특집논문 (Special Paper)
방송공학회논문지 제31권 제3호, 2026년 5월 (JBE Vol.31, No.3, May 2026)
https://doi.org/10.5909/JBE.2026.31.3.420
ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

저가형 SDR 및 2-소자 배열 안테나를 이용한 드론 도래각(DoA) 실시간 추정 시스템 구현 및 성능 분석

황 태 욱[a)], 조 유 겸[a)], 이 지 원[a)], 백 채 희[a)], 김 정 창[a)‡]

Implementation and Performance Analysis of a Real-time Drone Direction-of-Arrival(DoA) Estimation System based on Low-cost SDR and 2-element Antenna Array

Taeuk Hwang[a)], Yugyeom Cho[a)], Jiwon Lee[a)], Chaehui Baek[a)], and Jeongchang Kim[a)‡]

요 약

본 논문은 무인항공기(unmanned aerial vehicles: UAV)의 불법 침입으로 인한 안보 위협에 대응하기 위해, 드론 신호의 도래각(direction of arrival: DoA)을 실시간으로 추정하고 시각화하는 GUI 기반 시스템 구현 및 성능 분석에 관한 연구를 다룬다. 5.84GHz 대역의 드론 신호를 수신하기 위해 USRP(universal software radio peripheral) B210과 균일 선형 배열(uniform linear array: ULA)로 배치된 2개의 지향성 안테나를 활용하여 최소한의 저비용 수신단을 구축하였다. 수신된 신호에는 대표적인 부공간 기반 기법인 MUSIC(multiple signal classification) 알고리즘을 적용하여 신호의 방향을 추정하였다. 구현된 MATLAB 기반 앱은 실제 드론의 이동에 따른 도래각 변화를 실시간으로 추적하며, 실외 실험을 통해 실제 위치와 추정치 간의 정합성을 확인하였다. 또한, 수신 거리 및 입사각 변화에 따른 시스템의 추정 정밀도 추이를 분석함으로써, 최소 소자의 안테나와 저비용 하드웨어 구성만으로도 실시간 드론 방위 탐지 시스템의 구현이 가능함을 확인하였다.

Abstract

This paper presents a study of the implementation and performance evaluation of a GUI-based system designed to estimate and visualize the direction of arrival (DoA) of drone signals in real time in response to security threats posed by unauthorized UAV (unmanned aerial vehicle) intrusions. To receive drone signals in the 5.84GHz band, a minimal, low-cost receiving system is constructed using a USRP (universal software radio peripheral) B210 and two directional antennas arranged in a uniform linear array (ULA). The multiple signal classification (MUSIC) algorithm, a representative subspace-based technique, is applied to the received signals to estimate their direction. The implemented MATLAB-based app tracks changes in the direction of arrival in real time as the drone moves, and the consistency between the actual position and the estimates is verified through outdoor experiments. Furthermore, by analyzing trends in the system's estimation accuracy as a function of changes in reception distance and angle of incidence, it is shown that a real-time drone direction detection system can be implemented using only a minimal-element antenna and low-cost hardware.

Keyword : Drone Signal, DoA Estimation, MUSIC Algorithm, Real-time Visualization, Anti-Drone

Copyright Ⓒ 2026 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.
"This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered."

Ⅰ. 서 론

최근 무인항공기(unmanned aerial vehicle: UAV) 기술의 급격한 발전과 보급으로 드론의 활용 범위는 군사, 레저, 농업, 건설 및 운송업 등 산업 전반으로 광범위하게 확장되고 있다. 그러나 이러한 기술적 혜택과 동시에 국가 주요 보안 시설에 대한 무단 침입, 불법 촬영, 물리적 테러 등 보안상의 위협 또한 심각한 사회적 과제로 부상하고 있다[1]. 이에 대응하기 위해 전 세계적으로 다양한 안티드론(anti-drone) 시스템이 제안되고 있으나, 탐지 대상의 소형화와 비행 특성의 정교화로 인해 기술적 난제가 지속되고 있는 실정이다.

전통적인 드론 탐지 방식으로는 소리 기반의 음향 탐지, 고해상도 카메라를 이용한 영상 분석, 그리고 능동형 레이다(radar) 시스템 등이 주로 활용되어 왔다[2-4]. 그러나 음향 탐지 방식은 도심지의 높은 배경 소음이나 기상 조건에 따른 감쇠 현상으로 인해 탐지 거리가 수백 미터 이내로 제한되는 물리적 한계가 있다. 영상 기반 시스템은 야간이나 안개 등 시계가 확보되지 않는 환경에서 탐지 신뢰도가 급격히 저하되며, 소형 드론을 새와 같은 자연물과 식별하는 데 있어 높은 오탐지율을 기록하는 연구 결과가 보고된 바 있다. 원거리 탐지에 가장 효과적인 레이다 시스템의 경우, DJI Mini 3와 같은 초소형 드론은 낮은 레이더 반사 면적(radar cross section: RCS)을 지니고 저고도로 비행하기 때문에 지면 클러터(clutter)와 신호를 구분하기 어렵다. 뿐만 아니라 고출력 전파 송출을 위한 주파수 허가 및 높은 장비 도입 비용이 수반되는 현실적인 제약이 따른다.

이러한 기존 탐지 시스템의 한계를 극복하기 위해 최근에는 드론과 조종기 사이에서 방사되는 무선 주파수(radio frequency: RF) 신호를 직접 포착해 분석하는 RF 스캐너 방식이 활발히 연구되고 있다[5]. 대부분의 상용 드론은 2.4 GHz 및 5.8GHz 대역의 ISM(industrial, scientific, medical) 주파수를 사용하여 제어 및 영상 데이터를 전송하며, 각 제조사와 모델별로 고유한 주파수 도약 패턴이나 대역폭 특성을 지닌다. RF 기반 탐지 방식은 수신기만으로 구성되므로 주파수 허가 절차에서 자유로우며, 비가시선 환경에서도 먼 거리의 드론 존재를 선제적으로 파악할 수 있다는 강력한 이점을 지닌다[6-7]. 특히, 탐지된 드론의 방위각을 특정하기 위한 도래각(direction of arrival: DoA) 추정 기술은 침입 드론의 위치를 정밀하게 파악하고 이동 궤적을 추적하는 안티드론 시스템의 핵심 모듈이다. 배열 신호 처리 분야에서 지난 수십 년간 연구된 초고해상도 알고리즘 중 하나인 MUSIC(multiple signal classification) 알고리즘은 수신 신호의 공분산 행렬을 고유분해(eigen-decomposition)하여 신호 부공간과 잡음 부공간으로 분리하는 기법을 통해, 기존 빔포밍 기법이 가졌던 한계를 보완하고 높은 해상도를 제공하여 학술적, 실무적으로 널리 활용되고 있다[8].

최근 선행 연구들은 이러한 MUSIC 알고리즘을 실외 환경의 복잡한 전파 특성에 최적화하는 데 집중하고 있다. 실환경에서 필연적으로 발생하는 다중 경로 간섭 문제를 해결하기 위해 공간 평활화 기법을 도입하거나, 딥러닝 기반의 인공지능 모델을 활용하여 신호 대 잡음비가 낮은 환경에서도 신호 부공간을 강인하게 추정하려는 연구가 진행되고 있다[9]. 아울러, 고가의 전용 장비 대신 USRP(universal software radio peripheral)와 같은 소프트웨어 정의 라디오(software-defined radio: SDR) 플랫폼을 활용하여 시스템 구축 비용을 낮추고 운용의 유연성을 확보하려는 연구가 주요 흐름으로 자리 잡고 있다[10].

