

항공 감시 시스템에서의 미확인 무인기 비행체 OFDM 신호원 이동 여부 수동 탐지 알고리즘 개발

주호성, 양현중*
포항공과대학교

zxcqa123@postech.ac.kr, *hyunyang@postech.ac.kr

Development of an Algorithm for Passive Detecting the Movement of Unidentified-Flying-Objects OFDM Sources in an Air Surveillance System

Hosung Joo, Hyun Jong Yang*
Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

요 약

비행체 관리 및 안전 유지를 위한 노력은 크게 두 가지다: 비행체 식별 및 이동 여부 탐지다. 미확인 비행체를 식별하더라도 비행체의 오작동이나 제어권 이탈 및 GPS 조작 등으로 비행체가 움직일 수 있으며, 이동하는 비행체는 이동하지 않는 비행체에 비해 더 위험하다. 그러므로, 본 논문에서는 비행체의 식별 여부와 무관하게 비행체의 이동 여부를 탐지하는 방법을 논의한다.

I. 서 론

비행체는 움직이는 경우가 많다. 빠른 속도로 움직이는 비행체는 움직이지 않는 비행체에 비해 더 위험하여 각별한 관리가 필요하다. 그러므로, 비행체의 이동 여부를 자동으로 탐지할 필요가 있다. 통신 시스템을 통해 이동 여부를 알아내는 방법은, 그 대상이 어떤 물체이든 상관없이, 중복 없이 전부를 세 가지로 나눌 수 있다: 능동(active) 탐지와 수동(passive) 탐지 그리고 그 물체가 스스로 움직임 여부를 알려주는 것이다. [1]

능동 탐지란, 레이더와 같이 전파를 발사하고 되돌아오는 전파를 수신하거나 어둠 속에 있는 물체에 빛을 비추어 되돌아오는 빛을 관찰하는 등, 탐지기 측에서 에너지를 가하는 경우를 말한다. 그러므로, 능동 탐지는 대부분 큰 전력 소모를 필요로 하고, 그만큼 채널에 사용 전력이 높아, 같은 채널을 공유하는 다른 통신망에는 제밍처럼 작동한다는 특징이 있다.

수동 탐지는 탐지기 측에서 에너지를 가하지 않고, 물체가 스스로 방사하는 에너지나 태양빛에 반사된 빛을 감지하는 등, 물체가 스스로 움직임 여부를 알려주려 하지 않았을 때 수신할 수 있는 사이드채널 신호의 상관성 정보를 보고 이동 여부를 알아내는 기술이다. 수동 탐지 기술은 능동 탐지 중 수신 부분만 다루는데, 송신 전파의 상황을 잘 모르는 상태에서 탐지하므로 빅데이터의 데이터마이닝 등의 기법이 유효할 수 있다.

마지막으로 물체가 스스로 움직임 여부를 알려주는 기술은 최근 3GPP 표준 등에서 무인기(Unmanned Aerial Vehicle; UAV)와 제어기(UAV Controller; UAVC) 사이의 적절한 무선 통신을 위해 논의되고 있다. [2]

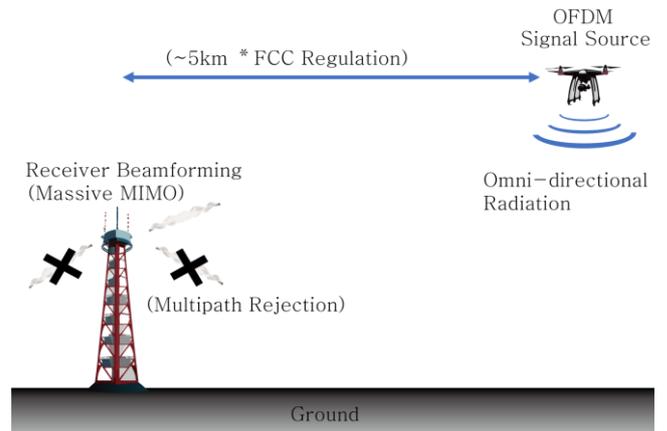


그림 1. (ideal) Movement Detection Passive System

특히 수동 탐지는 기술의 난해함 때문에 기술 발전이 느림이 알려져 있는데, 수동 탐지의 연구는 나머지 두 경우에도 활용이 용이하던 점에서 연구 가치가 충분하다. 그러므로 본 논문에서는 수동 탐지 기술을 다룬다. 이상적인 massive MIMO(Multiple-input-multiple-output) 기술이 적용된 통신탑을 수동 탐지 시스템의 모델을 시각화하면 그림 1 과 같다. Massive MIMO 기술은 장거리 통신에서 필연적으로 발생하는 다중경로 신호를 억압하고, 비행체 특성상 관측되는 LoS(Line-of-Sight) 신호만 추출하여 비행체의 신호를 효율적으로 분석할 수 있다. 이때 송출전력을 제한한 FCC 기준 등에 의해 비행체와의 전파 거리는 5km 수준으로 가정한다.

