레이다 기반의 드론 탐지 기법 연구

문민정*, 송경민*, 유수진*, 심현석*, 이우경*

Research on the drone detection based on the radar

Minjung Moon*, Kyungmin Song*, Sujin Yu*, Hyunseok Sim*, Wookyung Lee* *Regular Members*

요 약

오늘날 드론의 대중화와 드론 관련 산업의 확장 등으로 인하여 드론 보급이 민 군에 걸쳐 증가하였고, 이와 더불어 보안, 안전사고, 치안·안보 위협 등의 우려도 함께 커지고 있다. 드론은 크기가 작고 반사도가 낮은 재질로 되어 있어 일반적인 센서로는 탐지가 어려운 것으로 알려져 왔다. 이에, 드론으로 인해 발생하는 사건 및 사고를 예방하기 위해서는 드론의 탐지와 위험 요소에 대응할 수 있는 기술에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 드론 탐지 기법을 분류하였다. 또한 CW 레이다를 기반으로 한 드론 탐지 실험을 통해, 마이크로 도플러의 패턴을 분석하여 드론 탐지의 가능성을 제시한다.

Key Words : Anti-Drone, Drone detection, Radar, micro Doppler, Urban security

ABSTRACT

Recently, acccording to price decline and miniaturization of drone, it is increased dramatically that drone usage in various category including military and private sectors. In accordance with popular usage, There is a increasing risk of safety accident, national security and public privacy problem. Hence there is a high demand for study and analysis applicable to the related technology and anti-drone method including drone detection and jamming. In general, it is extremely difficult to detect and recognize drones using conventional sensors. In this paper, we classify drone detection technology and Drone detection experiments are performed using CW RADAR to obtain and analyze micro-doppler pattern. This preliminary study aims to provide fundamental theory on radar drone detection and experimental test results such that in-depth anti-drone technology can be established in future.

I. 서 론

기존의 드론은 특수 목적으로 사용이 한정되어 왔지만, 최근 드론의 가격 하락 및 소형화에 따라 활용 범위가 늘어나고 있다. 이에따른 범죄 및 반사회적인 목적으로 드론의 악용의 우려도 함께 높아지고 있다. 특히, 기존 보안 시설은 공중 보안에 취약하기 때문에 보안구역에 안티 드론 기술의 중요성이 높아지고 있다.

드론에 대한 위협이 커지며 드론 탐지 기술로서, 음향, 열, 영상과 같은 정보를 바탕으로 드론을 탐지하려는 시도가 이루어졌다[1-2]. 하지만 크기, 재질, 비행 고도 등과 같이 다른 비행체와는 다른 드론의 특징들로 인해 이와 같은 피동 센서들로는 탐지가 어렵다[3]. 기존 센서들의 한계를 극복하기 위해 여러 센서를 종합하여 다중 센서 네트워크를 통한 정보 획득에 활용될 수 있으나[4]. 도심 지역에서의 드론 안전 위협 등에는 분명한 한계가 존재한다. 마이크로파를 사용하는 레이다는 능동 센서로서 앞서 서술한 정보 획득 체계와는 달리 전천후로 사용이 가능하며, 도심의 소음, 열 또는 비행 고도 등에 무관하게 활용될 수 있어 드론 탐지 연구에 주로 사용되고 있다[5-12].

본 논문에서는 레이다를 기반으로 한 드론 탐지 기술 연구 현황에 대해 소개하고 그중 CW 레이다를 통해 드론의 도플러 신호를 획득하여 드론을 탐지하는 기법에 대한 실험 결과를 제시하였다. 5.8 GHz C-Band 대역에서 획득한 드론의 반사 정보를 시간 주파수 영역에서 분석하여 마이크로 도플러 특성을 추출하고 신호의 패턴을 분석하였다. 이를 위해 Ⅱ장에서는 레이다 기반 드론 탐지 기술 현황을 기술하였으며, Ⅲ장에서는 CW 레이다로 측정한 실험 결과와 이론을 비

※ 이 논문은 국가보안기술연구소 연구비에 의하여 지원된 연구의 결과임.
*한국항공대학교 항공전자정보공학과 위성전자연구실 (dalminjung@naver.com, kmsong29@gmail.com, usuzin@kau.kr, shss331@naver.com, wklee@kau.ac.kr)
접수일자 : 2017년 5월 31일, 최종게재확정일자 : 2017년 6월 22일

교 분석하여 드론 탐지 가능성을 나타내었다.