그러나, 다수의 선행 연구들이 시뮬레이션 기반의 알고리즘 정확도 개선이나 고가의 측정 장비를 활용한 데이터 수집에 치중해 온 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 범용 저가형 SDR인 USRP B210과 균일 선형 배열(uniform linear array: ULA)로 배치된 단 2개의 지향성 안테나라는 최소한의 소형 배열 구성을 통해 경제적이면서도 실용적인 드론 신호 실시간 탐지 시스템을 구현하였다. 다만, 본 연구에서 구현한 시스템의 하드웨어 사양의 한계로 인하여 2개의 안테나 소자만 활용할 수 있으므로, 적용하고자 하는

a) 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자정보통신공학전공(Korea Maritime and Ocean University)
‡ Corresponding Author : 김정창(Jeongchang Kim)
E-mail: jchkim@kmou.ac.kr
Tel: +82-51-410-4315
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8612-9360
※ 이 논문의 연구 결과 중 일부는 한국방송·미디어공학회 2025년 동계학술대회에서 발표한 바 있음
· Manuscript May 4, 2026; Revised May 14, 2026; Accepted May 14, 2026.

MUSIC 알고리즘의 특성상 독립적으로 추정 가능한 드론 신호원의 개수는 1개로 제한된다. 최근 군집 드론(swarm drone)을 이용한 동시다발적인 다중 침입이 새로운 보안 위협으로 대두되고 있기에, 본 시스템의 현재 하드웨어 구성으로는 다수의 드론이 동시에 접근할 경우 각각의 드론을 분리하여 독립적으로 추적하는 데에는 물리적인 한계가 존재한다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 고비용의 다중 배열 안테나를 도입하기에 앞서, 최소한의 2채널 수신 환경을 통해 우선적인 단일 침입 표적에 대한 실환경 도래각 추정 신뢰도와 한계를 검증한다는 점에서 실용적 의의를 지닌다.

본 논문에서는 이론적인 알고리즘을 통한 시뮬레이션을 넘어서, 실제 야외 전파 환경에서 송출되는 5.84GHz 대역의 드론 통신 신호를 실시간으로 포착하고 물리적 특성을 해석하는 데 중점을 둔다. 구현된 MATLAB 기반 앱을 통해 실제 드론의 이동에 따른 도래각 변화를 실시간으로 추적하여 시각화하며, 수신 거리 및 입사각 변화에 따른 시스템의 도래각 추정 성능 추이를 통계적으로 분석하였다. 이러한 분석 결과는 저비용 하드웨어 시스템이 실제 환경에서 어느 정도 신뢰성을 확보할 수 있는지 검토하고, 향후 저비용·고성능 안티드론 시스템의 실현 가능성을 제시하는 실험적 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 본 논문에서 가정하는 드론 신호 모델링과 적용하고자 하는 MUSIC 알고리즘을 간략히 서술한다. Ⅲ장에서는 본 연구에서 구현한 SDR 기반 시스템의 하드웨어 구성, 실험 시나리오, 그리고 통계적 분석 방법론을 설명한다. Ⅳ장에서는 실외 실험을 통해 도출된 도래각 추정 결과와 거리 및 각도별 탐지 오차에 대한 분석 내용을 제시하며, Ⅴ장에서 최종 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 MUSIC 알고리즘

본 장에서는 안티드론 시스템 구현을 위한 기초 단계로서 드론의 무선 주파수 신호의 도래각 추정을 위한 시스템 모델과 본 연구에서 적용한 MUSIC 알고리즘을 간략히 서술한다. 그림 1은 수신단 안테나 배열에 신호가 도달한 후 공분산 행렬 연산을 거쳐 최종적으로 도래각을 산출하기까지의 전체 신호 처리 흐름을 나타낸 블록도이다.

1. 수신 신호 모델 및 MUSIC 의사 스펙트럼 도출

본 연구에서는 그림 2와 같이 M개의 안테나 소자가 간격 d로 배치된 균일 선형 배열 시스템을 가정한다. 원거리(far-field) 가정에 따라 드론의 신호가 평면파(plane wave) 형태로 입사될 때, 특정 관측 시간 t에서 배열 안테나에 입사되는 수신 신호 벡터 $\mathbf{x}(t)$는 조향 행렬(steering matrix) $\mathbf{A}$, 입사 신호 벡터 $\mathbf{s}(t)$, 그리고 잡음 벡터 $\mathbf{w}(t)$의 선형 결합으로 다음과 같이 모델링된다[11].

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{w}(t) \tag{1}$$

여기서 수신 신호 벡터 $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{C}^{M\times 1}$은 M개의 각 안테나 소자에서 수신된 복소 기저대역(baseband) 신호 샘플을 나타낸다. 입사 신호 벡터 $\mathbf{s}(t) \in \mathbb{C}^{K\times 1}$는 K개의 독립적인 신호원으로부터 입사되는 복소 진폭이며, 잡음 벡터 $\mathbf{w}(t) \in \mathbb{C}^{M\times 1}$는 평균이 0이고 분산이 σ^2인 복소 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise: AWGN)이다.

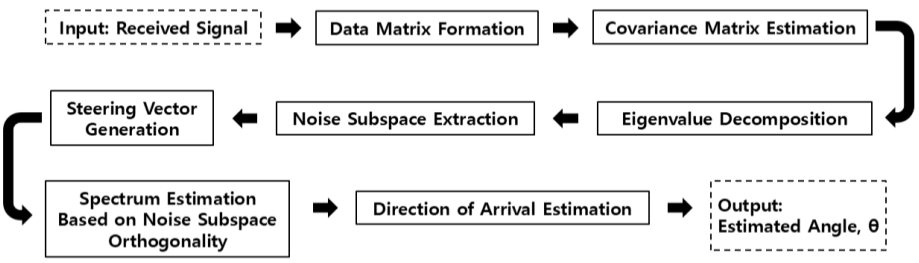

그림 1. MUSIC 알고리즘 기반 도래각 추정 과정 블록도
Fig. 1. Block diagram of the DoA estimation process based on the MUSIC algorithm

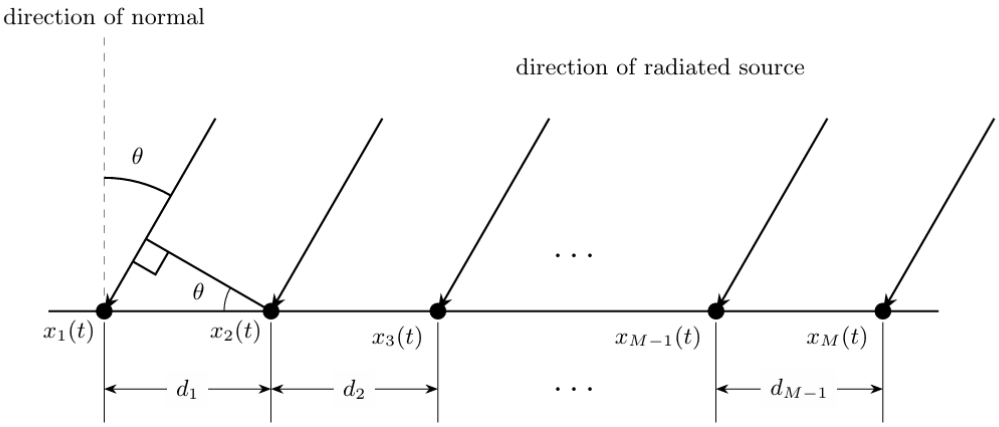

그림 2. 균일 선형 배열에서의 입사 신호 위상 관계도
Fig. 2. Phase relationship of incident signals in a uniform linear array

