

고해상도 FMCW 레이더 영상 합성과 CW 신호 분석 실험을 통한 드론의 탐지 및 식별 연구

송경민¹⁾ · 문민정¹⁾ · 이우경^{*,1)}

¹⁾ 한국항공대학교 항공전자정보공학과

Experimental Study of Drone Detection and Classification through FMCW ISAR and CW Micro-Doppler Analysis

Kyoungmin Song¹⁾ · Minjung Moon¹⁾ · Wookyung Lee^{*,1)}

¹⁾ Korea Aerospace University, Dept. of Electronics and Information Eng., Korea

(Received 13 October 2017 / Revised 24 January 2018 / Accepted 23 March 2018)

ABSTRACT

There are increasing demands to provide early warning against intruding drones and cope with potential threats. Commercial anti-drone systems are mostly based on simple target detection by radar reflections. In real scenario, however, it becomes essential to obtain drone radar signatures so that hostile targets are recognized in advance. We present experimental test results that micro-Doppler radar signature delivers partial information on multi-rotor platforms and exhibits limited performance in drone recognition and classification. Afterward, we attempt to generate high resolution profile of flying drone targets. To this purpose, wide bands radar signals are employed to carry out inverse synthetic aperture radar(ISAR) imaging against moving drones. Following theoretical analysis, experimental field tests are carried out to acquire real target signals. Our preliminary tests demonstrate that high resolution ISAR imaging provides effective measures to detect and classify multiple drone targets in air.

Key Words : ISAR(역합성 개구 레이더), micro-Doppler(마이크로 도플러), Drone Detection(드론 탐지 식별)

1. 서론

드론을 이용한 사생활 침해, 공역 침범, 테러와 같은 우려가 증가하며, 이에 대한 대응책이 요구되고 있다. 안티 드론 기술의 핵심인 드론 탐지 기술은 최근,

북한의 무인기 도발의 증가와, 차세대 성장산업으로 각광받는 상업용 드론의 급속한 발전속에 높은 관심을 받고 있다¹⁾. 이를 위해 기존의 음향, 열, 광학 센서를 포함한 다양한 센서 기반의 드론 탐지 연구가 보고된 바 있으나, 크기가 작고 저고도에서 빠른 속도로 이동하는 드론 표적의 특성을 고려하면, 통상적인 감시 센서 체계로는 탐지와 대응이 어렵다고 알려져 있다^{2,3)}. 전파 기반의 능동 레이더 센서는 전파 반사

* Corresponding author, E-mail: wklee@kau.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

표적의 거리와 속도를 파악하기에 용이하고, 전천후 주야간 운용이 가능하기 때문에 국내외에서 드론 탐지 체계로 적합한 수단이 될 수 있다.

드론은 크기가 매우 작고, 레이더 반사도가 낮은 재질과 구조로 제작되어 일반적인 기존의 레이더 운용으로는 탐지가 어렵다. 고풍력 레이더를 사용하여 드론을 탐지한 사례가 있으나, 장거리에서 획득한 점표적에 불과하기 때문에 탐지가 가능한 경우에도 새를 비롯한 다양한 비행체와 분류하기는 어렵다^[4].

본 논문에서는 드론의 탐지뿐만 아니라 분류에도 활용할 수 있는 레이더 운용 기법을 제안하고 분석하였다. 최근 활발히 연구되고 있는 마이크로 도플러 탐지 기법은 드론 로터에 의한 도플러 특성 정보를 분석하는 것으로서 이동하는 드론에서의 오차가 증가하고, 드론 본체에 대한 정보에 대해서는 취약하게 되는 문제가 있어서 실제 활용에 한계가 있다. 본 논문에서는 마이크로 도플러 기반 드론 탐지의 이론적 예측과 실제 실험 결과를 비교한 후 새로운 대안의 필요성을 제시한다. 이를 위해 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상 기법을 도입하여 고해상도의 드론 레이더 영상을 획득하는 방안을 도입하고 실제 실험을 통해 검증한다. 모의 시뮬레이션에 국한된 기존 드론 탐지 연구를 벗어나 실제 비행하는 드론을 대상으로 실험을 수행한다. 실제 저공 비행하는 상업용 드론에 대해 정밀 영상 처리를 수행하여 서로 다른 종류의 드론을 분류할 수 있는 고해상도 레이더 식별 영상을 획득한 결과를 제시한다.

2. 레이더 기반의 드론 탐지 기술 분석

레이더를 기반으로 하는 표적 탐지 연구는 기계 학습과 같은 수치 해석 기법의 발전에 힘입어 드론 분류로까지 확장되고 있다. 그러나 민간용 소형 드론은 Fig. 1과 같이, 그 재질과 모양, 작은 크기 등으로 인해 레이더 반사 면적이 약 -20 dBsm 이하로 낮아 탐지가 되더라도 형상 및 식별 정보 확인이 어렵다^[5]. 따라서 일반적인 레이더 신호 기반의 드론 탐지 방식을 서로 다른 드론 기체의 분류와 형상 확인에 취약하여 실효성이 떨어진다.

기존 드론 탐지 연구는 로터의 형상이나 도플러 등을 파악하는 수준으로 머물렀으나, 최근의 드론 탐지 동향은 드론의 형상을 파악하고 식별할 수 있는 정밀

한 레이더 운용 기법을 요구하고 있다. 비행 중인 드론을 탐지 및 식별하기 위해 사용할 수 있는 레이더 수신 정보는 로터에 의한 고주파수 도플러 성분과 본체에서 반사되는 저주파수 위상 편이 정보로 구분할 수 있다^[7].

