를 사용한 mono-static과 달리 bi-static의 경우 서로 다른 송, 수신기의 위치에 따라서 위상의 변화가 생긴다.[5] 이는 두 레이더의 LOS를 내적 한 방향벡터에서 바라본 mono-static 반사 신호의 위상과 동일하므로 표적을  $\beta/2$ 만큼 회전시켜 관측한 반사 신호와 같다. 이는 mono-static과 다른 방향에서 바라본 것이며 관측각도에 따라 변화하는 특성벡터를 분별에 이용하는데 필요하다. bi-static 반사 신호의 수식적 표현은 식 (2.9)와 같으며 mono-static의 이 각 레이더에서의 표적까지 거리의 합인  $R_A + R_B$ 로 바꾸어 표현되었다.

$$s(t) = \sum_{k=1}^K rcs_k(t) \exp(j2\pi f_0(t - (R_A + R_B)_k/c)) \quad (2.9)$$

## 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, mono-static 및 bi-static 기반의 미세도플러 영상의 유사도의 총 4가지의 특성벡터를 제안한다.

### 가. RCS변화 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 계산할 수 있다.

수집된 반사 신호에서 RCS만을 고려하기 위해 절댓값을 취하면 식 (2.10)과 같다.

$$\begin{aligned} \|s(t)\| &= \|rcs(t)\exp(j2\pi f_0(t-2R/c))\| \\ &= rcs(t) \end{aligned} \quad (2.10)$$

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

## 나. 미세도플러 영상을 이용한 특성벡터

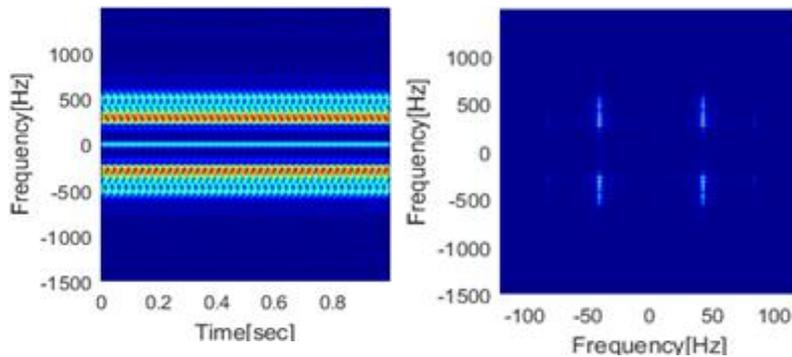
미세도플러 영상은 미세도플러를 시간-도플러 역역의 가시적 구분이 가능한 영상으로 나타낼 수 있는 특성을 가져, 조류와 드론의 중요한 특성 벡터로 나타낼 수 있다.

이러한 미세도플러 영상을 얻기 위해 수집된 반사 신호를 바탕으로 식 (11)과 같이 STFT를 적용하여 시간-도플러 영상[그림 2.6(a)]를 얻는다.

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-j2\pi fu} du \quad (2.13)$$

$x$ 는 수집된 반사 신호이며  $h^*(u-t)$ 는 임의의 영역함수이다[3].

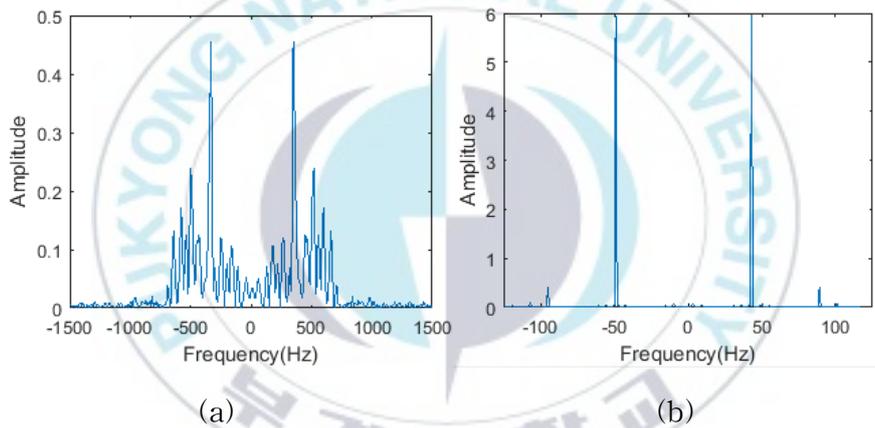
LOS 방향에 대한 미세운동이 없는 주파수 1이하의 저주파 성분을 제거한 뒤 시간 축에 대해 푸리에 변환을 함으로서 시간에 대한 천이 불변을 특징으로 하는 주파수-주파수 도메인의 특성벡터 기반 영상[그림 2.6(b)]로 가공한다.