이때 행렬 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M\times K}$는 각 신호원의 도래각 θ에 대응하는 조향 벡터(steering vector) $\mathbf{a}(\theta) \in \mathbb{C}^{M\times 1}$를 열 벡터로 취하여 구성된다. 여기서 θ는 주어진 도래각 탐색 범위 내에서 이산화된 후보(discrete candidate) 각도를 나타내고, 후보 각도의 집합에서 다음과 같이 선택될 수 있으며, i는 탐색 범위에서 추정 가능한 후보 각도의 총 개수이다.

$$\theta \in [\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_i], i \in [1, \infty) \tag{2}$$

개별 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta)$는 반송파 파장 λ 및 안테나 소자 간 간격 d에 대하여 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[1, e^{-j2\pi\frac{d}{\lambda}\sin(\theta)}, \cdots, e^{-j2\pi\frac{(M-1)d}{\lambda}\sin(\theta)}\right]^T \tag{3}$$

MUSIC 알고리즘은 안테나를 통해 수신된 다채널 신호의 통계적 특성을 분석하기 위하여 공분산 행렬(covariance matrix) $\mathbf{R}_{\mathbf{xx}} \in \mathbb{C}^{M\times M}$을 활용한다. 실제 실시간 구현 환경에서는 유한한 길이의 데이터를 누적하여 다음과 같이 샘플 공분산 행렬(sample covariance matrix)을 추정하여 사용한다.

$$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\mathbf{x}(t_n)\mathbf{x}^H(t_n) \tag{4}$$

산출된 샘플 공분산 행렬 $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{xx}}$에 대해 고유값 분해(eigenvalue decomposition)를 수행하면 M개의 고유값 $(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_M)$과 이에 대응하는 고유벡터를 얻을 수 있다. 신호원 개수가 K개일 때, 고유값이 큰 순서대로 K개의 고유값에 대응하는 고유벡터들은 신호 부공간(signal subspace)을 형성하며, 열 잡음에 의해 발생하는 나머지 $M-K$개의 고유벡터들은 잡음 부공간(noise subspace) $E_N \in \mathbb{C}^{M\times(M-K)}$을 형성한다.

이상적인 환경에서 잡음 부공간 E_N은 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta)$와 직교하는 성질을 가진다. MUSIC 알고리즘은 이러한 직교성을 활용하여 신호의 입사 방향을 판별하기 위한 의사 스펙트럼(pseudo-spectrum) $P_{MUSIC}(\theta)$을 다음과 같이 도출한다.

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)E_N E_N^H \mathbf{a}(\theta)} \tag{5}$$

수식 (5)에서 우변의 분모는 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta)$를 잡음 부공간 E_N에 투영한 전력을 의미한다. 탐색하는 각도 θ가 실제 드론 신호의 도래각과 일치할 때 조향 벡터와 잡음 부공간의 직교성이 성립하여 분모의 값이 최소화되어 스펙트럼 상에서 피크가 형성된다. 여기서 MUSIC 알고리즘에 의해 도출되는 $P_{MUSIC}(\theta)$은 도래각 그 자체가 아니라, 공간상에

서 해당 각도에 신호가 존재할 가능성을 나타내는 수치적 지표(metric)이다. 따라서 최종적인 도래각 추정치 $\hat{\theta}$은 다음과 같이 지정된 탐색 범위 내에서 해당 지표를 극대화하는 인수를 찾는 과정을 통해 결정된다.

$$\hat{\theta} = \arg\max_{\theta} P_{MUSIC}(\theta) \tag{6}$$

2. 시뮬레이션을 통한 알고리즘 검증

실제 SDR 하드웨어를 연동한 시스템 구현에 앞서, MUSIC 알고리즘의 수치적 정확도를 수학적으로 확인하기 위해 실제 드론이 사용하는 무선 신호의 물리계층 사양을 반영한 가상의 신호를 생성하여 MATLAB 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서는 여러 상용 드론 통신 방식 중 가장 많이 사용되는 DJI OcuSync 방식을 선택하였다. OcuSync 신호 특성을 모사하기 위해, 중심 주파수 5.84 GHz를 사용하고 대역폭 10MHz를 갖는 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반의 RF 신호를 모델링하였다. 시뮬레이션에 적용된 세부 OFDM 파라미터는 다음과 같다. 부반송파 개수를 결정하는 FFT 크기는 1024, 총 심볼 개수는 9개로 설정하였으며, CP(cyclic prefix) 길이는 [80, 72, 72, 72, 72, 72, 72, 80] 샘플로 가변 적용하였다. 그림 3은 상기 파라미터로 생성된 신호의 주파수 자원 할당을 확인하기 위해, 전체 9개의 심볼 중 단일 심볼 구간만을 추출하여 도식화한 스펙트로그램(spectrogram)이다[12].

실제 신호 처리 환경을 모사하기 위해 이산 시간(discrete-time) I/Q 샘플 처리 모델을 적용한다. 2-채널 배열 안테나 환경에서 m번째 채널의 n번째 복소 I/Q 샘플을 $x_m[n]$이라 할 때, 총 N개의 샘플 길이를 갖는 수신 신호 행렬 $\mathbf{X}$를 다음과 같이 구성한다.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1[1] & x_1[2] & \cdots & x_1[N] \\ x_2[1] & x_2[2] & \cdots & x_2[N] \end{bmatrix} \tag{7}$$

이산 영역에서의 샘플 공분산 행렬 $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{XX}}$은 다음과 같은 누적 행렬 연산을 통해 산출된다.

$$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{XX}} = \frac{1}{N}\mathbf{X}\mathbf{X}^H \tag{8}$$

수식 (8)을 통해 산출된 샘플 공분산 행렬 $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{XX}}$을 기반으로 고유값 분해를 수행하여 잡음 부공간 E_N을 추출하며, 이를 수식 (5)에 대입함으로써 도래각을 추정한다. 시뮬레