Ⅱ. 드론 탐지 연구 동향

1. 레이다 기반 드론 탐지 기술 현황

능동센서인 레이다는 표적에 전파를 송신하여 되돌아오는 신호를 통해 표적의 거리와 속도를 파악할 수 있고, 전천후 환경에서 운용할 수 있다. 따라서 레이다를 기반으로 한 드론탐지 연구가 활발히 진행되어 왔다[13]. 그림 1은 드론 탐지에 관련된 문헌 조사를 통해 수집된 드론 탐지의 연구현황을 나타낸다. 드론 탐지 기법은 크게 능동센서인 레이다와 피동센서로 나뉜다. 드론의 크기, 재질 및 비행 고도와 같은 특성으로 드론을 탐지하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 그림에서 보이는 것과 같이 대략 70%의 드론 탐지 연구는 능동센서인 레이다 기반으로 진행되어 왔다. 최근에는 딥러닝을 적용하여 드론을 탐지하는 기법도 연구되고 있다[14]. 레이다 기반의 드론 탐지 기법을 레이다, ISAR 영상, 도플러, RCS, FMCW 레이다로 세분화 할 수 있으며, 이 중 도플러를 통한 드론 탐지 기법의 연구가 50% 정도로 활발히 진행되고 있다. 표 1은 레이다 기반으로 진행되고 있는 연구를 요약한 것으로 마이크로 도플러 기반의 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 다양한 주제로 연구가 진행되고 있다.

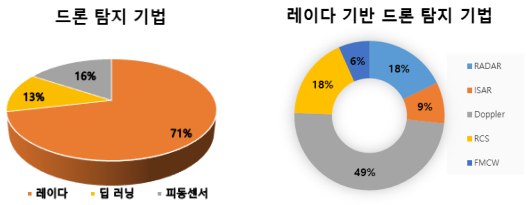

그림 1. 드론 탐지 기법 연구 현황

표 1. 레이다 기반 연구 동향

레이다 탐지 기법	연구 내용
레이다 유효 반사면적	-드론 블레이드 유형 분류 -드론 내부 구성에 의한 영향분석 -드론 비행경로 분석
ISAR 영상	-방위각 변화에 따른 영향 분석 -초 광대역 레이다를 적용한 영상분석 -소형 드론 탐지 연구
마이크로 도플러	-드론 탑재체 무게 의한 영향분석 -패턴분석을 통한 드론 유형 분류 -블레이드 직경, 재질 의한 영향 -모노스태틱, 바이스태틱 레이다 적용한 드론과 새의 패턴 분류 -2.4GHz CW 레이다의 비행 특성분석 -9.5GHz CW 레이다의 비행체 유형 분석 -35GHz FMCW 레이다의 드론유형 분석

1.1 레이다 유효 반사면적을 이용한 드론 탐지

레이다 유효 반사면적(RCS:Radar Cross Section)은 원거리에서 입사 전기장 강도에 대한 수신 전기장 강도의 세기의 비로 레이다 표적의 반사 정도를 나타내는 척도이다. 드론의 블레이드 길이와[5] 비행경로의 변화에[6] 따른 RCS를 측정한 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 드론의 RCS는 -20dB 이하의 낮은 값을 갖기 때문에 RCS로 드론을 탐지하는 데에 어렵다.