[그림 2.6] (a)시간-주파수 영상, (b)주파수-주파수 영상

(1) 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 2.7(a)]와 같은 결과를 얻었으며 미세도플러 변화를 의미하는 y축에 대해 동일한 과정을 거쳐 그림 [그림 2.7(b)]의 결과를 얻었다. 이를 이용하여 피크 점의 위치를 특정 하는 것으로 미세운동의 주파수와 변화폭을 얻어낼 수 있다.



[그림 2.7] (a)시간-주파수 영상, (b)주파수-주파수 영상

(2) 양수와 음수 영역의 유사성

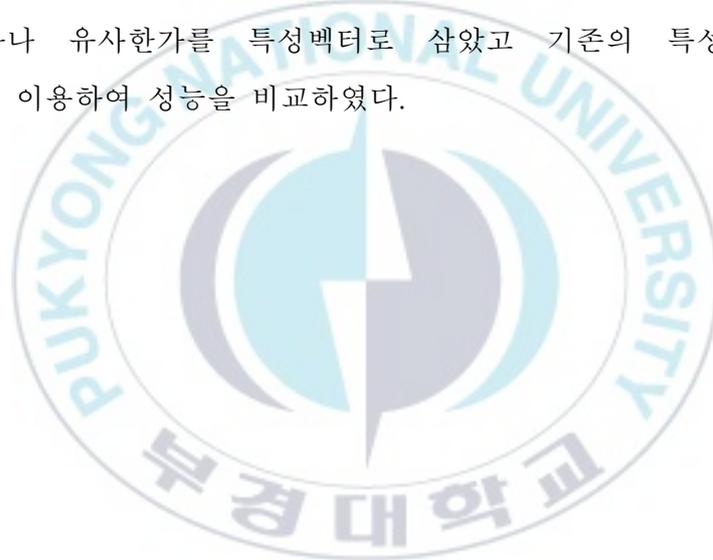
레이더 방향에 대한 운동은 증가된 도플러 주파수의 신호를 반사하고 레이더 반대 방향에 대한 운동은 감소된 도플러 주파수의 신호를 반사한다. 이는 [그림 6(b)]의 y축 상의 양수와 음수에 해당한다.

드론 프로펠러의 경우 회전 운동을 하므로 레이더방향과 반대방향의 운동이 유사한 반면 조류 날개의 경우 그렇지 않아 이와 같은 특성을 분별

에 이용할 수 있다. 이에 주파수-주파수 영상의  $y$ 축 중심을 기준으로 양수 영역과 음수 영역의 유사성을 특성 벡터로 이용하였다.

### (3) bi-static을 이용한 영상 비교

드론의 프로펠러는 회전운동하기 때문에 어느 방향에서 반사 신호를 수집했는가가 큰 변수가 되지 못한다. 반면 조류의 경우는 관측 방향에 따른 변화가 크기 때문에 mono-static과 bi-static의 미세도플러 영상에서 차이가 있다[6][7]. 이를 이용하여 한 표적에 대한 두 가지 주파수-주파수 영상이 얼마나 유사한가를 특성벡터로 삼았고 기존의 특성벡터 또한 bi-static을 이용하여 성능을 비교하였다.



### Ⅲ. 실험 결과

#### 1. 시뮬레이션 조건

표적 식별을 위한 학습데이터는 고정된 지점에서 병진운동이 존재하지 않는 정지비행 시나리오를 바탕으로 구성된 미세도플러 영상 데이터베이스를 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 3.1]과 같다.