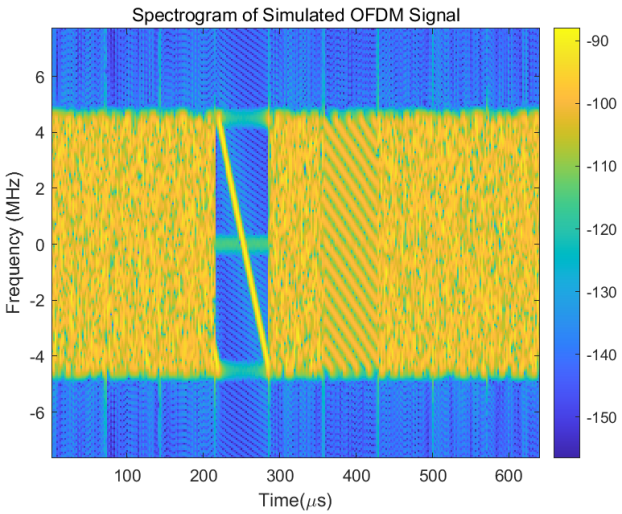

그림 3. 시뮬레이션 신호의 스펙트로그램
Fig. 3. Spectrogram of the simulated signal

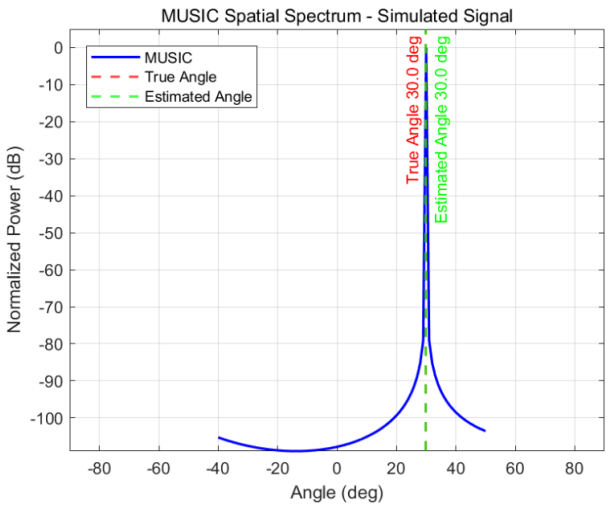

그림 4. 30° 입사 신호에 대한 MUSIC 공간 스펙트럼 결과
Fig. 4. MUSIC spatial spectrum for a 30° incident signal

이션 상에서 드론 신호의 입사각을 30°로 고정하고 도래각 추정 시뮬레이션을 수행한 결과, 수식 (5)에 따라 도출된 MUSIC 알고리즘의 공간 스펙트럼은 그림 4와 같이 관찰된다.

그림 4에서 볼 수 있듯이, 설정된 정확한 입사각인 30° 지점에서 매우 높은 피크를 갖는 추정치를 확인할 수 있다. 이를 통해 시뮬레이션 환경에서 드론 통신 신호에 대해 도출된 공간 스펙트럼으로부터 도래각 추정이 가능함을 검증하였으며, 이를 기반으로 SDR 하드웨어 시스템 구현을 진행하였다.

Ⅲ. 실시간 드론 신호 탐지 시스템 구현 및 실험 환경

본 장에서는 제안하는 MUSIC 알고리즘 기반의 도래각 추정 기법을 실제 환경에서 검증하기 위해 구축한 SDR 기반의 하드웨어 수신단 구성과, 실외 실험 환경에 대해 구체적으로 서술한다.

1. 시스템 하드웨어 구성

본 연구에서 구현한 시스템은 DJI OcuSync 드론 통신 신호 전송에 사용되는 중심 주파수 5.84GHz 대역의 신호를 캡처하기 위해 USRP B210 장비와 2개의 수신 안테나를 사용하여 구축되었다. 도래각 추정 알고리즘은 다중 안테나 간의 미세한 위상차(phase difference)를 기반으로 동작하므로, 내부적으로 정밀한 위상 동기화(phase synchronization)를 지원하는 2채널 위상 코히런트(phase-coherent) 수신이 가능한 USRP B210을 채택하였다. 수신단은 드론 신호를 포착하기 위해 5.8GHz 대역 상용 지향성 패치 안테나인 Lumenier사의 AXII DUO 5.8 모델 2개를 균일 선형 배열 형태로 배치하였다. 일반적인 ULA 구조에서는 안테나 간격 $d \leq \lambda/2$을 만족해야 한다. 본 연구의 중심 주파수인 5.8435GHz 기준 파장은 약 5.13cm이며, 이에 따른 $\lambda/2$값은 약 2.56cm이다. 그러나 실제 구현 과정에서는 사용된 안테나의 물리적 크기로 인해 안테나 간격을 추가적으로 줄이는 데 한계가 있었으며, 본 연구에서는 구현 가능한 최소 간격인 3.5cm를 적용하였다. 또한, 무지향성(omni-directional) 안테나 대신 수평 빔 폭 [-40°, +40°] 및 수직 빔폭 [-20°, +20°]의 제원을 갖는 상용 지향성 안테나를 적용함으로써, 후방 및 측면에서 유입되는 주변 환경의 다중 경로 반사파와 간섭 잡음을 억제하고 전방 관심 영역의 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)를 극대화하였다. 두 안테나 간 위상차 추출을 위해 활용한 USRP B210은 단일 장치 내에 두 개의 수신 채널을 내장하고 있으며, 두 채널은 동일한 클럭 및 로컬 오실레이터(local oscillator, LO)를 공유한다. 이로 인해 두 채널 간 샘플링은 하드웨어 수준에서 동기화되어 동시에 이루어지며, 각 채널에서 획득된 신호는 동일 시점의 위상 정보를 유지한다. 따라서 안테나 간 위상차를 시간 불일치에 따른 왜곡 없이 안정적으로 추출할 수 있다. 구체적인 하드웨어 사양 및 운용 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 하드웨어 사양 및 운용 파라미터
Table 1. Hardware specifications and operating parameters

Category	Parameter	Value
Transmitter (Drone)	Model	DJI Mini 3
	Center Frequency	5.84GHz
	Signal Bandwidth	10MHz
Receiver (SDR)	Model	NI USRP B210
	Antenna Array	2-element ULA
	Element spacing (d)	3.5cm
Antenna	Model	AXII DUO 5.8
	Horizontal Beamwidth	[-40°, +40°]
	Vertical Beamwidth	[-20°, +20°]

배열 안테나를 통해 수집된 RF 신호는 USRP B210의 RF 프론트엔드를 거쳐 기저대역의 디지털 I/Q 데이터로 변환되고, 위상 동기화 과정을 거친 뒤 USB 3.0 인터페이스를 통해 호스트 PC로 실시간 전송된다. USRP 장비와 호스트 PC의 MATLAB은 직접 연동되어, 하드웨어 버퍼에서 캡처된 스트리밍 데이터를 워크스페이스로 전달한다. 신호처리를 위한 호스트 PC로는 Apple MacBook Pro(M1, 16GB RAM)를 활용하였다. 호스트 PC에서는 전달받은 데이터를 일정 스냅샷 크기(N) 단위로 버퍼링하며, 앞서 II장에서 정의한 수식 (8)에 따라 샘플 공분산 행렬을 산출하여 방향 추정 알고리즘을 수행한다.