1.2 ISAR 영상을 이용한 드론 탐지

ISAR 영상은 일정 시간 동안 획득되는 신호들을 합성하여 해상도 향상과 표적 식별에 활용되는 기법이다. 드론의 방위각 변화에 따라 변화하는 ISAR 영상을 획득하는 연구가 진행된 바 있으며[7], 초광대역 레이다를 활용하여 초고해상도 드론 ISAR 영상을 획득한 사례가 발표된 바 있다[8].

1.3 마이크로 도플러 이용한 드론 탐지

드론은 병진운동 외의 프로펠러의 진동 및 회전운동과 같은 동작에 의해 발생하는 주파수 변조를 마이크로 도플러 현상이라 정의한다[9,15]. 마이크로 도플러 특성은 표적의 고유한 특성으로 드론의 탑재체 무게의 변화와 드론 로터의 직경 및 재질 특성에 따라서도 마이크로 도플러 특성이 달라진다[10]. 또한, 드론을 식별하기 위해 CW 레이다를 이용하여 소형 드론의 유형에 따른 마이크로 도플러 특성을 분류한 연구도 진행되었다[11]. 이와 같이 마이크로 도플러 특성을 분석하여 드론을 탐지 및 식별하기 위해 도플러 패턴을 분석한 연구가 활발히 진행되고 있다[12].

Ⅲ. 마이크로 도플러 탐지 실험

3.1 실험 개요

CW 레이다 기반의 드론 탐지 실험에는 DJI 社의 팬텀-3(Phantom-3)을 사용하였다. 해당 드론을 탐지하기 위해 저전력 X, C-밴드의 SDR 레이다를 이용하여 드론 탐지 및 마이크로 도플러 분석 실험을 수행하였다. 표 2는 팬텀-3와 SDR 레이다의 사양을 보여준다.

표 2. DJI PH-3와 C밴드 SDR 레이다 주요사양

DJI Phantom-3 드론의 주요 사양	로터의 길이 : 10 cm
	RPM : 약 2100 (이상적) 약 9000 (최대)
	무게 : 1280 g
	날개 끝 속도 : 21.9 m/s
C-Band 대역 SDR 레이다의 주요 사양	중심 주파수 : 5.8 GHz
	최대 출력 : < 30 dBm
	대역폭: 400 MHz

팬텀3와 C-밴드 대역 SDR 레이다로 진행한 실험 환경 및 개요는 그림 2와 같다. 레이다와 드론의 수평거리 2.5m와 수직거리 0.9m에서 드론의 로터를 1개만 구동하여 실험을 진행하였다. 드론의 프로펠러 특성을 분석하기 위해 하나의 로터에 반사도를 높이기 위해 알루미늄 은박 테이프를 접착하여 실험을 진행하였다. 다중 주파수 대역으로 드론 데이터 획득 후 C-밴드 대역의 레이다로 드론 프로펠러의 속도 변화를 가하여 데이터를 수집하였다.

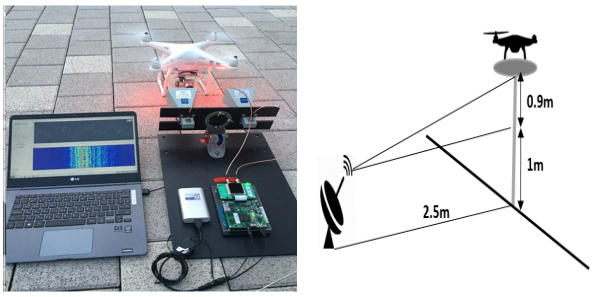

그림 2. 실험 환경 및 시나리오

3.2 데이터 획득 및 실험 결과

주파수 대역에 따른 마이크로 도플러 특성을 관측하기 위해 STFT를 수행하여 스펙트로그램을 측정하였다. 스펙트로그램은 시간의 변화에 따른 주파수 변화의 정도를 관측할 수 있는 기법이다. 스펙트로그램 생성을 위해 STFT를 사용하였으며, 이산 신호에 대한 STFT는 식(1)과 같이 정의할 수 있다[16].

