

드론의 통신 신호 분석을 위한 단계적 RF 측정 시나리오

Stepwise RF Measurement Method for the Analysis of Drone's Communication Signals

김성건 · 노영훈 · 홍익표* · 육종관

Sung-Geon Kim · Yeong-Hoon Noh · Ic-Pyo Hong* · Jong-Gwan Yook

요 약

드론의 활용도가 높아짐에 따라, 드론의 통신 신호에 대한 정확한 측정 및 분석의 필요성이 강조되고 있다. 하지만 드론의 통신 신호를 분석할 때, 일반적인 스펙트럼 분석은 드론의 통신 신호가 갖는 과도 신호의 특성을 충분히 반영하지 못하여 유의미한 분석에 한계가 있다. 본 논문에서는 드론의 통신 신호가 갖는 과도 신호의 특성을 바탕으로 단시간 푸리에 변환을 이용한 분석의 필요성을 제시한다. 이를 바탕으로, 드론의 통신 신호 분석을 위한 단계적 RF 측정 시나리오를 제안하고, 서로 다른 두 드론에 대해 측정을 진행하여 제안하는 시나리오를 검증하였다.

Abstract

As the utilization of drones increases, the need for accurate measurement and analysis of communication signals from drones is emphasized. However, when analyzing the communication signals of a drone, conventional spectrum analysis cannot fully reflect the transient characteristics of communication signals from drones: This limits the significance of the analysis. In this paper, we present the need for analysis using a short-time Fourier transform based on the transient characteristics of the communication signals from drones. On this basis, we propose a stepwise RF measurement method for the analysis of communication signals from drones and present the validation of the proposed method with measurements on two different drones.

Key words: Drone, Short-Time Fourier Transform, RF Signal, Measurement, Frequency Hopping Spread Spectrum

I. 서 론

최근 드론의 기술력이 발전함에 따라 드론에 대한 수요는 빠르게 증가하였다. 현재는 영상촬영, 농업 지원 등 사람이 직접 하기 힘들거나 기피되는 영역을 주로 담당하고 있지만, 최근 높은 신뢰도를 요구하는 물품 수송, 통

신망 활용, 교통수단 등으로 활용하고자 하는 연구도 진행되고 있다^[1].

하지만 드론의 활용도가 높아지면서 드론을 이용한 테러, 도촬, 해킹과 같은 범죄의 위협도 높아졌고 이에 다양한 방식으로 드론을 탐지, 식별, 무력화하고자 하는 연구도 진행되고 있다. 소리^[2], 영상^[3], 레이더^[4] 등을 이용한

「본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호:21SCIP-B146658-04)의 연구비 지원과 ETRI부설연구소의 연구과제(무인이동체 원격제어 및 데이터 관련 무선신호 실내전송특성 분석)로 수행한 연구결과입니다.」

연세대학교 전기전자공학부(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*공주대학교 정보통신공학부(Department of Information & Communication Engineering, Kongju National University)

· Manuscript received January 25, 2021 ; Revised February 23, 2021 ; Accepted March 22, 2021. (ID No.20210125-009)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

다양한 방식이 있지만, 드론의 RF 신호에 대한 분석을 통해 드론을 탐지하고 식별하는 연구가 활발히 진행되고 있다^[5]. 그러나 드론의 RF 신호를 측정 및 분석하는 방법에 대한 뚜렷한 기준이 없어 많은 경우, 단순히 스펙트럼 분석을 진행하여 드론의 탐지에 활용하고 있다^{[6],[7]}.

이처럼 드론의 RF 신호에 대한 분석의 필요성이 강해짐에 따라 해외에서는 드론을 위한 다수의 측정시설을 개발하여 운용하고 있으며^[8], 측정을 기반으로 드론의 통신 신호 분석을 위한 기술 개발이 꾸준히 진행되고 있다^[9].

본 논문에서는 드론의 RF 신호가 갖는 특성에 대한 분석을 기반으로 일반적인 스펙트럼 분석의 한계를 보이고, 이를 극복할 수 있는 단시간 푸리에 변환을 이용한 분석 방법을 제시하였다. 또한, 이를 바탕으로 임의의 드론의 RF 신호를 측정 및 분석하는 시나리오를 제안하고, 서로 다른 두 기종의 드론에 대해 측정하여 결과를 비교하였다.