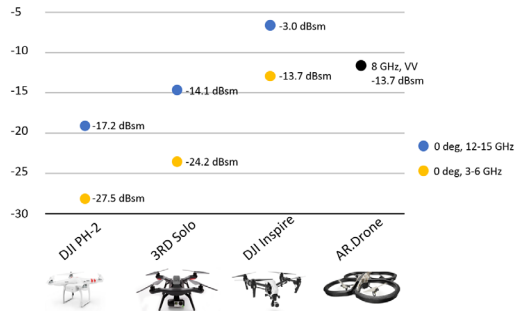


Fig. 1. Measured radar cross sections of small drone systems^[6]

2.1 마이크로 도플러 탐지 기법

마이크로 도플러 분석 기법은 최근 가장 활발하게 이루어지고 있는 드론 탐지 연구 방법이다. 비교적 간단한 구조의 CW(Continuous Wave) 레이더를 이용하여 저비용의 탐지 체계를 구축함으로써, 드론의 고유 진동 특성에 따라서 다르게 수신되는 마이크로 도플러 패턴을 분석하거나 데이터를 수집하여 자료로 표적 분류의 목적의 활용될 수 있다^[8,9].

회전익의 드론에서 반사되는 레이더 신호는 탑재체 중량과 로터의 개수, 로터의 회전 속도에 영향을 받으며 이는 수신단에서 검출되는 도플러 정보에 반영된다. 수신된 CW 신호는 스펙트로그램(Spectrogram)과 캡스트로그램(Cepstrogram) 신호 처리를 통해 도플러 분석을 수행할 수 있으며 이를 통해 드론의 이동 속도를 계산할 수 있다. 스펙트로그램과 캡스트로그램에서 검출되는 최대 도플러 편이값과 편이 구간은 신호 분석을 통해 드론의 로터 구조나 회전 속도를 추정에 활용될 수 있다^[10]. 그러나 기존 연구들은 대부분 제한된 공간에서 수행된 사례가 많고, 다양한 환경에서 다중 드론에 대해 수행되지 않아 실제 드론 운용 환경에서의 실효성에 대한 검증이 부족하다고 할 수 있다.

회전익이 대다수를 이루고 있는 상용 드론에서 로터의 회전 운동은 비교적 간단한 기하 구조로 모델링할 수 있다. 레이더와 회전하는 로터 사이의 기하 구조는 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다.

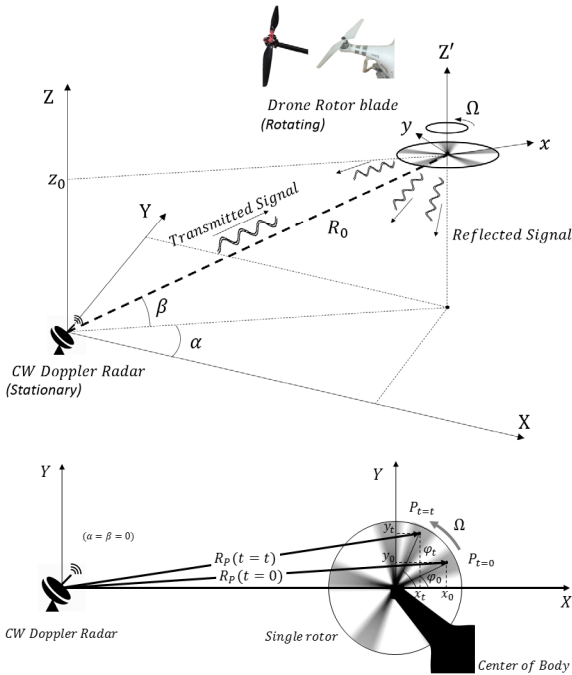


Fig. 2. Geometry of rotating blade and radar

레이더로부터 회전하는 로터의 중심까지의 거리를 R 이라고 한다면, 로터의 회전 각속도가 Ω 일 때, 전파 산란 지점으로부터 시간에 따른 거리 $R_p(t)$ 는 식 (1)로 주어진다.

$$R_p(t) = [R_0^2 + l_p^2 + 2l_p R_0 \cos(\psi_0 + \Omega t)]^{1/2} \quad (1)$$

식 (1)에서 l_p 와 ψ_0 는 각각 산란 지점 P 까지의 로터 길이와 초기 각도를 의미한다. 식 (1)로부터, 경사각 β 에 의한 높이 z_0 를 반영하고, 원거리에서 로터 날개 길이를 $(\frac{l_p}{R_0})^2 \rightarrow 0$ 와 같이 근사하여 정리하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_p(t) \cong R_0 + \cos\beta (l_p \cos\psi_0 \cos\Omega t - l_p \sin\psi_0 \sin\Omega t) + z_0 \sin\beta \quad (2)$$

레이더 전파는 드론 로터의 모든 단면에서 산란되는데 반사도는 로터의 반사면을 따라 불균일하게 분포한다. 본 연구에서는 로터의 단면 구간에서 최대 반사도 값을 A_p 로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

로터의 단일 블레이드에서 반사된 신호는 식 3과 같이 길이 L 에 대한 적분 식으로 주어진다. N 개 블레이드가 존재하는 로터에서는 N 개의 초기 각도를 갖는 반사파가 존재한다. 각 반사파의 초기 위상각을 $\theta_k = \theta_0 + k\frac{2\pi}{N}$, ($k = 0, 1, 2, \dots, N-1$)로 표현하면 레이더 수신파의 총합은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$s_L(t) = A_p \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + z_0 \sin\beta]\right\} \cdot \int_0^L \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} l_p \cos\beta \cos(\Omega t + \psi_0)\right\} dl_p \quad (3)$$

$$s_\Sigma(t) = A_p \sum_{k=0}^{N-1} S_{L_k}(t) \quad (4)$$

회전하는 블레이드는 각속도 Ω 에 의해 도플러 편이를 유발하는데, k 번째 블레이드 날개에 의한 도플러 주파수 편이는 식 (3)의 위상값을 미분하여 식 (5)와 같이 표현될 수 있다^[11].

$$f_{Dk}(t) = \frac{L}{\lambda} \Omega \cos\beta [-\sin(\psi_0 + k2\pi/N) \sin\Omega t + \cos(\psi_0 + k2\pi/N) \cos\Omega t] \quad (5)$$

식 (5)에서 추출되는 주파수 정보는 고속의 회전 블레이드에서 발생하는 미약한 신호로서 표적 드론의 로터 운동 특성을 반영한다. 위 식을 활용하여 대표적인 상용 드론인 DJI사의 팬텀-3 로터의 회전 운동을 모델링한 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