$$STFT\{x[n]\} \equiv X(m,k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n-m]e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

x[n]은 이산 신호이고, w[n]은 이산 윈도우 함수로 가우시안 윈도우를 사용한다. N은 샘플의 개수를 의미하고, w_o는 푸리에 분해능으로 $\frac{2\pi f_s}{N}$로 정의된다. m은 윈도우 위치를 나타내며, m의 값에 따라 윈도우를 이동시키며 FFT를 수행한다. 주파수 분해능과 시간 분해능은 윈도우 크기에 의해 변화하며 반비례 관계에 있다. 그림 3은 정현파 신호를 0에서 8초 구간에서 2초 마다 6Hz, 15Hz, 30Hz, 25Hz로 주파수를 변화시킨 스펙트로그램을 나타낸다. 그림 3(a)는 윈도우 길이를 160으로 설정한 스펙트로그램이며, 윈도우 길이를 증가시켜 주파수 영역의 해상도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 윈도우 길이를 40으로 설정한 3차원의 스펙트로그램이고 윈도우 길이를 감소시켜 주파수 해상도는 낮아지지만 시간 축의 해상도는 높아지는 것을 확인할 수 있다. 윈도우와 FFT 적절한 크기 조정을 하여, 스펙트로그램을 통해서 시간의 변화에 따른 주파수 변화의 분석이 가능하다.

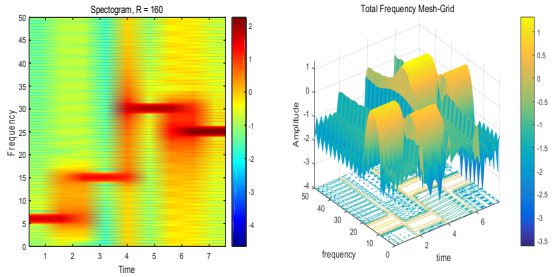

그림 3. (a) 윈도우 길이 160의 정현파의 스펙트로그램
(b) 윈도우 길이 40의 정현파의 3차원 스펙트로그램

그림 3은 위의 실험 환경에서 X-밴드와 C-밴드로 측정한 데이터의 도플러 패턴을 나타낸 결과이다. 드론의 블레이드는 로터를 중심으로 대칭구조이기 때문에, 도플러 주파수는 0Hz를 기준으로 음의 도플러 주파수는 레이다에서 멀어지는 블레이드에 의한 스펙트럼이며, 양의 도플러 주파수는 가까워지는 블레이드에 의한 스펙트럼을 나타낸다. 그림 4(a)는 X-밴드로 측정한 스펙트로그램으로 표적의 수신 신호 세기보다 바람에 의한 클러터의 영향이 높게 나타나 우세한 패턴이 관찰되지 않는다. 반면, 그림 4(b)는 30dB의 출력을 갖는 C-밴드 레이다로 진행하여 획득한 스펙트로그램을 나타낸다. 높은 출력으로 측정한 수신 신호 세기가 X-밴드의 도플러 값의 세기보다 우세하게 나타나는 것을 관측하였다.

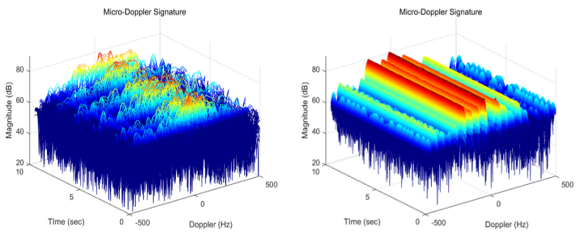

그림 4. (a) X밴드 스펙트로그램
(b) C밴드 스펙트로그램

그림 5는 C-밴드 CW 레이다를 이용하여 드론의 프로펠러의 회전율을 변화시켜 블레이드 속도 변화 따른 도플러 특성을 측정한 실험 결과이다. 드론의 최대 마이크로 도플러 천이 값은 이론적으로 식(3)와 같이 나타낸다. 식(2)는 드론의 날개 끝의 속도를 나타내는 식이다. L은 드론 날개의 길이, Ω은 회전율을 나타낸다[15].