[표 3.1] 훈련 DB 파라미터

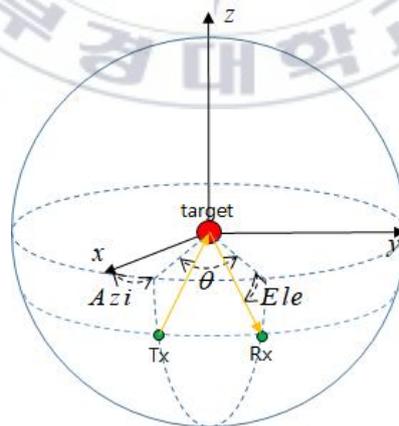
	발신레이더(Tx)	수신레이더(Rx)
Azimuth	0,3,6,...,180°	0,3,6,...,180° + 90°
Elevation	0,-3,-6,...,-90°	0,-3,-6,...,-90°
표적과의 거리	100m	
	드론	조류
회전/날갯짓 주기	20~25/s	1.5~3.5/s

[표 3.2] 레이더 파라미터

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 Azimuth 와 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  $3^\circ$  간격의 변화를 주며 표적의 반사 신호를 수집하였다.

시뮬레이션에서 표적분별을 위한 총 600개의 시험 DB를 구성하였다. 시뮬레이션 기하 구조는 다음 [그림 3.1]과 같다.



[그림 3.1] 시뮬레이션의 기하구조

시험 데이터의 경우 훈련데이터와 동일한 관측 범위 내의 무작위 각도에서 표적을 관측한 반사 신호를 사용하였다. mono-static의 경우 발신레이더(Tx)로 신호를 쏘고 받았으며 bi-static의 경우 Tx에 대해 Azimuth 각도가 90° 벌어져있는 위치에 수신레이더(Rx)가 위치하여 신호를 수집하였다. 이를 nearest neighbor 구분기를 이용해 조류와 드론을 분별하고 within-between class 를 통해 얼마나 잘 분리 되었는가를 수치적으로 나타내었다.[8]

표적 식별 성능은 식 (3.1)과 같이 전체 시험 데이터 중에서 올바르게 구분한 수의 비율로 정의하였다.

$$P_c = \frac{\text{올바르게 구분한 수}}{\text{전체 시험 데이터 수}} \times 100[\%] \quad (3.1)$$

그리고 분별정도를 표현하는 수식적 표현은 식 (13)과 같다.

$$S_w = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \left[ \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} (y_i^k - \mu_k)^T (y_i^k - \mu_k) \right] \quad (3.2)$$

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

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

는 단일 클래스가 얼마나 잘 모여 있는지를 보여주는 within-class, 는 각 클래스의 평균이 서로 얼마나 멀리 떨어져 있는지를 보여주는 between-class,  $S_t$ 는  $S_w$ 와  $S_b$ 를 이용하여 각 클래스간 얼마나 잘 구분되는지를 보여주는 척도이다.  $c$ 는 클래스의 수,  $n_k$ 는 클래스별 데이터의 수이며

$y_i$ 는 각 데이터,  $\mu_k$ 는 클래스별 평균,  $\mu$ 는 전체 데이터의 평균을 의미한다.[9]

## 2. 시뮬레이션 결과

훈련데이터를 기반으로 식 (2.10)을 통해 얻어낸 특성벡터간의 within-between class는 다음 표와 같이 얻을 수 있었다.