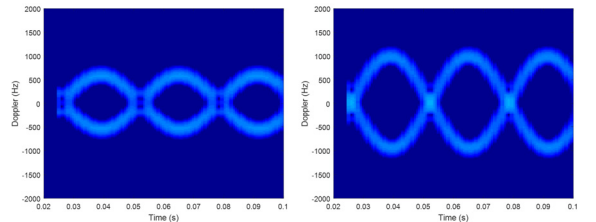


Fig. 3. Doppler analysis simulation results of Phantom-3 rotor (Left : C-Band, Right : X-Band)

X축은 시간, Y축은 도플러 편이를 각각 가리킨다. 주파수를 각각 C-대역과 X-대역으로 사용하였을 때 단

일 블레이드의 도플러 편이가 서로 다른 특징을 보여 줌을 확인할 수 있다. 회전 속도가 2460 RPM으로 고정되어 있어서, 시간축 상에서 패턴의 주기가 동일하나 레이더 마이크로 도플러 편이 값이 X-대역과 C-대역의 중심 주파수 변이만큼 증가함을 확인할 수 있다.

2.2 ISAR 영상 획득 기법

ISAR는 고정된 레이더가 이동하는 표적의 신호를 받아 높은 해상도의 전·천후 레이더 영상을 획득하는 레이더 운용 기법이다.

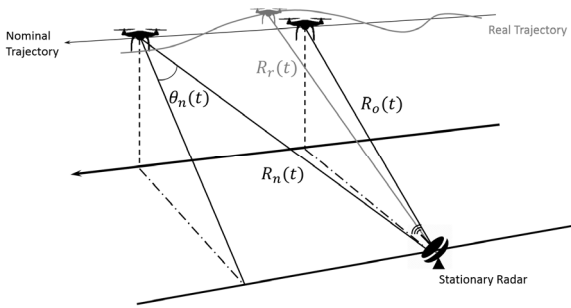


Fig. 4. Geometry of drone ISAR imaging

ISAR 기법은 주로 군용으로 사용되어 항공기, 미사일 등과 같이 비교적 일정한 비행경로를 갖는 대상의 식별에 활용된다. 통상적인 고정익 비행체와는 달리, 가벼운 드론은 날씨 환경의 영향을 크게 받고 병진 운동과 회전 운동에 의한 요동이 크기 때문에 정밀한 신호 보정 알고리즘이 필요하다.

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 드론 탐지 ISAR 체계의 기하 구조를 나타낸다. 시간 t에 따른 이상적인 드론 비행경로를 $R_n(t)$ 이라고 할 때, 드론의 요동으로 인한 오차를 반영한 경로를 $R_r(t)$ 로 표현하였다.

장거리 드론 탐지에는 고출력의 펄스 레이더를 사용하는 것이 필요하나, 도심과 같은 근거리 환경에서는 저전력의 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더를 사용하는 것이 유리하다. Fig. 5는 FMCW 신호 기반의 ISAR 처리 과정에 대해 나타낸다. 본 논문에서는 도심이나 주요 시설물에 근접하여 직선 비행하는 드론에 FMCW ISAR를 적용하여 탐지 및 식별을 수행하는 시나리오를 가정한다. FMCW ISAR의 처리 과정은 일반적인 SAR 영상의 처리 과정과 유사하나, 드론의 불균질한 움직임을 보상하기 위해 거리 지연 보상, 위상 요동 및 거리 오차를 보상하는 정밀

신호처리가 중요한 역할을 수행한다^[12,13].

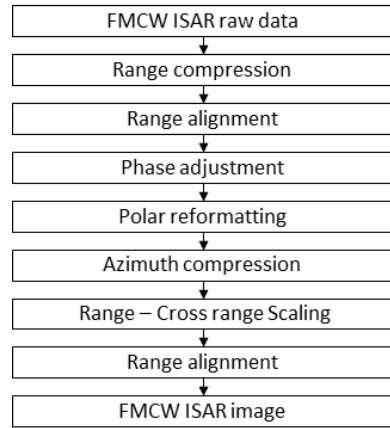


Fig. 5. Procedure of drone ISAR imaging

비행중인 드론의 경로는 요동에 의해 이상적인 직선 경로로부터의 거리 오차 $\Delta R(t)$ 가 발생하게 되는데, 실제 레이더 관측점으로부터 드론까지의 거리는 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$R(t) = \Delta R(t) + \sqrt{R_0^2 + (V_r t)^2} \quad (6)$$

Fig. 4에서와 같이, 식 (6)에서 R_0 와 V_r 은 각각 레이더에서 표적까지의 최단 거리 및 진행 방향으로의 속도를 나타낸다. 요동으로 인한 속도 오차에 비해 진행 방향으로의 속도 V_r 이 매우 클 경우 속도 V_r 은 상수로 가정할 수 있다. 테일러 전개를 이용하여 $R(t)$ 를 2차 다항식으로 근사하면 식 (7)과 같이 표현된다^[13].

$$R(t) = R(t_0) + \left\{ \frac{d\Delta R(t_0)}{dt} - V_r \sin\theta(t_0) \right\} (t - t_0) + \left\{ \frac{d^2 \Delta R(t_0)}{dt^2} + \frac{V_r^2 \cos^2\theta(t_0)}{2R(t_0)} \right\} (t - t_0)^2 + \dots \quad (7)$$

ISAR 영상은 수신되는 신호의 위상 정확도에 의해 결정된다고 할 수 있다. 드론의 요동이 증가하여 거리 오차 $\Delta R(t)$ 가 커질 경우, 증가되는 위상 오차로 인해 영상 품질이 저하되어 드론 식별이 어려워지기 때문에, 이를 보상하는 과정이 필요하다. 과정을 단순화하기 위해 식 (7)에서 N차 항 미만의 거리 오차 $\Delta R(t)$ 를 도출하고, 이를 바탕으로 위상 오차 $\Delta\phi(t)$

를 계산한 후 레이더 수신 처리과정에서 이를 보상하게 된다^[15]. 식 (8)은 N 차 항으로 근사화한 수식과 이에 대응되는 위상 오차를 보인다.