II. 드론 RF 신호의 특성 및 분석 방법

2-1 드론 RF 신호의 특성

드론의 안정적인 운용을 위해 드론과 조종기는 통신 링크를 통해 정보를 끊임없이 주고받으며 동작한다. 드론과 조종기 간의 통신 링크는 조종기가 드론을 제어하기 위한 제어 신호를 전송하는 상향 링크와 드론이 촬영한 영상정보 및 드론의 현재 고도, 기울기, 센서 정보 등을 조종기로 전송하는 하향 링크로 구성된다(그림 1).

조종기로부터 드론으로 전송되는 상향 링크는 드론을

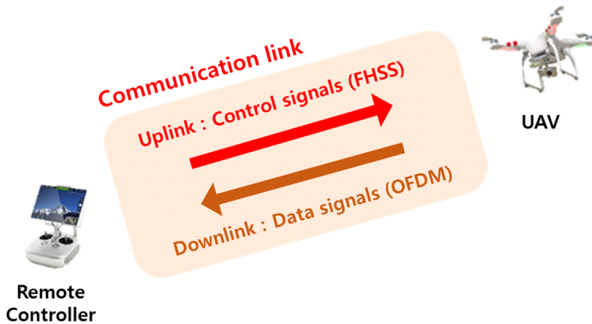


그림 1. 드론과 컨트롤러 간의 통신 링크

Fig. 1. Communication link between drone and controller.

제어하는 제어 신호로서 높은 안정성 및 간섭 저항성이 필수적이다. 이를 위해 드론 제조사들은 여러 변조 방식을 사용하는데, 대다수의 제조사는 주파수 도약 대역 확산(frequency hopping spread spectrum, FHSS) 방식을 사용한다^[10]. 주파수 도약 방식은 정해진 시간에 따라 다수의 독립 채널을 도약하며 통신하는 방식으로, 채널을 계속 바뀌가며 통신하기 때문에 특정 채널에서 간섭이 발생하여도 통신이 끊어지지 않고 계속 유지될 수 있다는 장점이 있고, 높은 보안성을 갖는다. 드론으로부터 조종기로 전송되는 하향 링크 중 드론의 상태 정보 역시 드론의 안정적 운용을 위해 주파수 도약 방식을 통해 전송된다.

드론으로부터 조종기로 전송되는 하향 링크의 경우, 가장 핵심적인 신호는 드론을 통해 촬영된 영상 신호이다. 드론의 촬영 성능이 발전함에 따라 전송해야 하는 데이터의 크기가 증가하였고, 그로 인해 빠른 데이터 전송 속도가 하향 링크의 핵심적인 요구 특성이다. 드론 제조사들은 WiFi, OFDM, PSK 등의 다양한 변조 방식을 사용하고 있고, 본 연구에 사용한 드론은 OFDM 기반의 옥시링크(OcuSync)라는 제조사의 자체 통신 프로토콜을 사용하고 있다.

그림 2는 신호의 변조 방식에 따른 통신 신호의 스펙트럼을 시간 축에서 나타낸 그래프이다. 기존 드론의 RF 신호에 관한 연구는 스펙트럼 분석기를 이용하여 특정 주파수 대역에서의 신호의 세기를 측정하여 분석하는 방식으로 진행되었다. 이러한 방식은 분석하고자 하는 신호의 시간에 따른 변화가 크지 않을 때는 유효한 방법이지만, 주파수 도약 신호와 같이 시간에 따라 급격하게 변화하는 신호에는 적합하지 않다.

스펙트럼 분석기의 스위프 주기(sweep time)는 식 (1)과 같이 근사할 수 있다.

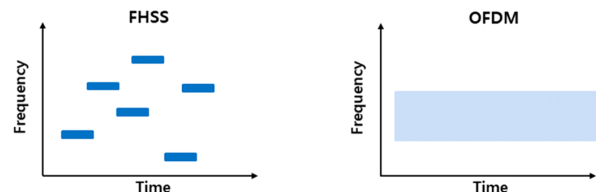


그림 2. 변조 방식에 따른 스펙트럼 차이

Fig. 2. Difference of the spectrum according to the modulation method.