[표 3.3] 특성벡터의 within-between class

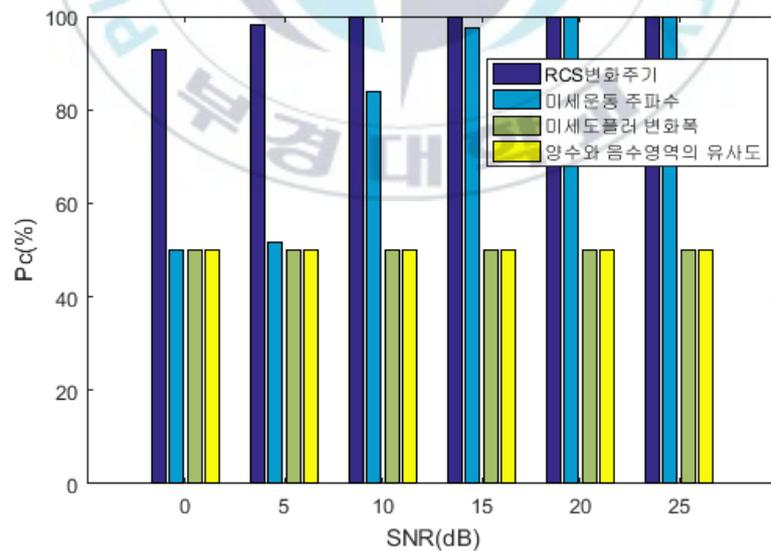
특성벡터	within-between class
RCS변화 주기	67.8890
미세운동 주파수	42.3524
미세도플러 변화	11.6796
양수와 음수 영역의 유사성	0.2068
mono-static과 bi-static 영상간의 비교	2.2792

특이점으로는 ‘mono-static과 bi-static 영상간의 비교’의 경우 elevation에 따라 다른 within-between class를 보여주며 이는 다음 [표 3.4]와 같으며 elevation  $0^\circ \sim -45^\circ$  구간에서 높음을 확인할 수 있다.

[표 3.4] mono-static과 bi-static 영상간의 비교

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

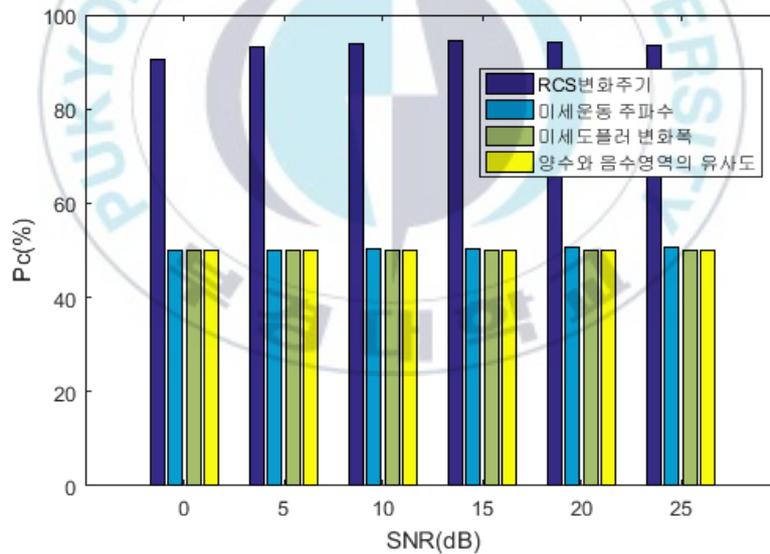
[그림 3.2]는 특성벡터 'RCS변화 주기'에 대해 SNR에 대한 정확한 표적분별 확률을 나타낸다. 그림 8에서 보는 바와 같이, 0dB 이상의 SNR에서 mono-static과 bi-static 모두 90% 이상의 높은 분별 성능을 확인 할 수 있었다.