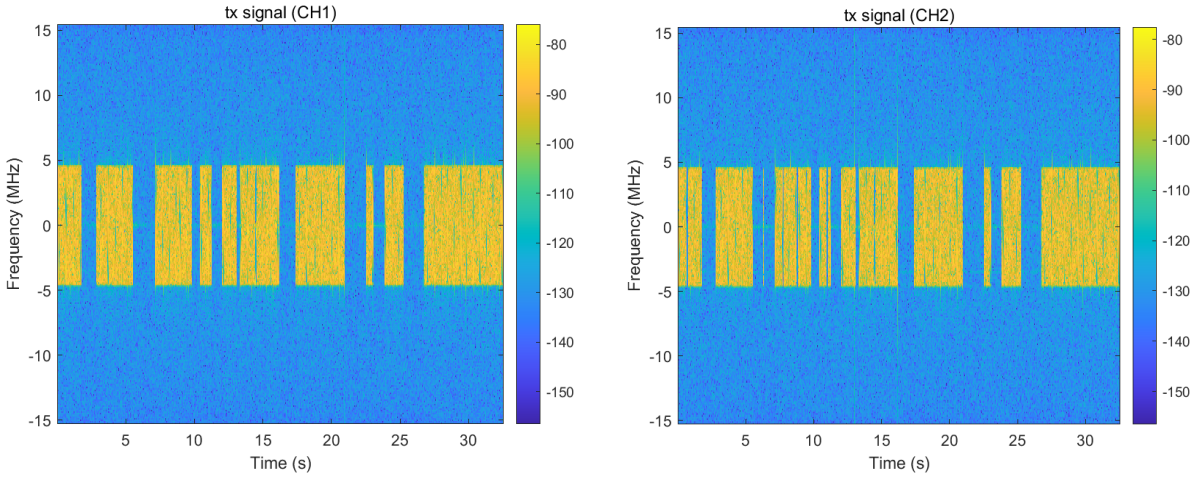

그림 5. 각 안테나별 실제 수신된 DJI Mini 3 OcuSync 신호의 스펙트로그램
Fig. 5. Spectrogram of the actually received DJI Mini 3 OcuSync signal per antenna

2. 실제 드론 신호 스펙트로그램 분석 및 실시간 처리 파라미터

본 연구에서 대상 드론 기종으로는 중심 주파수 5.84 GHz 및 10MHz의 대역폭을 점유하는 DJI Mini 3 드론을 활용하였다. 그림 5는 실제 수신된 OcuSync 신호의 스펙트로그램으로, 신호 존재 구간에서 약 10MHz 대역폭에 걸쳐 전력이 균일하게 분포하는 OFDM 특유의 평탄한 스펙트럼과 시간 축에서 신호가 송출되는 구간과 부재하는 구간이 반복적으로 교차하는 전송 패턴을 보인다. 이는 해당 드론이 RF 신호를 전송하는 특징에 따른 것이다.

이러한 특성으로 인해 드론 통신 신호는 시간 축에서 불연속적인 전송 형태를 갖는다. 본 시스템은 드론이 실시간으로 송출하는 신호를 수신 신호로 활용하며, 해당 신호에는 동기화를 위한 파일럿 신호가 주기적으로 포함되어 있다. 그림 6에서 확인할 수 있듯이 파일럿 신호의 전송 주기는 약 20ms이다. 따라서 연속적인 데이터 캡처 시간이 20ms를 초과하도록 설정함으로써 각 캡처 윈도우 내에 최소 한 번 이상의 파일럿 신호를 포함할 수 있으므로, 불연속적인 신호 수신 환경에서도 각 캡처 윈도우 내에서 유효 신호를 누락 없이 안정적으로 검출할 수 있다.

이러한 신호 특성을 반영하여 최적의 스냅샷 크기(N)를 결정하고 시스템의 처리 성능을 객관적으로 검증하기 위해, 한 번에 캡처하는 샘플 수($0.5 \times 10^6, 1.0 \times 10^6, 2.0 \times 10^6$)에 따른 데이터 획득, MUSIC 연산, GUI(graphical user interface: GUI) 화면 업데이트 과정을 거치는 전체 루프의 지연 시간을 1,000회 반복 측정하였다. 그림 7에서 확인할 수 있듯이, 샘플 수가 증가함에 따라 연산 복잡도가 가중되어 처리 지연 시간도 비례하여 증가하는 상관관계를 보인다.

본 연구에서는 연산 효율과 추정 정확도 사이의 트레이드오프(trade-off)를 검토하여 $N = 10^6$을 최종 운용 파라미터로 선정하였다. 본 시스템의 샘플링 레이트($F_s = 30.72$Ms/s) 기준 $N = 10^6$개의 샘플을 캡처하는 데 소요되는 시간은 약 32.55ms로, 앞서 분석한 파일럿 신호의 전송 주기(20 ms)를 충분히 포함할 수 있는 수치이다. 해당 조건에서 측정된 평균 전체 처리 지연 시간은 112.55ms로 도출되었으며, 이는 초당 약 8~9회의 도래각 갱신이 가능함을 의미하며, 실제 드론의 기동 속도를 고려했을 때 큰 시각적 지연 없이 방위각 변화를 모니터링할 수 있는 충분한 처리 속도를 확보했음을 나타낸다. 추정된 최종 도래각은 사용자가 직관적으로 인지할 수 있도록 GUI 화면에 즉각적으로 반영된다.

3. 실험 환경 및 데이터 수집 파라미터

개발된 시스템의 실제 탐지 성능 및 통계적 신뢰성을 평

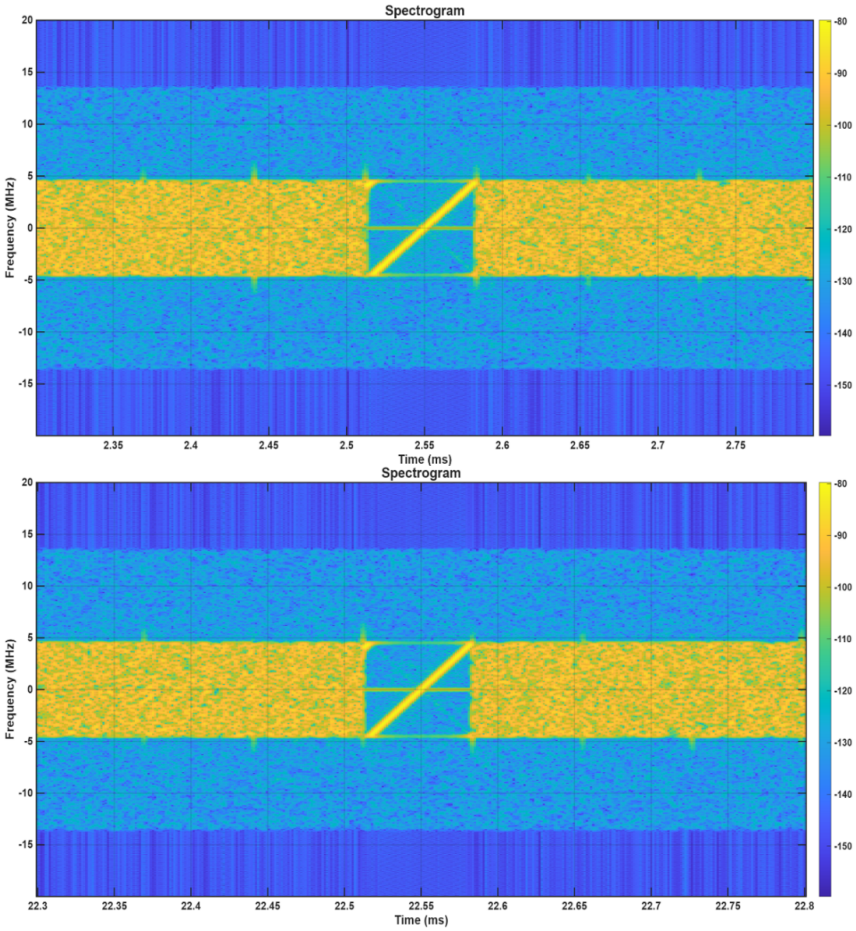

그림 6. 캡처 주기 내 파일럿 신호의 반복 전송 패턴
Fig. 6. Repetitive transmission pattern of pilot signals within a capture period