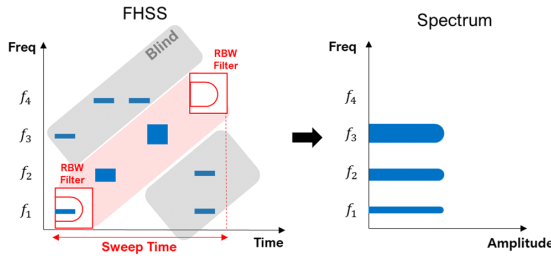


그림 3. 스위프 주기에 의해 신호의 소실 발생
Fig. 3. Signal loss due to the sweep time.

$$(Sweep\ time) \simeq \frac{(Frequency\ span)}{(Resolution\ bandwidth)^2} \quad (1)$$

따라서 주파수 도약 신호를 측정하기 위한 빠른 스위프 주기를 얻기 위해서는 높은 분해능 대역폭(resolution bandwidth)이 불가피하고, 이는 부정확한 측정으로 이어진다.

그림 3과 같이 스위프 주기가 신호의 체류 시간(dwell time)보다 길면 분해능 대역폭이 측정 대역을 스위프 하는 동안 놓치는 신호가 발생한다. 이는 분해능 대역폭 바깥의 신호는 스펙트럼 분석기가 입력 신호로 받아들일 수 없기 때문이다. 하지만 일반적인 스펙트럼 분석기의 경우, 최소 스위프 시간은 약 1 ms이고, 일반적인 드론의 주파수 도약 신호는 약 500 μ s의 체류 시간(dwell time)을 갖기 때문에 스펙트럼 측정 시 놓치는 신호가 필연적으로 발생한다. 따라서 일반적인 스펙트럼 분석을 통한 드론의 RF 신호 분석의 한계를 극복할 분석 방법이 필요하다.

2.2 단시간 푸리에 변환을 통한 드론 통신 신호 분석

단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform, STFT)은 시간에 따라 빠르게 변화하는 비정상(non-stationary) 신호의 분석에 사용되는 방법이다. 기존의 스펙트럼 분석은 스위프 주기 동안 측정된 신호 전체를 주파수 영역에서 분석하는데, 단시간 푸리에 변환을 이용하면 신호가 시간에 따라 주파수 영역에서 어떻게 변화하는가에 대한 분석이 가능하다. 단시간 푸리에 변환은 식 (2)와 같이 정의된다^[11].

$$STFT\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t)w(t-\tau)]e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (2)$$

$x(t)$ 는 단시간 푸리에 변환을 통해 분석하고자 하는 신호를 나타내고, $w(t)$ 는 윈도우 함수를 나타낸다. 신호 전체에 대해 변환을 진행하는 일반적인 푸리에 변환과 달리 윈도우 함수가 시간 축을 따라 이동하면서 짧은 시간에 대해 변환을 연속적으로 진행하기 때문에, 신호가 시간이 지남에 따라 어떻게 변화하는지를 파악할 수 있다.

단시간 푸리에 변환을 통한 분석을 진행할 때, 반드시 시간-주파수 해상도에 대해 고려해야 한다. 불확정성 원리에 의해 시간에 대한 해상도와 주파수에 대한 해상도는 서로 트레이드-오프 관계에 있으므로, 분석하고자 하는 신호에 따라 적절한 해상도를 갖도록 하는 윈도우 함수 및 푸리에 변환의 길이를 설정해야 한다^[12].

단시간 푸리에 변환의 결과는 스펙트로그램으로 표현된다. 스펙트로그램은 시간-주파수 분석을 위한 그래프의 표현 방법으로, 시간과 주파수를 두 좌표축으로 하고, 색을 통해 신호의 세기를 나타내어 스펙트럼의 시간에 따른 변화를 시각적으로 나타낸다. 따라서, 주파수 도약 방식과 같이 시간에 따라 빠르게 변화하는 과도 신호의 분석에는 스펙트럼 분석이 아닌 단시간 푸리에 변환을 통한 스펙트로그램 분석이 필요하다.

III. 측정 시나리오 및 결과 분석

3.1 드론의 통신 신호 단계적 측정 시나리오

드론의 종류가 다양해지면서, 드론이 통신을 위해 사용하는 주파수, 통신을 위한 변조 방식 등도 다양해졌다. 따라서 드론의 통신 신호를 분석하고자 하면, 해당 드론이 통신을 위해 사용하고 있는 주파수를 찾아내고, 세부 측정을 진행하는 과정이 필요하다. 그림 4는 그러한 드론의 통신 신호 분석을 위한 단계적 측정 시나리오를 나타낸 것이다.