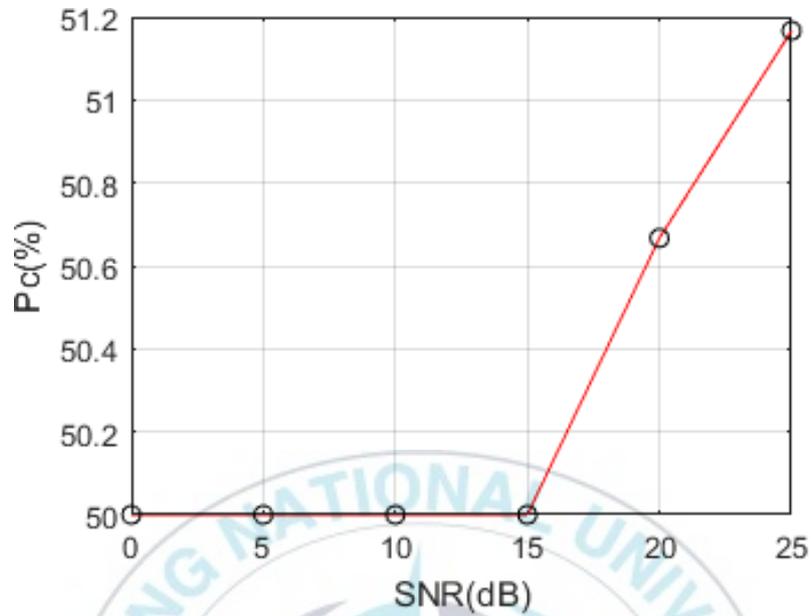
[그림 3.2] mono-static을 이용한 특성벡터별 분별능력

[그림 3.3]에서 mono-static상에서 SNR에 따른 특성벡터별 분별능력을 나타낸다. ‘RCS변화주기’의 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.

mono-static이 아닌 bi-static을 이용한 분별능력은 그림 10에서 확인할 수 있으며 ‘RCS변화주기’만이 0dB이상에서 90%이상의 분별능력을 보여주었지만 mono-static에 비해 낮은 수치를 보여주었고 나머지 특성벡터의 경우 전혀 분별되지 않았다.

