

다중 배열 지향성 안테나와 고속 스위치를 이용한 Drone ID 디코딩 장치 설계

Design of Drone ID Decoder Using a Multiarray Directional Antenna and High-Speed Switch

문 성 원¹ · 김 종 섭² · 손 병 관³

Sung-Won Moon¹ · Jong-Sub Kim² · Byung-Kwan Son³

요 약

최근 전쟁이나 테러에서 드론의 활용이 급증하고 있어 국내외를 막론하고 위협 드론에 대응하는 방법 중 드론 신호를 탐지 분석하여 비행 정보 획득을 위한 다양한 탐지 기술이 개발되고 있다. 드론 신호의 전 방위 탐지를 하기 위해서는 단일 수신기에 기존 기술은 무지향성 안테나를 적용하는데 이는 탐지 거리의 제한이 있으며, 이득을 높이면 수직 탐지 범위가 좁아지게 된다. 또한 지향성 안테나를 사용한 방법은, 탐지 거리는 늘어나지만 지향하는 방향만 탐지하거나 여러 안테나와 수신기가 필요하여 비용이 증가하는 단점이 있다. 본 논문에서는 드론 신호의 전 방향탐지와 탐지 거리를 늘리는 방법으로 하나의 수신기에 고속 스위치와 다배열 지향성 안테나를 사용하여 설계한 방법을 제시하고, 이를 검증하기 위해 시제품을 제작하여 시험하였다. 시험 결과는 기존의 무지향성 안테나를 적용한 장치 대비 탐지 거리 성능은 1.65배 높이고 신호 복호화 성능은 2.4 GHz 대역에서 95 %를 나타내었다.

Abstract

Recently, the use of drones in wars and terrorism has rapidly increased, and various detection technologies are being developed to detect and analyze drone signals and obtain flight information to respond to threats, regardless of whether they are domestic or international. To detect drone signals in all directions, existing technologies apply omnidirectional antennas to a single receiver, which has a limited detection range. As the gain increases, the vertical detection range narrows. In addition, methods using directional antennas increase the detection range; however, they have the disadvantage of detecting only the direction in which they are directed or require multiple antennas and receivers, which increases the cost. In this study, we propose a method that uses a high-speed switch and a multi-array directional antenna in a single receiver to increase the omnidirectional detection and detection range of drone signals, and we fabricated and tested a prototype to verify this. The test results showed that the detection range performance was 1.65 times higher than that of a device using an existing omnidirectional antenna, and the signal decoding performance was 95 % in the 2.4 GHz band.

Key words: Counter UAS, Drone Telemetry Signal, Reverse Engineering, RF Signal Monitoring, Drone Signal Decoding

I. 서 론

무인기(이하 드론이라 통칭함)의 통신 체계는 드론의 제어를 위한 GCS(ground control system)에서 무인기 또는

드론으로 송신하는 RC(radio control) 신호, 드론에서 GCS로 비행 상태를 전송하는 telemetry 신호, 드론에서 영상 등 정보 데이터를 전송하는 데이터 링크 신호로 구성된다. 국내외 관련 기술과 논문 대부분은 신호의 분류, AI 기

「이 연구는 2022년도 민군협력진흥원 연구비의 지원으로 연구되었음.」

(주)아고스 (AGOS Co., Ltd.)

1: 대표이사(<https://orcid.org/0009-0008-5950-2263>), 2: 연구소장(<https://orcid.org/0009-0008-6384-5883>), 3: 연구실장(<https://orcid.org/0009-0003-8656-1393>)

· Manuscript received June 20, 2024 ; Revised August 12, 2024 ; Accepted October 17, 2024. (ID No. 20240620-003S)

· Corresponding Author: Sung-Won Moon (e-mail: swmoon@agos.co.kr)

반의 식별 기법들이며, 하나의 수신기 및 무지향성 안테나 사용에 관해서 기술하고 있다. 이는 단일 수신기로 전 방향탐지가 가능하고 경제적이기 때문인데, 단점은 탐지 거리가 짧다는 것이다^[1]. 위협 드론 신호의 탐지 및 분석을 위해서는 먼 거리의 탐지뿐 아니라 넓은 수직 지향 각 범위가 요구된다. 따라서 지향성 안테나를 사용하게 되면 각 안테나에 대해서 수신기가 필요하게 되며, 전 방향탐지 시 비용이 증가하는 단점이 있다^[2]. 그러므로 기존 무지향성 시스템 대비 극복해야 하는 기술적 요소는 다음과 같다.