제안하는 측정 시나리오는 드론의 운용 주파수 전반에 대한 광대역 스펙트럼 측정으로 드론의 RF 신호가 주파수 영역에 어떻게 분포하고 있는지를 파악한다. 그 후 광대역 측정결과를 바탕으로 드론의 RF 신호가 주로 분포한 핵심 주파수를 정하고, 협대역 측정을 진행한다. 협대역 측정의 특성상 짧은 스위프 주기와 낮은 분해능 대역폭이 가능하므로 광대역 측정에 비해 높은 해상도를 얻

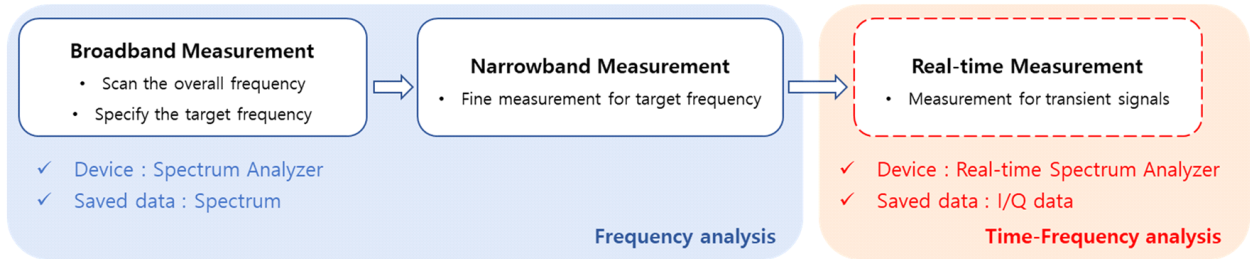


그림 4. 드론의 RF 신호 분석을 위한 단계적 측정 시나리오
Fig. 4. Stepwise measurement method for analysis of RF signals from drone.

을 수 있고, 시간에 따라 신호의 변화 여부도 파악할 수 있다. 마지막으로 협대역 측정으로도 분석할 수 없는 과도 신호에 대한 시간-주파수 분석을 진행한다. 이러한 단계적 RF 측정 시나리오를 통해 임의의 드론 통신 신호에 대한 상세 분석이 가능하다.

3-2 측정 환경 및 결과 분석

그림 5는 측정 환경을 그림으로 나타낸 것이다. 측정은 크기 29.3 m×15.4 m×10 m의 대형 전자파 차폐시설인 전파 플레이그라운드에서 진행하였다^[13]. 해당 시설은 측정 주파수 대역에서 100 dB의 차폐 성능을 갖고, -38 dB의 흡수율을 갖기 때문에 적은 오차의 측정이 가능하다. 측정은 DJI사의 두 기종(Phantom 4 Pro V2.0, Mavic Air 2)의 드론에 대해 진행하였다. 안테나는 138 MHz~6 GHz (MA-WO-UWB, MARS사)의 UWB omni-directional 안테나를 사용하였다. 거리는 해당 안테나의 원거리장 조건을 충분히 만족하도록 10 m로 설정하였고, 드론의 비행 높

이는 측정 정확도를 위해 안테나의 높이와 유사한 3 m로 설정하였다. 계측 장비는 스펙트럼 분석에는 스펙트럼 분석기(N9020A, Keysight사), 시간-주파수 분석에는 실시간 스펙트럼 분석기(RSA306B, Tektronix사)를 사용하였다.

드론의 RF 신호의 주파수 분포를 파악하기 위해 스펙트럼 분석기를 이용하여 138 MHz~6 GHz의 광대역 측정을 진행하였다. 분해능 대역폭은 100 kHz, 스위프 주기는 19.2 ms이다. 긴 스위프 주기로 인해 과도 신호를 한 번에 측정할 수 없으므로, 최고치 고정 함수를 사용하여 수 분간 측정하여 누적된 신호를 측정하였다. 그림 6은 광대역 측정의 결과를 나타낸 것으로 두 기종 모두 ISM 대역인 2.4 GHz 대역과 5.8 GHz 대역에 신호가 분포한다.