II. 본론

수신된 전파만을 분석하여 전파 신호원이 이동중인지 확인하려면 가장 먼저 도플러(Doppler) 효과를 생각할 수 있다. 신호원이 이동하며 생기는 도플러 효과는 크게 두 가지 측면에서 수신 전파를 변동시키는데, 하나는 신호 주파수의 변화가 생기며, 또 하나는 특수상대론적 관점에서 전송률(data rate)의 변화가 생긴다. 우선 신호 주파수의 변화 Δf 는 반송파 주파수 f_c 와 바라보는 방향의 속도 v_r 및 빛의 속도 c 에 대해 다음 수식 (1)과 같다.

$$\Delta f = \frac{f_c v_r}{c} \quad (1)$$

현재 시장에서 유통중인 초소형무인기(i.e. 드론)가 활용하는 대역은 2.4GHz 및 5.2~5.8GHz의 상용 제3차 ISM(Industrial, Science, and Medical) 대역이다. 본 연구를 수행하며 DJI, Skydio, Autel 을 비롯한 총 8 개 회사의 10 개 제품의 드론을 바닷가의 무간섭 장거리 조건에서 드론 비행 가능 구역의 3km~5km 측정 거리에 비행시키며 10dBi 이상의 고이득 MIMO 배열 안테나를 통해 전파를 실측하였다. 이들 드론은 상기 2.4GHz 및 5GHz 의 ISM 대역에서 반송파 주파수를 결정하고 약 10~40MHz 수준의 대역을 활용하는 것으로 나타났다.

이러한 반송파 주파수 수준에서, 표준[2]에서 논의한 드론의 최대 비행속도 300km/h 를 수식 (1)에 대입하면 최대 2kHz 수준의 도플러 천이에 의한 주파수 변동이 계산된다. 그러나 이는 일반적으로 활용하는 주파수 채널 분할(Frequency Division Multiplexing; FDM) 기술을 위한 전압제어 국소발진기(Local Oscillator; LO)의 일반적인 주파수 오류(Carrier Frequency Offset; CFO) 수준인 수십 kHz 에 비해 크게 작다. 전압제어 LO 는 작동 온도와 같은 변수가 가장 큰 오류를 만들어내고, 작동 온도는 수시로 달라질 수 있어 도플러 천이 주파수의 탐지를 통한 이동 여부 탐지는 이론적으로 어렵다. 다시 말해, 도플러 천이 주파수를 통해 비행체의 이동 여부를 알기 위해선 진행방향 속도가 서로 다른 최소 두 가지 이상의 데이터를 짧은 시간 내에 한꺼번에 알아야 한다. 이는 일반적인 드론 운용 시나리오와 차이가 있으며, 일반적인 시나리오에서 도플러 탐지를 하려면 능동 탐지가 어울린다.

수동 탐지를 위해선 두 번째 방법인 특수상대론적 관점에서의 전송률 변화를 파악할 수 있다. 우리는 우선 상기 수동 탐지 데이터를 통해 스펙트로그램 분석을 했고, 기업 연구 협약에 의해 데이터 원본을 공개할 수 없지만, 현재 시장에 있는 드론들은 총 세 가지 형태의 변조(modulation) 기법을 활용한 것으로 파악했다. 5MHz 이상의 넓은 대역폭에서 상대적으로 평탄한 주파수 응답을 보이는 형태는 OFDM 변조로 생각되며, 1ms 이내의 시간동안 1MHz 미만의 좁은 주파수 대역을 점유한 이후 다른 주파수로 주파수 호핑(hopping)을 보이는 FH-SS (Frequency Hoping Spread Spectrum) 변조 형태가 나타났다. 마지막으로 최대 40MHz 수준의 대역에 99% 에너지 대역폭을 갖는 가우시안 펄스 모양이 나타났는데, 이는 GFSK(Gaussian Frequency Shift Keying)의 특징이다.