$$\Delta R(t) = \sum_{n=3}^{N+1} a_n t^n, \Delta\phi = \exp\left[\frac{4\pi \cdot \Delta R(t)}{\lambda}\right] \quad (8)$$

a_n 은 거리 $R(t)$ 의 N 차 항 미만인 거리 오차 계수를 의미한다. 거리와 위상에 대한 오차 보상 이후, 각각 거리 압축, 방위 압축, 거리 정렬을 수행하여 최종적으로 드론에 대한 ISAR 영상을 획득할 수 있다. 고정익이 아닌 회전익 드론에서는 크기가 작을수록 요동 변화 범위가 증가한다. 따라서 실제 실험 데이터에 적용할 경우 식 (8)에서 고려해야할 고차항의 범위가 증가하게 된다. 본 논문에서는 드론의 크기에 따라 각기 다른 요동 보상 알고리즘을 적용하여 미세한 요동의 변화를 최대한 보상할 수 있도록 신호처리를 반복하였다. 야외 실험에서는 직선 비행하는 서로 다른 두 기종의 드론에 대한 ISAR 영상을 획득하였고, 수집된 레이더 수신 데이터는 저장된 후 실험실에서 영상 획득 알고리즘에 입력되었다.

3. 실험 수행 결과 및 비교 분석

기존 알려진 드론 탐지 방식은 개활지에서의 활용을 목표로 하기 때문에 고출력, 고비용의 대형 시스템을 요구하여 민간 목적에의 활용이 제한된다. 특히 장애물이 많은 도심 환경에서의 드론 탐지는, 다수의 저출력 소형 레이더를 분산망으로 구축하여 음영 지역을 제거하는 것이 필요하게 된다.

본 연구에서는 이동형 드론 탐지 시스템을 가정하여 상업용 소자로 구성된 1 W급 출력을 갖는 다중 대역의 소형 레이더를 구축하였다. 이를 활용하여 실제 도심에서 운용되는 드론을 대상으로 마이크로 도플러 패턴 분석을 먼저 수행하고 다음으로 ISAR 기법을 적용한 2차원 드론 영상을 획득하는 실험을 수행하였다. 위상 기반의 드론 요동보상 알고리즘을 적용하여 다양한 드론의 물리적 형상과 규격이 파악될 수 있도록 영상 품질을 개선하는 신호처리를 적용하였다. 실험에는 크기와 구조가 다른 두 기종의 드론을 사용하였다. Fig. 6은 실험 대상 드론을 보여주며, 각각의 사양 및 규격은 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of target drones in experiment

제 원	드론 1 (팬텀-3)	드론 2 (MC-5)
무게	1.2 kg	9.8 kg
이동 속도	5.5 m/s	5.5 m/s
이동 고도	30 m	30 m
블레이드	Quad Type	Hexa Type
크기(W*L*H)	0.3 * 0.3 * 0.2 m	1.2 * 1.2 * 0.8 m

레이저용으로 널리 사용되는 소형 드론인 DJI사의 팬텀-3는 4개의 로터를 갖고 있으며 30 cm 미만의 카메라를 탑재하는 무게 1.2 kg의 소형 시스템이다. 반면 MC-5 드론은 국내 기업인 휴인스사에서 개발한 상업용 드론으로, 이륙 중량이 약 10 kg에 달하며 6개의 로터를 갖고 있다.



Fig. 6. Target drones for radar imaging experiments

공중에서 이동하는 드론의 마이크로 도플러 분석을 위해 중심 주파수가 각각 9.8 GHz, 5.8 GHz인 X-대역과 C-대역의 CW 레이더 신호를 사용하였다. 반면 드론에 대한 고해상도 ISAR 영상은 광대역의 FMCW 신호를 이용하여 획득하였다. FMCW 레이더의 경우, C-대역과 X-대역의 중심 주파수를 기준으로 400 MHz의 대역폭을 갖는 선형 칩 신호를 사용하였다. 각 레이더의 송신 출력은 32 dBm으로 고정하였으며 PRF는 1000 Hz, 선형 변조 구간에서의 sweep time은 1 ms로 설정하였다.

3.1 마이크로 도플러 탐지 실험 결과

Fig. 7은 드론의 마이크로 도플러 특징을 수집하기 위한 비행 실험 시나리오를 보여준다. 실험은 레이더로부터 거리 5 m, 높이 2 m에서 정지 비행중인 드론을 CW 레이더로 탐지하도록 구성되었다.

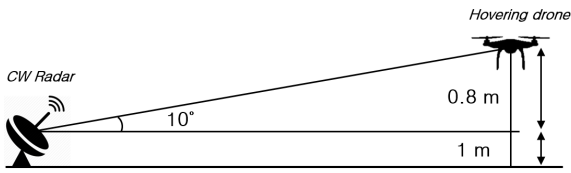


Fig. 7. Drone micro-Doppler experiment

3.1.1 Short Time Fourier Transform Analysis

회전하는 로터에서 수신된 반사 신호를 STFT(Short Time Fourier Transform)에 적용한 결과에서 마이크로 도플러 스펙트로그램 특성을 분석한 후 2절에서 제시한 이론적 예측과 비교하였다. 회전하는 로터의 최대 주파수 편이는 식 (5)에서와 같이 일반적인 도플러 관계식으로 계산할 수 있으며, 측정된 실험값의 주기성을 도출하여 정확한 회전 속도와 블레이드의 길이를 추정할 수 있다. 서로 다른 로터의 정확한 주기성을 확인한 후, 추출된 패턴의 특성을 분석하여 이론적 예측과 비교함으로써 드론에 장착된 로터 또는 블레이드의 숫자를 추정할 수 있다.