그림 6의 결과를 토대로 두 드론이 통신 채널로 ISM 대역을 사용하고 있고, 그 외의 주파수에는 신호가 없음을 확인하였기 때문에 해당 대역에 대해 세부 측정을 위한 2.3 GHz~2.5 GHz의 협대역 측정을 진행하였다. 분해능 대역폭은 100 kHz이고, 스위프 시간은 기기의 최솟값

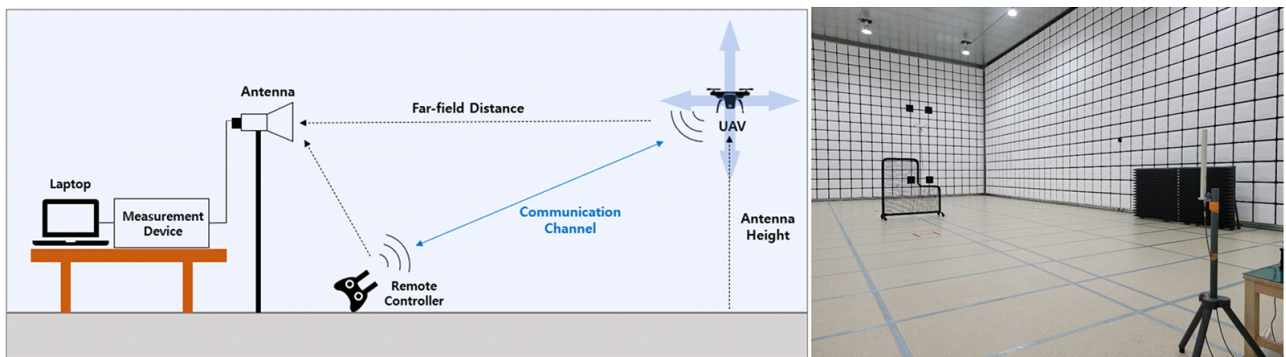


그림 5. 드론의 RF 신호 측정 환경
Fig. 5. Measurement setup for drone RF signal analysis.

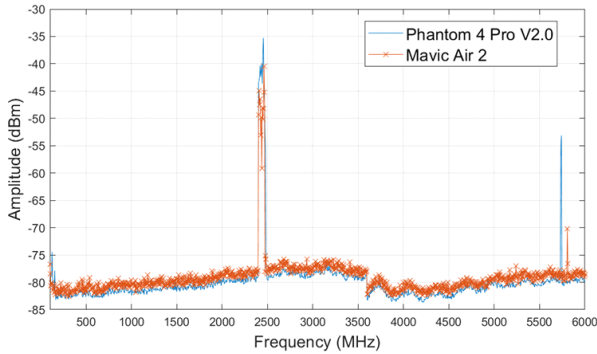


그림 6. 드론 기종별 광대역 측정결과: 핵심 주파수 선정
Fig. 6. Broadband measurement results according to the drone model: Determine the target frequency.

인 1 ms이다. 2.4 GHz~2.48 GHz에서 주파수 도약하는 신호를 확인할 수 있었고, 최고치 고정 함수를 사용하여 수 분간 측정된 결과는 그림 7과 같다. 기종에 따라 주파수 도약 신호의 크기 차이가 있음을 확인할 수 있지만, 주파수 도약 신호의 도약 패턴을 파악하거나 채널 내에 주파수 도약 신호와 영상전송 신호가 어떻게 분포되어 있는지 등을 상세히 해석하는 데에는 어려움이 있다.

주파수 도약 신호에 대한 시간-주파수 분석을 위해 실시간 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정된 결과를 I/Q 데이터로 저장한 후 단시간 푸리에 변환을 수행하였다. 단시간 푸리에 변환을 진행할 때에, 윈도우 함수는 Hamming window를 사용하였고, 윈도우 함수와 푸리에 변환의 길이는 모두 1,024로 진행하였다^[9]. 그림 8은 두 기종