- 수평 및 수직 탐지 거리 1.5배 이상 확대
- 신호 복호화 유효율 95 % 이상 보장

이를 달성하기 위해 본 논문에서는 하나의 수신기와 고이득 지향성 안테나들로 수신 단을 설계하여 신호 복조 및 디코딩 과정을 거쳐 데이터 손실이 최소화되고 탐지 거리를 늘리고 수직 탐지 각을 더 확대하는 방법을 제시하였다.

II. 제안하는 기법의 대상 신호 분석

세계시장 90 % 이상의 상용 드론 시장을 점유하고 있는 DJI사의 Ocusync 통신 프로토콜에 대한 탐지, 복조 및 디코딩 및 탐지 거리 성능을 무지향성 안테나와 자체 설계한 다배열 지향성 안테나를 적용한 수신 플랫폼을 설계 제작하여 비교 시험한 결과를 제시한다.

그림 1과 같이 Ocusync Drone ID 신호는 15 MHz 대역폭을 사용하며, 매 신호 방사주기는 10개의 연속적인 Burst 형태의 펄스 신호가 640 ms마다 방사되며 2.4 GHz 및 5 GHz 대역에 걸쳐 주파수 도약 신호 형태로 나타난다.

신호의 프레임 구조는 그림 2와 같이 601개의 부반송파와 15 kHz 부반송파 간격을 가지는 OFDM 신호이다. 한 프레임 길이는 648 us이고, 심볼 하나의 폭은 72(7개)와 80(2개) us로 총 9개의 심볼로 구성되어있다. 4번째 심볼에 root index 600과 147의 ZC(Zadoff-Chu) 시퀀스를 포함하고 있다^[3].

기술적 해결 문제를 위한 개선점들은 아래와 같다.

- 8채널 주파수 도약 신호에 대한 실시간 복호를 위한 8채널 FPGA를 기반 실시간 신호처리
- 복호화율 95 % 전체 복호시간 1초 이내 달성

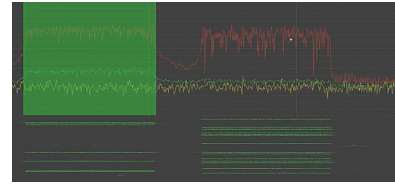


그림 1. Drone ID 신호의 스펙트럼

Fig. 1. Spectrum of drone ID signal.

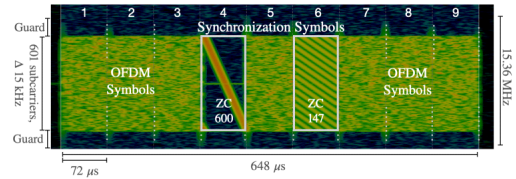


그림 2. Drone ID 패키지의 스펙트럼^{[3],[4]}

Fig. 2. Spectrum of drone ID packet^{[3],[4]}.

III. Drone ID 신호 디코딩 방법

앞에서 기술한 바와 같이 펄스 한 프레임의 길이는 648 us이고 연속 10개 프레임 배열 형태와 640 ms 주기로 방사되므로, 신호의 유효 데이터 획득을 위해 적절한 배열 안테나의 스위칭 시간이 중요하다.

그림 3(a)의 펄스 타입 1의 경우에는 신호 획득이 쉬우므로 넓은 펄스폭 설정과 빠른 스위칭 기반으로 설정한다. 펄스 타입 2의 경우에 대해 안테나 어레이는 펄스 신호의 주기에 따라 수 msec에 걸쳐 가중치가 부여된 벡터 데이터를 구성하여 설정한다. 그림 3(b)는 어레이 안테나의 수신 스위칭을 통한 벡터 합성 상태를 나타낸다.

수집된 신호는 그림 4와 같이 대역폭 98 MHz에 대해 12.88 Msps로 ADC 샘플링되고 15.36 Msps로 Decimation (8:1) 된다. 이후 신호처리는 동시에 입력신호와 미리 확인된 ZC 절차를 상호상관(cross-correlation) 처리 및 입력 신호전력을 계산하게 되고 평균화된 신호가 일정한 임계치(threshold)를 넘으면 저장된 신호가 CPU로 전달하게 설계되었다.