Fig. 8은 드론의 고정된 시나리오에서 측정은 실험 결과를 보여준다. x축은 시간, y축은 도플러 편이값에 대응한다. 회전 속도 1500 RPM을 갖는 로터가 각각 1개 또는 2개 존재할 때 블레이드의 회전에 의한 마이크로 도플러 현상의 편차를 확인할 수 있다. 블레이드의 길이는 12 cm이고 사용된 주파수는 5.8 GHz이다. 로터의 회전 속도는 모두 같기 때문에 마이크로 도플러 편이는 1200 Hz로 일정하게 나타나지만, 2개의 로터에 대한 스펙트로그램의 경우 같은 주기의 패턴이 로터의 숫자만큼 중첩되어 복잡한 형태를 반복하게 된다. 이처럼 다중 로터의 경우, 회전 로터의 위치에 따라 반사 강도가 달라지고, 이에 따라 마이크로 도플러 특성도 변함을 확인할 수 있다. Fig. 3의 이론적 예측과 비교해보면, 위상 잡음에 의한 영향이 매우 크게 두드러짐을 확인할 수 있는데 이는 블레이드의 형상에 의한 신호의 왜곡과 드론 본체의 진동에 의한 결과라고 할 수 있다.

같은 레이더를 사용하여 동일한 실험을 실제 비행하는 팬텀-3에 적용한 실험 결과는 Fig. 9와 같다. 동일 구간에서의 도플러 스펙트럼 주기 분석을 통해 4개의 로터, 즉 4개의 로터가 만들어 내는 마이크로 도플러 현상임을 알 수 있다. 로터의 회전 주기를 역으로 계산하여 약 2460 RPM의 속도로 회전하고 있음을 추정할 수 있다. 또한 도플러 주파수로부터 회전 날개

의 속도를 구하여 날개 길이가 약 12 cm, 2개의 블레이드를 갖는 로터 4개로 구성된 드론임을 알 수 있다.

Fig. 10은 같은 실험을 X-대역에서 반복 수행한 결과이며 Fig. 3에서 주파수에 따른 마이크로 도플러 시뮬레이션에서 이론적으로 예측된 결과가 유사함을 확인할 수 있다. X-대역에서는 도플러 편이가 1200 Hz에서 2050 Hz로 C-대역 실험 결과에서 중심 주파수에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

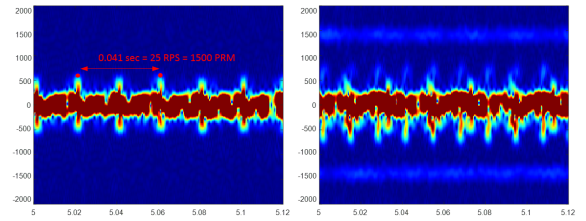


Fig. 8. Micro-Doppler signature of rotating rotors (Left : 1 rotor, Right : 2 rotors)

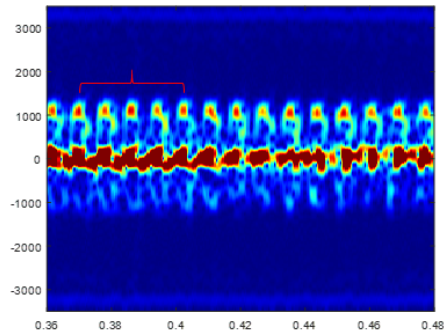


Fig. 9. Micro-Doppler signature of phantom-3 (4 rotor, C-Band, 2459 RPM)

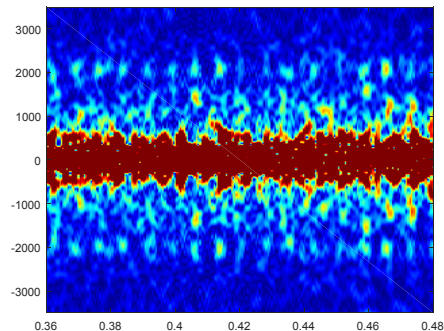


Fig. 10. Micro-Doppler signature of phantom-3 (4 rotor, X-Band, 2459 RPM)

동일한 실험을 6개 로터 구조의 대형 드론인 MC-5 로 기종을 변경하여 반복하였고, 그 결과를 Fig. 11에 스펙트로그램으로 나타내었다. 마이크로 도플러 패턴 분석 결과, 수신 신호는 0.04 초의 주기 패턴과 최대 주파수 편이 1400 Hz을 보이고, 이를 통해 25 cm 길이의 블레이드 2개가 1480 RPM의 속도로 회전하면서 6개 로터로 비행 중인 드론임을 추정할 수 있다.

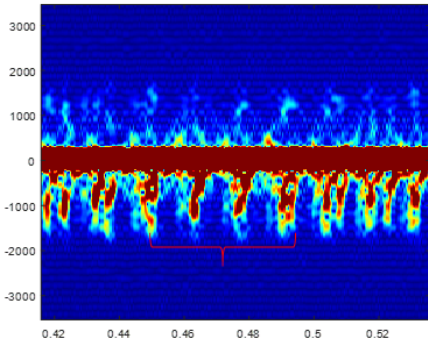


Fig. 11. Micro-Doppler signature of MC-5 (4 rotor, C-Band, 1480 RPM)

이러한 탐지 및 분석 방법은 간단한 신호처리만으로 드론에 장착된 로터의 구성을 파악할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 드론 본체의 구조와 형태를 파악하는 것은 불가능하며, 다중 로터의 경우 도플러 분포가 복잡해져서, 주기성 확인이 어려워지는 한계가 있다. 또한 도플러 패턴은 드론의 요동에 의해 매우 민감하여 실험 시나리오에 따라 다양한 방식으로 표현될 수 있고, 따라서 특정 드론의 고유 패턴으로 매칭시키는 것은 타당하지 않다. 이는 Fig. 3의 모의 실험 결과와 비교시에 명확해지는데, 실제 실험에서는 CW 신호 분석을 통해 블레이드의 특성을 쉽게 파악할 수 있는 반면, 실제 실험에서는 드론의 요동에 의해 파형의 왜곡이 발생하여 회전 속도와 드론 블레이드에 대한 정보가 손실된다. 또한 드론 플랫폼의 요동과 레이더와의 상호 위치에 따른 가변성으로 인해 신호 패턴의 고유성이 손실되고, 이는 기계학습에 기반한 패턴 분류 알고리즘 적용을 어렵게 만드는 문제로 이어지게 된다.