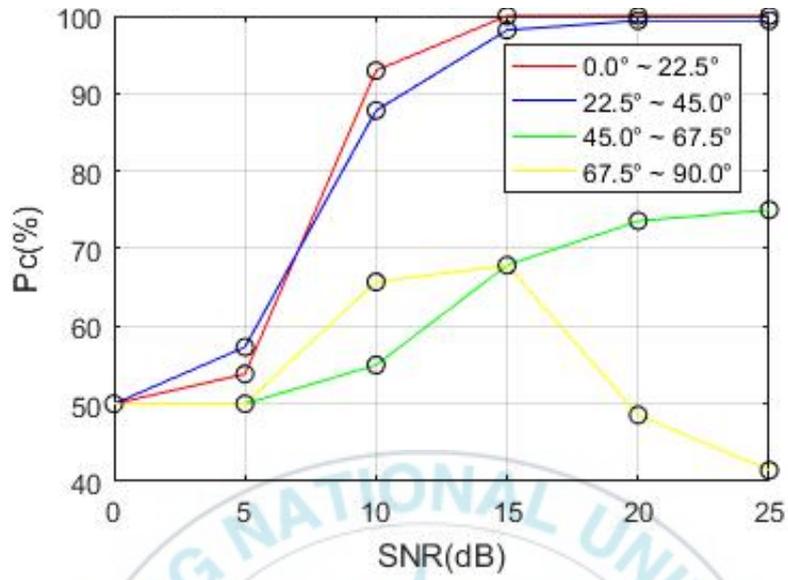


[그림 3.3] bi-static을 이용한 특성벡터별 분별능력

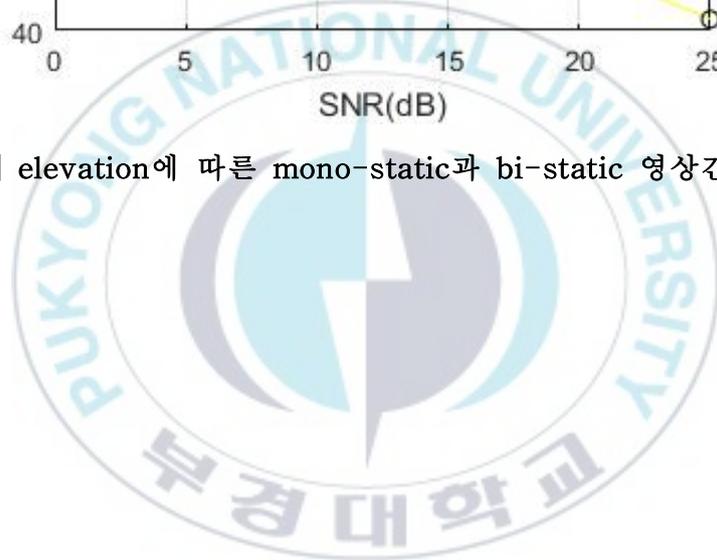


[그림 3.4] mono-static과 bi-static 영상간의 유사성

[그림 3.4]의 mono-static과 bi-static 영상간의 유사도를 이용한 분별 능력이며 분별이 되지 않음을 확인했지만 표 4에서의 높은 분별정도를 나타내었던  $0^\circ \sim -45^\circ$ 에 해당하는 표적의 훈련데이터를 기반으로 삼아 elevation별 표적의 분별정도를 나타내었으며  $0^\circ \sim -45^\circ$ 의 표적에 대해 15dB 이상에서 98%이상의 정확도를 보였다([그림 3.5]).



[그림 3.5] elevation에 따른 mono-static과 bi-static 영상간의 유사성



## IV. 결론

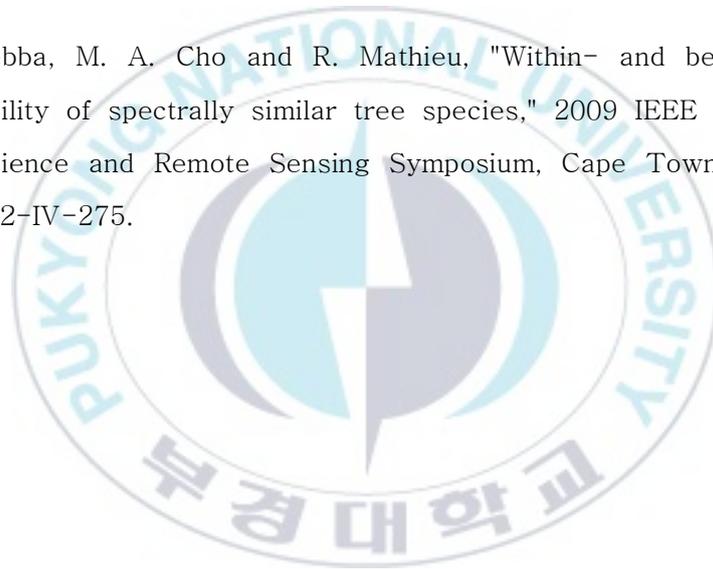
본본 논문에서는 정지비행 표적에 대해 도플러효과로 인한 반사 신호를 획득하고, 이를 이용해 얻어낸 특성벡터의 표적 분별 성능을 분석하였으며, 또한 mono-static 뿐만 아니라 과 bi-static을 이해용한 분별을 제시하였다. 'RCS변화 주기'의 경우 낮은 SNR에 대해서도 높은 분별 능력을 확인할 수 있었으며 '미세운동 주파수'에서도 mono-static의 경우 15dB 이상에서 높은 분별 성능을 보여주었다. 다른 종류의 특성벡터의 경우 분별에 실패하였고 bi-static의 모든 특성벡터에 대해 mono-static보다 낮은 확률의 분별정도를 나타내었다. 그럼에도 mono-static과 bi-static을 동시에 사용하여 서로의 영상을 비교하는 것으로 elevation  $0^{\circ} \sim -45^{\circ}$  사이에서 높은 분별 능력을 보였다. 해당 각도는 실질적으로 표적이 존재하는 대부분의 영역이므로 작은 사각을 제외하면 대부분의 표적을 분별할 수 있다.

본 논문은 정지비행만을 고려한 시뮬레이션 기반의 연구이나 실제 표적의 경우 병진운동이 포함되고 레이더 신호의 난반사로 인한 클러터 발생 또한 감안해야한다. 이에 대한 보상이 필수 불가결하기에 향후 병진운동이 포함되고 다양한 잡음이 포함된 환경을 대상으로 연구범위 확대가 필요할 것으로 보인다. 추가적으로 본 저자는 이를 편대비행 표적에 확장시켜 연구를 수행 할 예정이며 계속해서 보다 정확도 높은 특성벡터를 찾을 예정이다.