그림 5의 도식화 그림은 입력된 신호가 coarse frequency offset을 구한 후 보상하는 과정을 거치며, 1,024 FFT 처리되고 기준 심볼을 이용하여 수신 신호의 채널을 추정 및 보상하는 과정을 거치고, symbol de-mapping과 de-rate matching 후 터보 복호화를 수행하는 과정을 나타

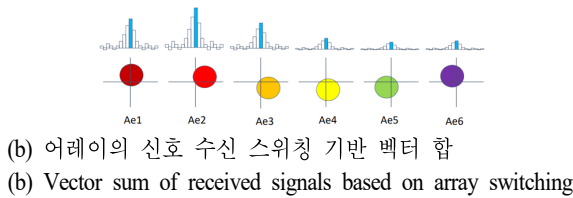
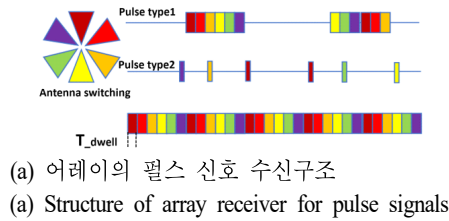
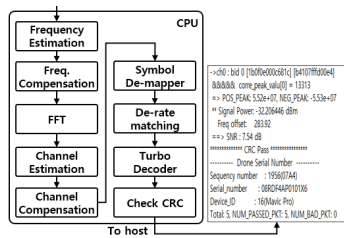
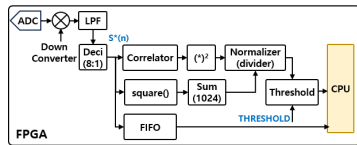


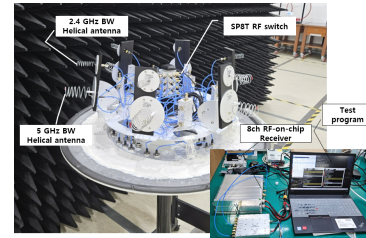
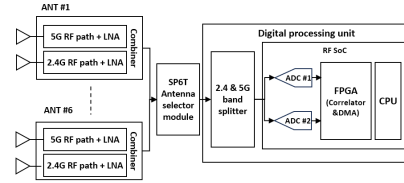
그림 3. 어레이 안테나 기반 수신 플랫폼 구조
Fig. 3. Platform structure of array antennas based receiver.



내고 있다. 이 과정에서 터보 복호화가 정상적일 경우, 순환중복검사(CRC)에서 문제가 없음을 확인하게 된다. 그림 5와 같이 최종적으로 드론 및 위치정보 데이터를 추출할 수 있게 된다.

IV. 수신장치의 하드웨어 설계, 구현 및 실험

4.1 다배열 안테나와 스위치를 적용한 수신기 설계
드론 신호 탐지 및 분석 플랫폼의 구성은 여섯 방향으



로 지향성 안테나를 배열하고 SP6T 또는 SP8T 스위치를 이용하여 신호 수신분석기에 연결한다^[5]. 구성된 안테나는 2.4 GHz 및 5 GHz 대역의 지향성 안테나로 각 6개씩 그림 6 및 그림 7과 같이 설계 및 제작하였다^[6].

4.2 실내 실험 조건

장치 구현은 그림 7과 같이 2.4 GHz 및 5 GHz 대역의 해리컬 안테나로 제작하였고, 수평 및 수직 3 dB 빔폭은 같으며, 2.4 GHz의 경우 60°이며 5.8 GHz 대역은 52°이다. 안테나 이득은 각각 9.55 dBi, 10.8 dBi이다. 스위치는 SP8T 구조로 스위칭 시간 227 ns RF 스위치를 제작하여 실험하였다(자체 제작 및 측정).

4.3 실내외 성능 시험 결과

표 1은 상용 무지향성과 자체 제작한 지향성 안테나를 사용하여 신호 복조 및 복호화 과정을 거쳐 유효한 패킷 테스트에 대한 실내 비교 실험 결과이다. 상용 무지향성 안테나는 PCTEL사 MHODB2449로 2.4 GHz에서 3 dBi, 5.8 GHz에서 5 dBi 이득을 가지며 수직 빔각은 각각 35°/25°이다.

하나의 프레임 길이가 664 us이고 각 심볼이 길이가 72 us이기 때문에, 유효 샘플링을 위해 신호전력이 머무는

표 1. Omni 대비 지향성 스위칭 결과 비교(실내)

Table 1. The comparison of omni vs directional (indoor).