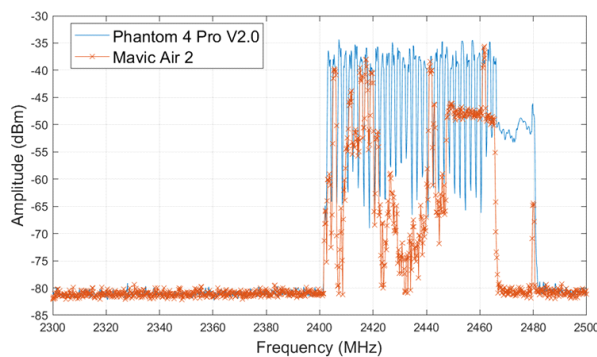
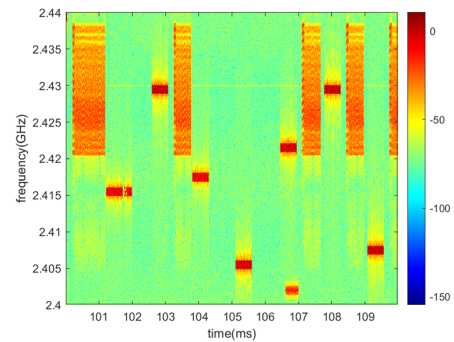
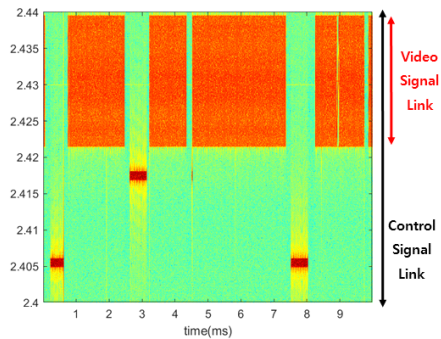


그림 7. 드론 기종별 협대역 측정결과: 2.4 GHz 대역
Fig. 7. Narrowband measurement results according to the drone model: 2.4 GHz band.

의 드론에 대해 2.4 GHz~2.44 GHz 대역을 10 ms 동안 측정한 결과를 스펙트로그램으로 나타낸 것이다. 그림 7의 스펙트럼 결과에서는 2.4 GHz 대역에 신호의 존재 여부와 크기만 파악할 수 있지만, 그림 8의 스펙트로그램을 통해 두 드론 모두 2.42 GHz~2.44 GHz에는 영상전송을 위한 OFDM 기반의 채널이 있고, 드론의 제어를 위한 주파수 도약 신호가 주변을 이동하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 7을 통해서 Phantom 4 Pro V2.0 드론의 영상전송 채널의 신호 세기가 Mavic Air 2 드론의 영상전송 채널의 신호 세기보다 작다는 것도 확인할 수 없었지만, 그림 8을 통해 특정 신호별 세기를 정확히 파악할 수 있다. 주파수 도약 신호의 경우, 주파수 도약의 주기와 도약 신호의 패턴의 차이를 확인할 수 있다. 주파수 도약 신호의 체류 시간(dwell time)은 500 μ s였고, 이는 드론 제조사의 스펙에 부합하는 결과이다. 측정에 사용한



(a) Phantom 4 pro V2.0



(b) Mavic air 2

그림 8. 드론 기종별 스펙트로그램 차이: 2.4 GHz~2.44 GHz
Fig. 8. Spectrograms according to the drone model: 2.4 GHz~2.44 GHz.