FH-SS 와 GFSK 는 타이밍 동기가 맞을 때 장거리 통신을 위해 활용할 수 있는 변조 기법으로, 장거리 통신에서 신뢰도가 높아 이 변조 기법들을 통해선 특히 드론의 제어 신호 통신이 이루어지는 것으로 추론하였다. 이때 GFSK 활용하는 LoRa 와 같은 기존 장거리 통신 기법을 살펴보면, UAVC 와 같은 게이트웨이에서 pull 신호를 전송해 FDM 으로 신호원의 출처를 구분하고 타이밍 동기를 MAC(Media Access Control) 단에서

맞춰 전송률을 제어한다. 본 논문에서 사용한 시스템 모델에선 UAVC 의 신호가 보이지 않는다고 가정 한 일반적인 모델인데, 이때 FH-SS 또는 GFSK 의 타이밍 정보를 알기 어려워 전송률을 추정하기 어렵다. 따라서 미확인 무인기 신호원이 방사하는 신호의 10% 미만을 차지하는 FH-SS 또는 GFSK 에 비해 90% 이상의 시간동안 사용하는 OFDM 신호원을 고려하였다.

OFDM 신호는 비슷한 수준의 대역폭을 점유하더라도 크게 3GPP 표준 방식의 2048 샘플을 활용하는 긴 심볼 방식과 IEEE 802.11 표준 방식의 64 샘플을 이용하는 짧은 심볼 방식이 있다. [3] 장거리 통신에는 긴 심볼 방식이 유리한데, 데이터 분석 결과 실제 활용중인 방식은 두 가지 모두 활용중인 것으로 나타났다. 데이터 분석에는 기존의 ML(Maximum Likelihood) 타이밍 동기 및 CFO 추정 기법 [4]을 구현하였다.

기존 기법은 CP(Cyclic Prefix)와 심볼 길이를 선행 정보로 요구한다. UAV-UAVC 통신에선 서로 알고 있는 심볼 길이와 샘플링 주파수를 활용하지만, 본 시스템 모델에선 심볼 길이를 모르고 있으므로 주파수-안정적인 수정진동자를 통한 61.44MHz I/Q 샘플링 시스템으로 오버샘플링하여 심볼 길이를 역추정하였다. 이때 SNR 수준은 약 5dB 였으며, 61.44MHz 샘플링 시스템에서 무인기 기종과 당시 활용 대역폭에 따라 256 개 또는 512 개 샘플에서 가장 높은 상관성을 보였고, 타이밍 정보를 얻을 수 있었다. 이를 통해 심볼 전송률을 수 ms 동안 연속 추정하면 10 개 미만의 샘플이 더 많거나 더 적게 수신되어 타이밍 정보가 아주 약간 변하며, 이때 신호원이 이동중인 것으로 판정하였다.

III. 결론

본 논문에서는 독자적인 통신 기법을 활용하는 미확인 무인기 비행체의 현재 이동 여부를 massive MIMO 고이득 안테나 시스템을 활용한 단일 수신기에서 OFDM 심볼 전송률의 변화를 통해 탐지하는 수동 탐지 기술을 다루었다. 본 논문의 기술은 장거리에서 신호원 이동여부 탐지를 수행할 수 있고, 이를 통해 움직이는 항공 비행체를 조기에 탐지해 국가 안보에 활용할 수 있다. 차후 연구에서는 다중 수신기에서 동시에 수동탐지해 탐지 성능과 신뢰도를 높이는 기술 개발을 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP), grant funded by MSIT(Ministry of Science and ICT) as (No. RS-2023-00250191, Practical Multi UAV Base-Stations, RS-2023-00229541, Development of Big Data and AI-Based Radio Monitoring Platform) and (No.2021-0-00161, 6G MIMO System Research).

참 고 문 헌

- [1] 이인재, 최상혁, 주인원, 전진우, 차지훈, 안재영. "불법 드론 대응을 위한 저고도 드론 탐지 기술 동향." ETRI 전자통신동향분석 37(1). (2022 Feb.)
- [2] 3GPP Standard, TR 23.754 (Retrieved at Dec. 8th, 2023).
- [3] IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9363693>.
- [4] Beek, J. J. van de, M. Sandell, and P. O. Borjesson. "ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems." IEEE Transactions on Signal Processing 45 (7). pp. 1800-1805. (1997)