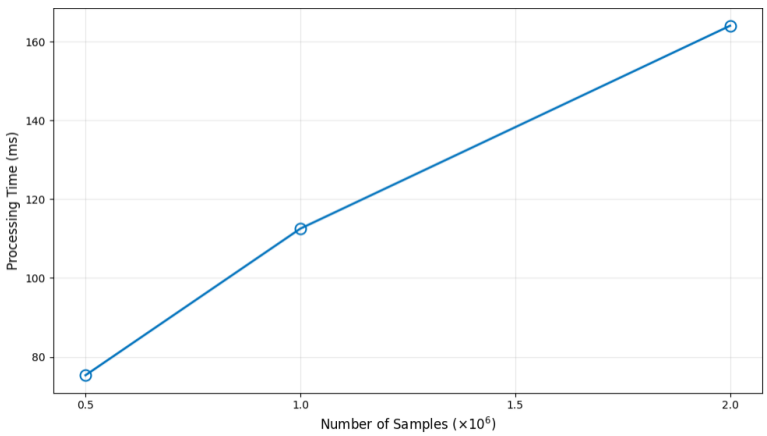

그림 7. 샘플 수에 따라 필요한 처리 시간
Fig. 7. Required processing time according to the number of samples

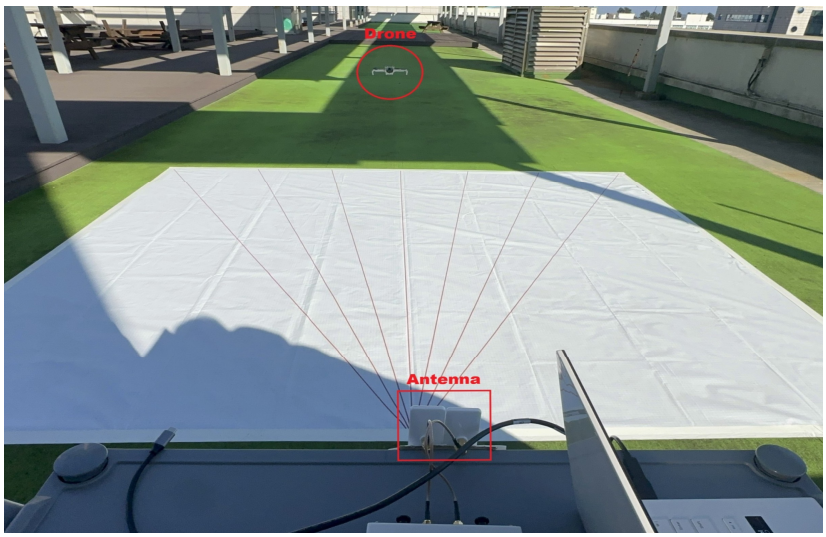

그림 8. 실외 실험 환경 및 하드웨어 설치 전경
Fig. 8. Outdoor experimental environment and hardware setup

가하기 위해 실외 환경에서 테스트를 진행하였다. 도래각 추정 성능은 주변 구조물에 의해 반사되는 다중 경로(multipath) 간섭에 매우 취약하므로, 실험은 이러한 물리적 왜곡 요인을 최소화할 수 있도록 학내의 개방 환경인 건물 옥상에서 실험을 진행하였으며, 실험 환경 전체 구성 및 하드웨어 설치 전경은 그림 8에서 확인할 수 있다. 시스템의 도래각 추정 성능을 확인하기 위해, 수신 안테나 배열의 정중앙을 원점(0°)으로 정렬하고 방사형으로 뻗어 나가는 각도 라인이 마킹된 특수 시트를 바닥에 설치하였다. 이를 통해 드론을 -30°부터 +30° 사이의 지정된 각도에 위치시킨 후, 수신단과 드론 간의 명확한 가시선(line-of-sight: LoS)이 확보된 상태에서 데이터를 수집하였다. 다만, 본 연구에서 사용한 안테나의 수평 빔 폭은 ±40° 수준이나, 실험 환경의 공간적 제약으로 인해 해당 범위를 모두 포함하는 방사형 측정 영역을 확보하기 어려웠다. 특히, 수신단과 드론 간 일정 거리를 유지하면서 안정적인 측정 환경과 안전한 비행 공간을 동시에 확보해야 했기 때문에, 실험 각도를 ±30° 범위로 제한하여 실험을 수행하였다.

Ⅳ. 실험 결과 및 분석

본 장에서는 앞서 구축한 SDR 및 2-소자 배열 안테나 기반의 수신 시스템을 활용하여, 실제 야외 환경에서 드론 신호의 도래각을 추정한 결과와 통계적 성능 지표를 분석한다.

1. 실험 시나리오별 도래각 추정 분포 및 정확도 분석

구현한 시스템의 공간 분해능과 통계적 추정 성능을 확인하기 위해, 다양한 입사각에 대한 도래각 추정 분포를 분석하였다. 수신 안테나 배열의 정면을 기준점(0°)으로 정렬한 뒤 3m 거리에서 관심 영역인 -30°부터 30°까지 10° 간격으로 총 7개의 지점에 드론을 위치시키고 데이터를 수집하였다. 통계적 유의성을 확보하기 위해 각 지점당 10^6개의 샘플(N)을 사용해 1,000회의 반복적인 추정을 수행하였으며, 해당 각도를 도래각으로 선택한 빈도를 히스토그램으로 나타낸 결과는 그림 9와 같다.

그림 9의 분석 결과, 지정된 7개의 모든 목표 각도에서 실제 위치(true angle)를 중심으로 추정 결과가 매우 밀집된 정규분포 형태를 보이며 피크가 형성됨을 확인할 수 있다. 이는 단 2개의 안테나 소자만으로 구성된 최소 배열(2-element ULA) 환경임에도 불구하고, 5.84 GHz 광대역 드론 신호에 대해 MUSIC 알고리즘이 심각한 공간 앨리어싱(spatial aliasing)이나 모호성(ambiguity)