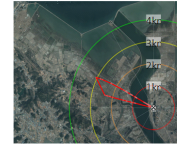
Switch time/ cycle	Omni-directional		Directional +switching		Ratio to omni- directional (%)	
	Number of packets passed		Number of packets passed			
	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	5 GHz
10 us	288	273	0	0	0	0
100 us	288	273	0	0	0	0
500 us	288	273	144	122	50	40
1 ms	288	273	206	162	72	59
30 ms	288	273	276	185	96	65
100 ms	288	273	274	177	95	65
500 ms	288	273	271	195	94	71

시간은 최소 동기 심볼인 4~6번 길이 이상 약 216 us 이상이어야 한다. 따라서 10, 100, 500 us, 1, 30, 100, 500 ms에 대한 스위치 시간에 따른 신호 복호화 실험을 수행하여 500 ms 스위칭 시간의 경우 두 대역 모두 높은 유효 패킷을 획득하였다. 이 결과의 의미는 패킷의 Zadoff-Chu 동기심볼 4와 6을 복호화 할 수 있는 시간 이상에 따라 유효함을 알 수 있었다.

그림 8은 DJI Mavic의 Drone ID 신호에 대한 탐지 및 복호화를 통한 위·경도 좌표, 고도, 모델명, 일련번호 등을 추출하는 방식으로 최대 5 km 범위에서의 성능 시험 결과이며, 무지향성 탐지 및 디코딩 3 km 보다 약 1.65배 이상인 5 km 탐지 및 디코딩 성능 결과를 나타냈다. 이때의 스위칭 시간은 30 ms 일 때 가장 높은 유효 패킷 통과 결과가 나타났고, 이는 실내 근거리 환경과 달리 인근 안테나의 신호 수신 영향이 감소 되어 100, 500 ms 스위치가 동작하는 시간보다 신호의 탐지 확률을 높이기 위한 적절한 스위칭 시간인 30 ms가 적절함을 알 수 있었다.

V. 결 론

Drone ID 신호 디코딩 기법을 이용한 드론 탐지 및 추적 방법에서 무지향성 안테나를 사용한 방법보다 6개의 고이득 지향성 안테나를 다중 배열하여 스위칭한 방법이 약 1.65배 이상의 높은 탐지 거리가 도출되었고, 신호의 복호화 성능은 무지향성 대비 2.4 GHz 대역에서는 95 %, 5 GHz 대역에서는 65 % 정도를 유지하였다. 복호화율이 다소 낮더라도 30 ms 스위칭 시간에서 최종 탐지 및 추적



(a) 무지향성
(a) Omnidirectional



(b) 지향성+스위칭
(b) Directional+switch

그림 8. 실외 비행 탐지 성능 시험 결과

Fig. 8. The results of detection performance test.

시간이 전자지도상에 표출되는 결과에는 영향이 없음을 그림 8과 같이 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 무지향성 수신 시스템 구성의 측정 거리 한계를 극복하여 탐지 거리를 늘림과 동시에 수직 탐지 범위도 더 크게 확대할 수 있어 고성능 드론 신호 탐지 장치로 활용할 수 있음을 입증하였다.

References

- [1] S. Basak, S. Rajendran, S. Pollin, and B. Scheers, "Drone classification from RF fingerprints using deep residual," in *2021 International Conference on COMmunication Systems & NETworks(COMSNETS)*, Bangalore, Jan. 2020.
- [2] M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, O. Ozdemir, and I. Guvenc, "Detection and classification of UAVs using RF fingerprints in the presence of Wi-Fi and bluetooth interference," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 60-76, Nov. 2019.
- [3] C. Bender, "DJI drone IDs are not encrypted," 2022. Available: <https://arxiv.org/abs/2207.10795>
- [4] N. Schiller, M. Chlosta, M. Schloegel, N. Bars, T. Eisenhofer, and T. Scharnowski, et al., "Drone security and the mysterious case of DJI's DroneID," in *Network and Distributed System Security(NDSS) Symposium 2023*, San Diego, CA, Feb-Mar. 2023.
- [5] M. P. Daly, J. T. Bernhard, "Directional modulation technique for phased arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 9, pp. 2633-2640, Sep. 2009.
- [6] D. Jang, S. Yoo, J. Wang, J. Y. Lee, and H. Choo, "Configuration of a 16-element array antenna design to improve signal detection performances," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 6, pp. 438-444, Jun. 2019.