$$V_{tip} = 2\pi L\Omega \quad (2)$$

$$f_{D_{Max}} = (\frac{2V_{tip}}{\lambda})\cos\beta \quad (3)$$

표2에서와 같이 드론의 날개 끝 속도는 21.9 m/sec, 파장λ의 값은 0.05m이며, 그림2의 시나리오와 같이 레이다와 드론의 고도각은 20°이다. 드론의 프로펠러의 RPM이 2100일 때, 식(3)을 통해 최대 마이크로 도플러 천이 값을 계산하면, 495Hz이다. 실험 결과 등속 구간에서 RPM은 2100이고 해당 구간에서 마이크로 도플러의 최댓값은 484Hz로 오차 범위를

고려하면, 이론값과 실험값이 일치하는 것을 보여준다. 그림 5의 실험 결과에서 등속 구간과 변속 구간의 도플러 주파수 간격의 변화를 관측하였다.

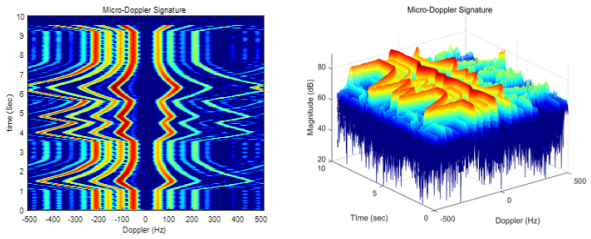

그림 5. C밴드 회전 속도 변화에 따른 스펙트로그램

그림 6은 1초와 3초 구간의 도플러 프로파일을 관측한 결과이다. 그림 6(a)는 등속일 때의 결과이며 도플러 패턴 간격은 55 Hz이다. 동일한 조건에서 가속하였을 때의 결과는 그림 6(b)이고 패턴 간격이 105Hz로 등속일 경우와 비교해서 약 2배까지 높아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 드론의 RPM이 증가함에 따라 도플러 주파수의 패턴 간격이 넓어진다.

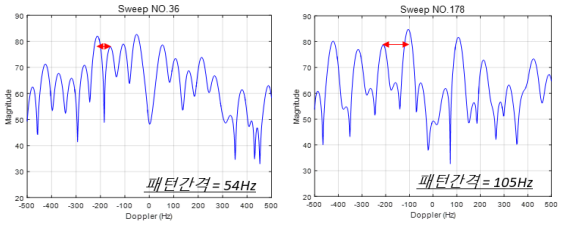

그림 6. (a) 등속일 때 도플러 패턴 간격
(b) 가속일 때 도플러 패턴 간격

Ⅳ. 결론

드론의 대중화와 드론 관련 산업의 확장 등으로 인하여 드론 보급이 민 군에 걸쳐 증가하였고, 이와 더불어 보안, 안전사고, 치안·안보 위협 등의 우려도 함께 커지고 있다. 본 논문에서는 드론을 탐지하는 기법으로, 레이다를 기반으로 한 드론 탐지 기술 연구 현황에 대해 소개하였으며, 레이다 기반 탐지 기법 중에서도 마이크로 도플러를 분석한 연구를 기반으로 실험을 진행하였다. X밴드와 C밴드의 도플러 패턴을 확인하는 실험을 진행하였고, 출력이 높은 C밴드 대역의 CW 레이다를 기반으로 드론 프로펠러의 속도를 가변 시켜 획득한 데이터에 STFT를 수행하여 드론의 마이크로 도플러 패턴을 분석하였다. 실험 결과와 이론값을 비교 분석 한 결과 이론값과 실험값이 일치하였으며, 드론의 회전율의 변화에 따라 드론의 마이크로 도플러 패턴의 간격의 변화를 관측하였다. 이는 향후 안티 드론의 기술과 마이크로 도플러 패턴인식에 활용되어 드론 식별 기술의 가능성을 제시한다.

참 고 문 헌

[1] Salloum, Hady, et al. "Acoustic system for low flying aircraft detection." Technologies for Homeland Security (HST), 2015 IEEE International Symposium on. IEEE, 2015.