특히 이러한 방식은 로터에서 반사되는 미세 신호에 의존하기 때문에 탐지 거리가 극히 제한되는 문제로 인해 실제 도심이나 광역 감시망에서의 드론 탐지 활용성은 매우 낮다고 할 수 있다.

3.1.2 Cepstral Analysis

캡스트로그램은 주파수 스펙트럼에 역 푸리에 변환을 하여 얻어지는데, 각기 다른 주파수의 마이크로 도플러 신호를 합으로 분리해 낼 수 있도록 로그 함수를 적용하여 주기성을 갖는 신호를 분석하는 데 유용하다고 알려져 있다^[16]. 주로 음성 신호 해석과 지진파 분석에 활용 되어 왔는데, 본 논문에서는 드론의 마이크로 도플러 진원지와 주기성을 파악하는 목적으로 Fig. 12로 표현되는 캡스트럼 분석을 적용하였다.

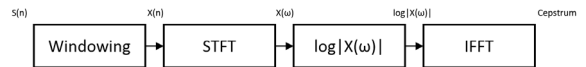


Fig. 12. Flow chart of cepstral analysis

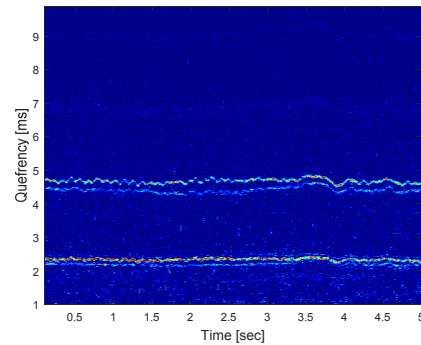


Fig. 13. Cepstral analysis of Phantom-3 (4 rotor, C-Band, PH3)

팬텀-3 드론의 정지 비행 상태를 C-대역 상에서 캡스트럼 분석을 하면, Fig. 13과 같이 시간에 따른 큐프렌시(Quefrency)값을 도출할 수 있다^[17]. 큐프렌시는 수신 신호에 존재하는 각각의 주파수 주기 성분에 대응된다. 각각 2개의 대칭으로 배치된 로터 회전의 큐프렌시 값을 4.6 ms 근처에서 확인할 수 있는데 이는 로터 회전 주파수 2460 Hz에 대응되며 Fig. 9에서 얻는 값과 일치한다. 유사한 큐프렌시 성분이 일정한 간격으로 추출되는데, 이는 샘플링에 의한 앨리어싱 효과라고 할 수 있다.

이러한 분석 방식은 드론 플랫폼이 안정된 시나리오에서만 제한적으로 적용될 수 있으며, 드론의 요동이 커질 경우, 오차가 무작위한 범위에 분포하여 이론적 모델을 통한 추정이 불가능하게 된다.

또한 앞서 언급한대로 도플러 정보 기반의 분석은 단순히 로터의 회전 성분만을 다루므로 드론의 형상

에 대한 식별 기능을 제공하지 못하며, 탐지 거리가 극히 제한된다. 따라서 이에 대한 대안으로 원거리 드론 형상을 추출하기 위한 레이더 영상 획득이 필요하게 된다.

3.2 ISAR 영상 획득 실험 결과

드론 ISAR 영상 획득 실험은 한국항공대학교의 육군비행장 활주로에서 수행되었다. 앞 절의 실험에서 사용한 2기의 드론을 조정하여 비행 고도와 비행속도를 각각 30 m, 5.5 m/s의 등속으로 유지하도록 운행하였다. 지상 레이더는 수평 방향으로 30도의 빔 폭을 갖는 15 dBi의 혼 안테나를 사용하여 10초간 반사 신호를 수집할 수 있도록 실험을 구성하였다. 복수의 표적이 동시에 출현하는 시나리오를 가정하여 두 기의 드론을 함께 운용하였으며 Fig. 14는 실제 드론 탐지 과정을 보여준다. 드론의 이동 구간은 약 300 m 길이의 활주로 구간으로 설정하였다.



Fig. 14. Drone ISAR experiment environment

Fig. 15는 팬텀-3 드론의 ISAR 영상 생성을 위한 원시 데이터의 처리 과정을 보여준다. ISAR 처리 기법은 기본적으로 거리 압축, 방위 압축, 거리 지연보상의 과정을 거치는 SAR 신호처리 원리와 유사하며, 본 논문에서는 추가적으로 드론 요동 보상을 위해 표적 기반의 요동 보상 알고리즘을 추가하였다^{18,19)}. 비교적 큰 드론인 MC-5의 ISAR 영상 역시 팬텀-3와 동일한 과정으로 획득할 수 있는데, 상대적으로 레이더 반사 계수가 높고 자세 안정도 특성이 좋아서 고품질의 영상을 얻기에 유리하다.

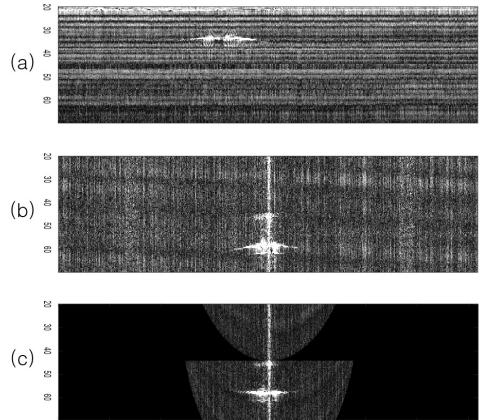


Fig. 15. Drone ISAR imaging procedures
 ((a) Range compression,
 (b) Azimuth compression,
 (c) Range cell migration correction)

Fig. 16은 두 드론에 대한 ISAR 영상 처리 결과를 각각 보여준다. 두 영상 모두 실제 비행중인 Fig. 14에서의 획득되었다.