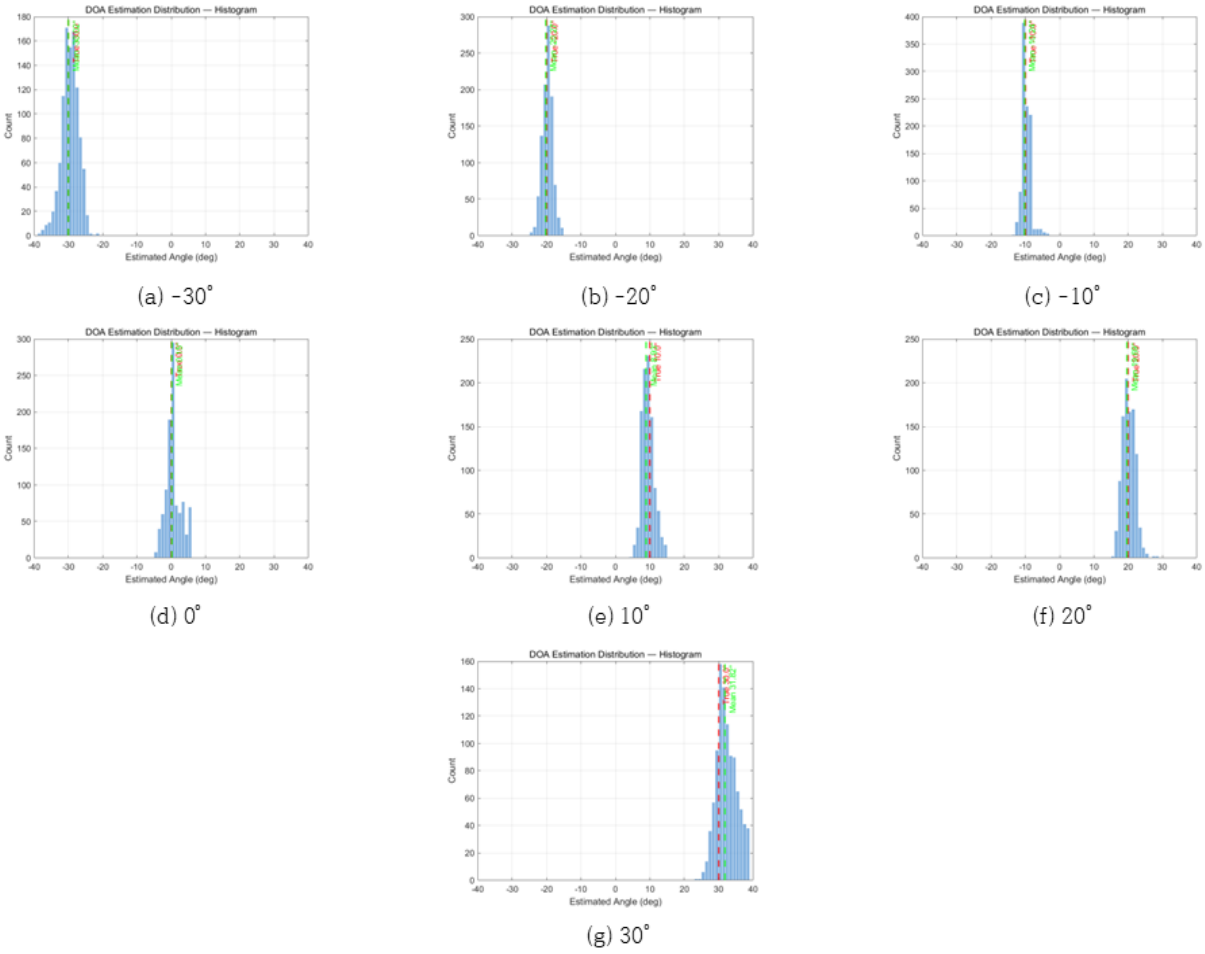

그림 9. 각도별 추정 도래각 히스토그램
Fig. 9. Histogram of DoA estimation by angle

없이 신호의 입사 방향을 명확히 분리해 낼 수 있음을 보여준다.

이러한 히스토그램 기반의 분석에 더해, 각도별 추정 결과의 통계적 산포도(dispersion)를 정량적으로 확인하기 위해 도래각의 표준편차(standard deviation, σ)를 산출하였다. 각 지점당 1,000회의 반복 측정값 $\hat{\theta}_l$와 산술평균 $\bar{\theta}$를 기반으로 산출된 표준편차 수식은 다음과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{l=1}^{N}(\hat{\theta}_l - \bar{\theta})^2} \quad (9)$$

그림 10은 도출된 각도별 표준편차 추이를 보여준다. 측정 결과, 전체 탐색 영역 구간에서 표준편차는 최대 약 3.0° 이하를 기록하며 전반적으로 안정적인 추정 성능을 보였다. 특히 -20°~ +20° 구간에서는 1.3°~ 2.3° 수준의 낮은 편차를 유지하여, 2-소자 최소 배열 구조임에도 우수한 추정 군집성을 보임을 확인하였다. 양 극단인 -30° 및 +30° 지점에서는 표준편차가 약 2.5°~ 3.0° 수준으로 소폭 증가하는 경향이 관찰되었다. 결론적으로 외곽 영역에서 나타나는 이러한 미세한 산포도 증가에도 불구하고, 제안된 시스템은 전체 ±30° 운용 범위에서 안티드론 시스템의 초기 방위 탐지용으로 비교적 유효한 수준의 정확도를 유지함을 실험적으로 확인하였다.

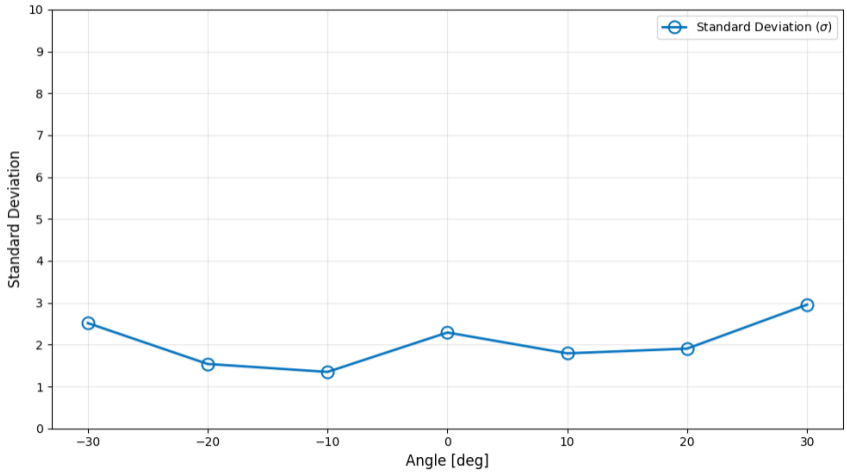

그림 10. 각도별 추정 도래각 표준편차
Fig. 10. Standard deviation of DoA estimation by angle

2. 수신 거리 변화에 따른 추정 오차 분석

실제 실험 환경에서 드론 비행 시 발생할 수 있는 안전사고 예방 및 기체의 안정적인 통제 가능 범위를 고려하여 실험 거리를 10m 이내(3m, 5m, 7m, 10m)로 설정하였다. 본 실험에서는 실제 각도와 추정치 사이의 평균 절대 오차(mean absolute error: MAE)를 통해 성능을 분석하였으며, 산출 식은 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}|\hat{\theta}_j - \theta_{true}| \tag{10}$$

여기서 E는 평균 절대 오차를 의미하며, N은 전체 샘플 수(1,000회), $\hat{\theta}_j$는 시스템의 j번째 도래각 추정치, θ_{true}는 실제 드론 신호의 입사각이다.