실시간 스펙트럼 분석기의 실시간 분석 대역폭이 40 MHz이기 때문에 2.4 GHz ISM 대역(2.4 GHz~2.48 GHz) 전체를 동시에 분석할 수 없었지만, 개별적인 분석을 통해 주파수 도약 신호는 2.4 GHz~2.48 GHz 대역 전반을 도약하며 전송되고 있음을 알 수 있었다. 또한, 스펙트로그램을 통해 특정 시간, 주파수에서 통신이 이루어지고 있음을 파악할 수 있으므로 I/Q 데이터로부터 추가적인 분석도 가능할 것이다. 이처럼 시간-주파수 분석을 통해 스펙트럼 분석으로는 파악할 수 없던 정보들을 분석할 수 있으므로 드론의 RF 신호에 대한 분석에는 시간-주파수 분석이 필요함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 스펙트럼 측정만을 통한 드론의 RF 신호 분석 방법의 한계를 제시하고, 단시간 푸리에 변환을 통한 시간-주파수 분석을 포함하는 단계적 측정 시나리오를 제시하였다. 그리고 제시한 시나리오를 통해 서로 다른 두 기종의 드론을 측정하여 결과를 비교하였다. 드론의 운용 주파수에 대한 광대역 및 협대역 측정을 통해 시간-주파수 분석을 진행해야 할 핵심 주파수를 정할 수 있고, 핵심 주파수에 대해 단시간 푸리에 변환을 이용한 시간-주파수 분석을 통해 기존 스펙트럼 분석에서 확인할 수 없었던 두 드론의 통신 신호를 측정할 수 있었다. 이러한 시나리오로는 드론의 통신 방식에 대한 상세한 정보를 추출할 수 있으므로 추후 암호화된 통신 신호의 복호화 등의 연구와 함께 활용된다면 드론이 통신하는 기저 대역 신호를 파악, 활용하여 드론의 탐지, 무력화 등 다양한 분야에 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] D. Cvitanic, "Drone application in transportation," in *2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies(SpliTech)*, Split, Sep. 2020, pp. 1-4.
- [2] I. Djurek, A. Petosic, S. Grubesa, and M. Suhanek, "Analysis of a quadcopter's acoustic signature in different flight regimes," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 10662-10670, Jan. 2020.
- [3] C. Aker, S. Kalkan, "Using deep networks for drone detection," in *2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance(AVSS)*, Lecce, Oct. 2017, pp. 1-6.
- [4] S. Rahman, D. A. Robertson, "Radar micro-Doppler signatures of drones and birds at K-band and W-band," *Scientific Reports*, vol. 8, p. 17396, Nov. 2018.
- [5] M. F. Al-Sad, A. Al-Ali, A. Mohamed, T. Khattab, and A. Erbad, "RF-based drone detection and identification using deep learning approaches: An initiative towards a large open source drone database," *Future Generation Computer Systems*, vol. 100, pp. 86-97, Nov. 2019.
- [6] M. S. Allahham, T. Khattab, and A. Mohamed, "Deep learning for RF-based drone detection and identification: A multi-channel 1-D convolutional neural networks approach," in *2002 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies(ICIoT)*, Doha, Feb. 2020.
- [7] P. Nguyen, M. Ravindranathan, A. Nguyen, R. Han, and T. Vu, "Investigating cost-effective RF-based detection of drones," in *Proceedings of the 2nd Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use*, Singapore, Jun. 2016.
- [8] B. Smith, B. Stark, T. Zhao, and Y. Chen, "An outdoor scientific data drone ground truthing test site," in *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Denver, CO, Jun. 2015, pp. 436-443.
- [9] A. Szabó, "GNU radio based testbed(GRaTe-BED) for evaluating the communication link of unmanned aerial systems," *Acta Universitatis Sapientiae: Electrical and Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 1 pp. 5-18, Sep. 2017.
- [10] S. Zoican, "Frequency hopping spread spectrum technique for wireless communication systems," in *1998 IEEE 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications - Proceedings. Spread Technology to Africa*, Sun City, Sep. 1998, vol. 1, pp. 338-341.

- [11] X. Ouyang, M. G. Amin, "Short-time Fourier transform receiver for nonstationary interference excision in direct sequence spread spectrum communications," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 4, pp. 851-863, Apr. 2001.
- [12] N. K. Kim, S. J. Oh, "Comparison of methods for parameter estimation of frequency hopping signals," in

International Conference on Information and Communication Technology Convergence, Jeju, Oct. 2017, pp. 567-569.

- [13] S. H. Joo, T. W. Ha, "Korea radio promotion association radio playground introduction," *The Proceedings of The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 5, pp. 56-60, Sep. 2020.

김 성 건 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1471-7371>



2020년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2020년 3월 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정
[주 관심분야] 전자기 수치해석, 전자파 보안, 드론, 마이크로파 구조 해석 및 설계

홍 익 표 [국립공주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 무선사업부 책임연구원

2006년 2월~2007년 2월: Texas A&M University, Visiting Scholar
2012년 2월~2013년 2월: Syracuse University, Visiting Scholar
2003년 3월~현재: 국립 공주대학교 정보통신공학부 교수
[주 관심분야] 전자기 수치해석, EMI/EMC, 안테나

노 영 훈 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-3479-2838>



2017년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2017년 3월 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정
[주 관심분야] 전자기 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)
[주 관심분야] 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, EMI/EMC, HEMP, RF 바이오/가스센서 등