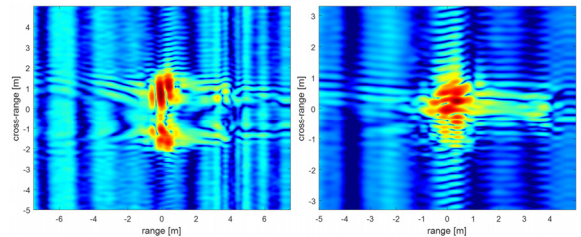


Fig. 16. Drone ISAR image with no motion compensation
 (Left : Phantom-3, Right : MC-5)

실험에 사용된 레이더의 기술적 사양에 의해 기대할 수 있는 거리 및 방위 해상도 최대값은 각각 약 30 cm와 11 cm이다. 초기 실험에서는 표적 드론의 형상을 충분히 식별할 수 있을 것으로 기대하였으나, 드론의 요동으로 인한 신호처리 오차가 발생하였고, 이는 ISAR 영상의 품질 저하로 나타남을 확인하였다.

드론 ISAR영상의 경우, 앞서 설명한 바와 같이 드론의 가속과 요동이 일반적인 비행체에 비해 현저하게 증가하여 일반적인 표적에 비해 영상 품질 저하 문제가 더욱 심각하게 된다. 특히 상대적으로 무게가 가볍고 크기가 작은 DJI 드론의 경우, 요동에 의한 오

차 발생이 더욱 심각하여, 마치 2개의 드론 표적이 존재하는 형태로 영상 왜곡이 발생하였다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 영상 처리 과정에 추가적인 신호 보상 알고리즘이 적용되어야 한다. SAR와는 달리 ISAR의 경우, 비행체의 속도, 위치 등의 기하 정보를 확인할 수 없기 때문에 원시 데이터에서 추출된 도플러 변수만을 사용하여 오차 보정을 수행해야 한다. 본 논문에서는 위상 기반의 요동 보상을 적용하여 드론 ISAR 영상을 형성하였고, 그 결과를 Fig. 17과 18에 각각 제시하였다.

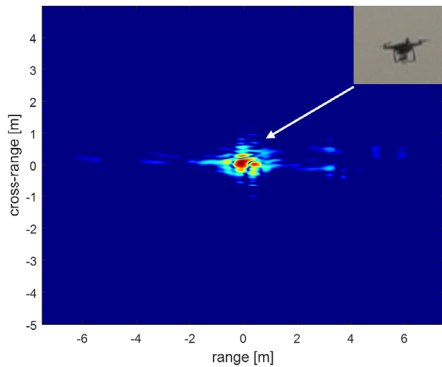


Fig. 17. ISAR image with motion compensation (Phantom-3)

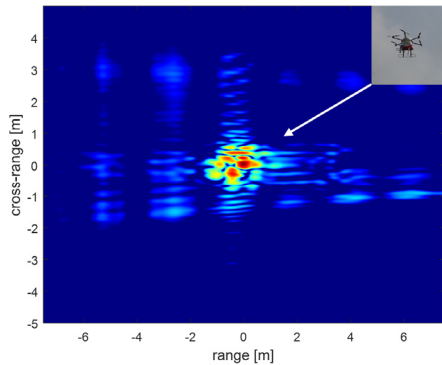


Fig. 18. ISAR image with motion compensation (MC-5)

표적 추출이 어려웠던 Fig. 16과 비교하여 개선된 ISAR 영상은 표적 드론의 형상이 매우 선명하게 드러남을 확인할 수 있다. ISAR 영상의 해상도를 바탕으로 추정된 드론은 크기가 각각 0.5 m, 1.2 m 내외로 측정되어 실제 실험에 사용된 드론의 크기와 일치함

을 확인할 수 있다. 2차원 ISAR 영상 추출의 정확도가 개선되고 배경 잡음이 억제되어 드론 본체의 형상과 로터의 구조가 파악되었고 이를 기반으로 팬텀-3와 MC-5 드론의 구분이 가능하였다.

서로 다른 드론의 크기, 로터의 개수에 따른 형태가 높은 정확도로 구별되었으며 1 W 미만의 낮은 신호 출력의 FMCW 신호임에도 불구하고 100 m 이내의 탐지 거리 구간에서 ISAR 영상을 확보할 수 있음을 검증하였다. 가장 대중적인 상용 소형 드론 팬텀-3와 상업용 중형 드론 MC-5에 대한 고품질의 ISAR 영상 획득이 가능하며, 이 외에도 다양한 형태의 드론 표적에 대한 식별 및 분류도 가능할 것으로 예측된다.

3.3 실험 요약

본 논문에서는 레이더 기반의 드론 탐지를 위해 CW 도플러 레이더를 이용한 마이크로 도플러 분석과 FMCW 레이더를 이용한 ISAR 영상 획득실험을 수행한 결과를 제시하였다.

CW 도플러 레이더의 경우, 로터의 길이와 회전 속도를 추정할 수 있었다. ISAR의 경우, CW 도플러 레이더로는 확인할 수 없는 물리적 형태나 구조 등에 대해 직관적으로 확인할 수 있는 영상을 제공하여 드론 탐지와 함께 식별을 수행할 수 있었다. Table 2는 각각의 레이더 기법 방식에 기반한 드론 탐지 실험 결과를 요약하였다.

Table 2. Drone radar detection performance summary

	획득 정보	활용 분야 및 범위
마이크로 도플러	드론의 회전 로터로 인한 마이크로 도플러 정보	회전익 드론 날개의 크기 및 회전 속도 추정
	기체 미세진동에 의한 마이크로 도플러 정보	근거리 드론의 로터 및 블레이드 형태 식별
	주파수 스펙트로그램 분석	마이크로 도플러의 주기성 분석
ISAR	드론의 본체 및 로터의 물리적 구조	원거리에서의 드론 정밀 해상도 획득 및 품질 향상
	요동 보상이 적용된 고해상도 ISAR 영상	도심의 위협 근접 드론에 대한 형상 식별

4. 결론

본 연구는 증가하는 드론의 활용과 함께 발생 가능한 안전사고, 치안 위협 등에 대응하기 위한 방안으로 레이더를 활용한 드론 탐지 및 식별 기술을 다루었다. 대표적인 레이더 기반의 드론 탐지 기법으로 CW 레이더를 활용한 마이크로 도플러 분석과 FMCW 기반의 ISAR 영상 합성 기법을 제시하고 각각의 활용 방안과 가능성을 제시하였다.