## 참고문헌

- [1] Lee Won-sang, "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] E. Vattapparamban, İ. Güvenç, A. İ. Yurekli, K. Akkaya and S. Uluğaçaç, "Drones for smart cities: Issues in cybersecurity, privacy, and public safety," 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Paphos, 2016, pp. 216-221.
- [3] W. Lu and Q. Zhang, "Deconvolutive Short-Time Fourier Transform Spectrogram," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 16, no. 7, pp. 576-579, July 2009.
- [4] V. Chen, "The Micro-Doppler Effect in Radar". Artech House, Norwood, MA, 2011.
- [5] 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.
- [6] M. Martorella, D. Cataldo and S. Brisken, "Bistatically equivalent monostatic approximation for bistatic ISAR," 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13), Ottawa, ON, 2013, pp. 1-5.

- [7] 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.
- [8] T. Cover and P. Hart, "Nearest neighbor pattern classification," in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 13, no. 1, pp. 21-27, January 1967.
- [9] 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, 2009, pp. IV-272-IV-275.



## 부 록

### [게제 논문]

논문제목 (Paper Title)	논문 발표일 (Date)	논문지명 (Journal Title)	논문지 구분 <sup>1)</sup>	저자 구분 <sup>2)</sup>
드론과 조류의 분별을 위한 효과적인 미세 도플러 특성벡터 연구	2019	Journal of KIIT	학진 등재지	제1저자
Monostatic, Bistatic HRRP를 이용한 편대비행 대수 추정	2019	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)
드론과 조류 구분을 위한 미세 도플러 기반 연구	2018.11	대한임베디드 공학회
드론과 조류의 미세 도플러 특성벡터 연구	2018.06	한국전자과학회 하계 종합학술대회
미세도플러 신호를 이용한 미사일 표적 간의 변별 연구	2017.08	한국전자과학회 하계 종합학술대회

## 감사의 글

학부 4학년이 시작할 무렵, 남들보단 조금 늦었지만 좀 더 뭔가 해보자는 생각을 가지고 전자기산란응용 연구실의 문을 두드리고 들어와 석사 진학을 목표로 한지 어언 3년이 되어 졸업을 앞두고 있습니다. 연구실 생활을 하면서 학업 정진 이외에도 많은 인연을 맺어 다양한 추억과 경험을 쌓아온 것이 이전에 없던 견문을 넓혀 주었습니다. 분명 이러한 것들이 쌓여 앞으로의 제 삶에 중요한 원군이 되어 저를 이끌어줄 것입니다. 그렇기에 이 지면을 빌어 지금의 제가 있게 해주신 분들에게 감사의 인사를 남기고자합니다.

가장먼저, 흔쾌히 연구실에 받아주시어 학업에 대한 지도뿐만이 아니라 나아갈 방향을 제시해주신 박상홍 교수님께 감사의 인사를 드립니다. 언제나 기대치에 못 미치는 모습을 보여드려 죄송하기만 할 따름인 절 열과 성을 다해 좋은 말씀으로 이끌어주신 점 잊지 않겠습니다.

학부 때부터 가르침을 내려주시던 학과 교수님들께도 감사의 인사를 드립니다. 진중한 음성으로 수준 높은 수업을 해주시던 이원창 교수님, 인터넷 강의를 이용하여 질의응답에 시간을 할애하여 애쓰시던 임창현 교수님 감사합니다.

연구실 생활을 실질적으로 같이 보낸 연구실 사람들에게도 감사함을 전합니다. 포항공대에서 박사과정을 밟고 계심에도 가끔씩 연구실에 들려 좋은 말씀 해주시던 인오형, 학부 때부터 석사 졸업 후 포항공대로 가신 뒤까지 많은 지도와 도움을 주신 민이형, 장난기도 많았지만 세미나 할때는 엄하게 지적도 해주셨던 기봉이형, 석사생활을 같이 보내며 많은 도움을 주었던 상빈형과 석현형, 그 외에도 공부도 잘하고 놀기도 잘하는 연구실 후배들 모두에게 감사의 인사를 전합니다.

마지막으로 오랫동안 고생하시며 말도 잘 안 듣는 아들을 여기까지  
키워주신 아버지 어머님께 이 자리를 빌어서 감사의 인사를 드립니다.

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

2017. 02. 22

윤 세 원