[2] Mezei, József, and András Molnár. "Drone sound detection by correlation." Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), 2016 IEEE 11th International Symposium on. IEEE, 2016.

[3] Schroder, Arne, et al. "Numerical and experimental radar cross section analysis of the quadrocopter DJI Phantom 2." Radar Conference, 2015 IEEE. IEEE, 2015.

[4] Park, Seongha, et al. "Combination of radar and audio sensors for identification of rotor-type unmanned aerial vehicles (uavs)." SENSORS, 2015 IEEE. IEEE, 2015.

[5] Harman, Stephen. "Characteristics of the Radar signature of multi-rotor UAVs." Radar Conference (EuRAD), 2016 European. IEEE, 2016.

[6] Väilä, Minna, et al. "Incorporating a stochastic model of the target orientation into a momentary RCS distribution." Radar Conference (RadarCon), 2015 IEEE. IEEE, 2015.

[7] Li, Chenchen J., and Hao Ling. "An investigation on the radar signatures of small consumer drones." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 16 (2017): 649-652

[8] Troy, Willis, Michael Thompson, and Yang Li. "ISAR imaging of rotating blades with an UWB radar." Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS), 2015 Texas Symposium on. IEEE, 2015.

[9] Thayaparan, Thayananthan, et al. "Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data." IET Radar, Sonar & Navigation 1.4 (2007): 289-299.

[10] Ritchie, Matthew, et al. "Multistatic micro-Doppler radar feature extraction for classification of unloaded/loaded micro-drones." IET Radar, Sonar & Navigation (2016).

[11] De Wit, J. J. M., R. I. A. Harmanny, and P. Molchanov. "Radar micro-Doppler feature extraction using the singular value decomposition." Radar Conference (Radar), 2014 International. IEEE, 2014.

[12] Molchanov, Pavlo, et al. "Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures." International Journal of Microwave and Wireless Technologies 6.3-4 (2014): 435-444.

[13] Moses, Allistair, Matthew J. Rutherford, and Kimon P. Valavanis. "Radar-based detection and identification for miniature air vehicles." Control Applications (CCA), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011.

[14] Mendis, Gihan J., et al. "Deep learning based doppler radar for micro UAS detection and classification." Military Communications Conference, MILCOM 2016-2016 IEEE. IEEE, 2016.

[15] Chen, Victor C. The micro-Doppler effect in radar. Artech House, 2011.

[16] Allen, Jonathan. "Short term spectral analysis, synthesis,

and modification by discrete Fourier transform." IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing 25.3 (1977): 235-238.

저자

문 민 정(Minjung Moon) **정회원**

· 2016년 2월 : 한서대학교 항공전자공학과 (공학사) 학사졸업
· 2016년 3월~현재 : 항공대학교 항공전자정보공학 석사과정

<관심분야> : SAR 신호처리, SAR 원격탐사, 위성전자 레이다 탑재체

송 경 민(Kyungmin Song)

· 2015년 2월 : 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사) 학사졸업
· 2015년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정

<관심분야> : SAR 신호처리, SAR 원격탐사, 위성전자 레이다 탑재체

유 수 진(Sujin Yu)

· 2013년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 학사과정

<관심분야> : 위성통신, SAR 신호처리, 위성전자 레이다 탑재체

심 현 석(Kyungmin Song)

· 2012년 3월~현재 : 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 학사과정

<관심분야> : 위성통신, SAR 신호처리, 위성전자 레이다 탑재체

이 우 경(WooKyung Lee)

· 1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사) 학사졸업
· 1994년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사) 석사졸업
· 2000년 12월 : 런던대학교(UCL) 전기전자 공학과 (공학박사) 박사과정
· 1999년 9월 : 한국과학기술원 인공위성센터 연구교수
· 2003년 1월 : 삼성종합기술원 책임연구원
· 2004년 9월~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학과 부교수

<관심분야> : 인공위성 시스템, 위성전자 레이다 탑재체