마이크로 도플러 분석은 회전익 로터의 회전 성분만을 다루므로 직접적인 드론의 식별 목적으로는 타당하지 않으며, 미약한 신호 특성으로 인해 도심이나 원거리에서 이동하는 드론에 대해서는 적용이 어렵다. 본 논문에서는 이를 극복하기 위해 ISAR 영상 기법을 활용하여 고해상도 드론 영상을 획득함으로써, 서로 다른 종류의 드론에 대한 형상의 식별이 가능함을 제시하였다.

최근 드론 탐지 연구가 높은 관심을 받고 있고 상업용 드론 탐지 시스템 시장이 커져가는 반면, 국내 관련 연구는 아직 미진하다고 할 수 있다. 특히 기존 드론 탐지 연구는 모의 실험에 기반한 이론 연구나 제한된 실험실 환경에서 수행된 경우가 많아 실용적 연구 개발에 대한 필요성은 매우 높다고 할 수 있다.

본 연구는 실제 비행하는 드론에 대하여 다중 대역의 레이더 신호를 송출하고 수신된 신호의 정밀 신호 처리 실험 결과를 분석하였다. 고해상도 ISAR 영상 합성을 통해 국내에서 상업적으로 많이 사용되고 있는 두 종류의 드론을 탐지하고 상호 식별이 가능함을 보였다. 저전력의 FMCW 기반 레이더를 사용하여 실제 비행하는 드론의 ISAR 영상 추출이 가능함을 제시하였다. 향후 초광대역 레이더 시스템을 구현하여 실험을 확장될 경우 수 cm급의 ISAR 영상을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 기계 학습 등을 적용하여 실시간 드론 분류도 가능해질 것으로 예측되는 등 관련 연구로의 확장성이 매우 클 것으로 기대된다.

ISAR 영상에 기반한 드론 탐지는 영상 획득 및 피아 식별에 용이하여 위협 드론을 세나, 다른 비행체와 구분하는데 적극 활용될 수 있을 것이다. 드론 자체의 요동과 함께 블레이드의 회전에 따른 미세한 위상 잡음 신호는 드론 ISAR 영상의 품질을 저하시킨다. 추가적인 드론 ISAR 영상의 품질 개선을 위해 위상 잡음을 억제하는 알고리즘의 적용이 필요하며 이는 후속 연구로 제시될 예정이다. 또한 가속 신호처리를 통

한 드론 ISAR 영상의 실시간 생성은 대용량의 드론 데이터 베이스 구축으로 이어져 향후 4차 산업 혁명의 기계 학습과 결합할 경우 국내 광역 드론 지상망 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2018년도 한국항공우주연구원의 연구비에 의하여 지원된 연구의 결과임.

References

- [1] Ryan J. Wallace, Jon M. Lof, "Examining Unmanned Aerial System Threats & Defenses: A Conceptual Analysis," EMBRY-RIDDLE, 2015.
- [2] Salloum, Hady, et al., "Acoustic System for Low Flying Aircraft Detection," Technologies for Homeland Security(HST), 2015 IEEE International Symposium on, IEEE, 2015.
- [3] Park, Seongha, et al., "Combination of Radar and Audio Sensors for Identification of Rotor-Type Unmanned Aerial Vehicles(uavs)," SENSORS, 2015 IEEE, IEEE, 2015.
- [4] Harman, Stephen, "Characteristics of the Radar Signature of Multi-Rotor UAVs," Radar Conference (EuRAD), 2016 European, IEEE, 2016.
- [5] Schroder, Arne, et al., "Numerical and Experimental Radar Cross Section Analysis of the Quadcopter DJI Phantom 2," Radar Conference, 2015 IEEE, IEEE, 2015.
- [6] Li, Chenchen J., and Hao Ling, "An Investigation on the Radar Signatures of Small Consumer Drones," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 16, pp. 649-652, 2017.
- [7] M. J. Moon, "Research on the Drone Detection based on the Radar," Satellite Communications and Space Industry, Vol. 12(2), pp. 99-103, 2017.
- [8] Väilä, Minna, et al., "Incorporating a Stochastic Model of the Target Orientation into a Momentary RCS Distribution," Radar Conference(RadarCon), 2015 IEEE, IEEE, 2015.

- [9] Molchanov, Pavlo, et al., "Classification of Small UAVs and Birds by Micro-Doppler Signatures," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* 6.3-4, pp. 435-444, 2014.
- [10] V. C. Chen, F. Li, S. Ho and H. Wechsler, "Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, Vol. 42(1), pp. 2-21, 2006.
- [11] Chen, Victor C., "The Micro-Doppler Effect in Radar," Artech House, pp. 111-123, 2011.
- [12] 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.
- [13] K. W. Lee, "Implement of Small Drone Detection based on ISAR and Analysis," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science* 28(2), pp. 159-162, 2017.
- [14] I. G. Cumming, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data," Artech House, pp. 225-421, 2004.
- [15] Jian LI, Renbiao Wu, Victor C. Chen, "Robust Autofocus Algorithm for ISAR Imaging of Moving Targets," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 37, No. 3, July 2001.
- [16] R. I. A. Harmanny, et al., "Radar Micro-Doppler Feature Extraction using the Spectrogram and the Cepstrogram," 11th European Radar Conference, 2014.
- [17] B. P. Bogert, M. J. R. Healy en J. W. Tukey, "The Quefreny Analysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo Autocovariance, Cross - Cepstrum and Saphe Cracking," in: M. Rosenblatt(ed.): *Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis*, Wiley, New York, Chapter 15, pp. 209-243, 1963.
- [18] J. H. Song, "High Resolution Full-Aperture ISAR Processing through Modified Doppler History based Motion Compensation," *Sensors* 2017, No. 6, 2017.
- [19] Delisle G. Y., "Moving Target Imaging and Trajectory Computation using ISAR," *IEEE Trans. Aerospace Electronics System*, No. 30, pp. 887-899, 1994.