그림 11은 수신 거리 변화에 따른 평균 절대 오차 측정

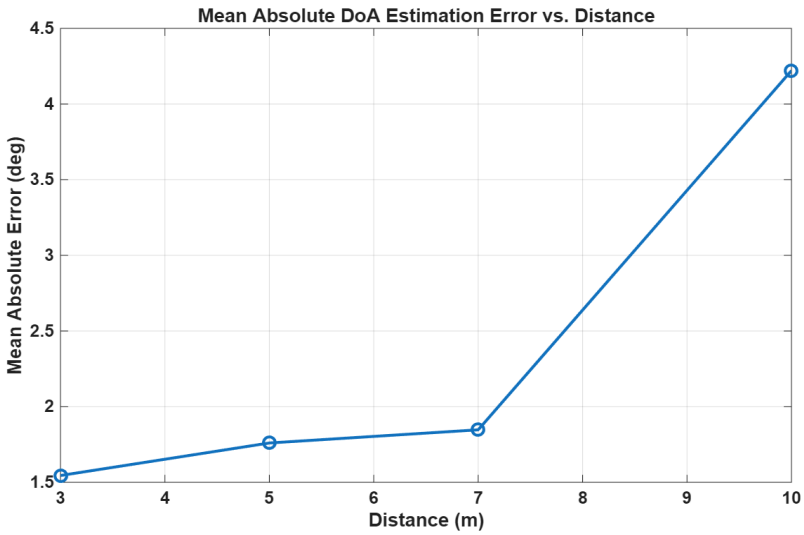

그림 11. 수신 거리에 따른 도래각 추정 평균 절대 오차
Fig. 11. Mean absolute error of DoA estimation according to reception distance

결과를 보여준다. 측정 결과, 수신 거리가 가까워짐에 따라 추정 오차가 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 3m에서 7m 구간에서는 오차의 변동 폭이 작고 비교적 안정적인 추정 결과를 유지하였으나, 10m 지점에서는 오차가 상대적으로 급격히 증가하며 추정 신뢰도가 낮아지는 양상을 확인하였다.

3. 실시간 도래각 추정 GUI 구현

본 연구에서는 도출된 DoA 추정 결과를 운용자가 직관적으로 확인하고 실시간으로 모니터링하기 위해 MATLAB 기반의 GUI 앱을 구현하였다. 그림 12는 드론이 비행 중인 상황에서 시스템을 구동한 후의 화면을 캡처한 것이다.

GUI 화면은 사용자 편의성과 시각적 인지성을 고려하여 크게 세 부분으로 구성된다. 상단에는 현재 추정된 도래각(예: -33.0°)을 대형 텍스트로 표시하여 즉각적인 확인이 가능하도록 했고, 좌측에는 나침반 형태의 인디케이터를 배치하여 드론의 방위 변화를 녹색 지침으로 시각화했다. 우측의 메인 그래프는 시간 경과에 따른 드론 위치의 추정값을 실시간으로 보여준다. 그래프의 적색 실선은 성능 검증을 위해 드론의 예정된 비행 시나리오를 사전에 입력하여 가시화한 것이며, 시스템 상시 운용 시에는 USRP 데이터 기반의 녹색 실선만 표시된다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 사전 정의된 실제 드론의 위치 변화(적색)에 따라 녹색 실선인 추정치가 대응하여 변화하는 양상을 보인다. GUI 상단에 표시된 실행 정보(run info)는 데이터 수집과 알고리즘 연산 프로세스가 실시간으로 병행되고 있음을 나타낸다. 이러한 시각화 결과는 드론의 위치 이동 시나리오에 따른 도래각 추정치가 시간의 흐름에 따라 지속적으로 업데이트되고 있음을 보여주며, 구현된 인터페이스를 통해 드론의 방위 변화 정보를 모니터링할 수 있음을 확인하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 드론의 불법 침입으로 인해 발생하는 다양한 안보 및 사회적 위협에 신속히 대응하기 위해, 저비용 SDR 장비와 최소 단위의 안테나 배열을 결합한 실시간 RF 기반 드론 도래각 추정 시스템을 제안하고 그 성능을 검증하였다. 본 연구는 5.84GHz 대역의 드론 통신 신호를 표적으로 삼아 USRP B210 장비와 2-소자 균일 선형 배열 안테나를 활용하여 경제적으로 수신단을 설계하였다.

이론적 분석과 시뮬레이션을 통해 드론의 통신 방식으로 많이 사용되는 OFDM 신호를 모사하여 MUSIC 알고리즘의 직교성 기반 공간 스펙트럼 분석이 유효하게 동작함을 확인하였다. 이를 바탕으로 구축된 실제 하드웨어 시스템을 실외 환경에 적용하여 실증 실험을 수행한 결과, 제안된 시스템이 심각한 모호성 없이 드론의 방위 변화를 실시간

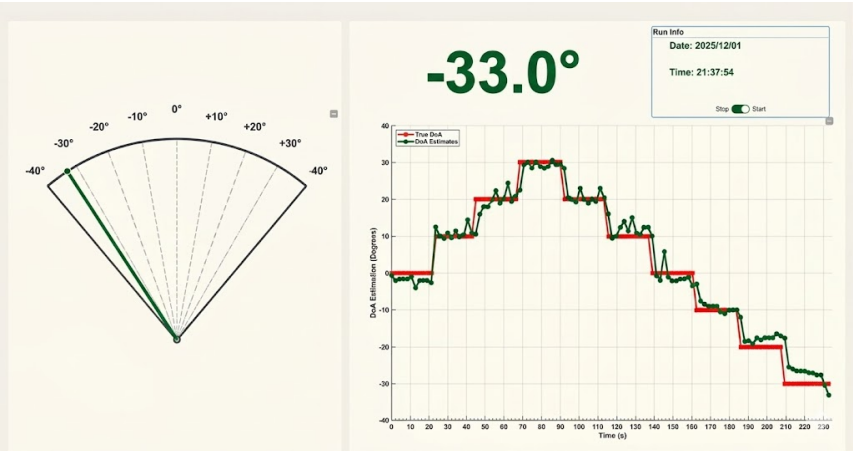

그림 12. MATLAB 기반 GUI 화면
Fig. 12. MATLAB-based GUI screen

으로 정확하게 추적할 수 있음을 확인하였다. 특히, 자체 구현한 MATLAB 기반의 모니터링 GUI는 데이터 수집과 행렬 연산을 병목 현상 없이 처리하여, 실제 드론의 이동 궤적과 도래각 추정치를 큰 지연 없이 시각화할 수 있었다. 또한 수신 거리 및 각도 변화 등 여러 환경적 요인에 따른 추정 오차와 분산의 변화 추이를 정량적으로 분석하였다.

결론적으로 본 연구는 고가의 전용 장비 없이도 단 2개의 안테나와 저비용 범용 하드웨어 구성을 통해 실용적인 수준의 드론 탐지가 가능함을 보여주었다. 특히 본 실험은 가상의 신호 생성을 통한 시뮬레이션이 아닌 SDR 기반의 하드웨어로 시스템을 구현하고 실제 시판 중인 DJI Mini 3 드론의 OcuSync 통신 신호를 직접 수신하여 실험을 수행했다는 점에서 이상적인 신호원을 가정하는 시뮬레이션 기반 연구와 구별되는 차별성을 지닌다. 본 실험에서 가정하는 드론 신호 수신 거리 및 입사각 조건별 측정 데이터는 본 논문에서 적용하는 도래각 탐지 방식과 실제 하드웨어로 구현한 시스템의 동작이 유효하며 신뢰 가능한 탐지 성능을 제공할 수 있음을 실험적으로 제시한다. 비록 현재 시스템은 기초적인 방향 탐지에 중점을 두고 있으나, 향후 안테나 구성의 확장이 가능한 하드웨어의 적용과 알고리즘 고도화를 거친다면 군집 드론을 포함한 보다 복잡한 드론 침입 환경에서도 유효한 수준의 드론 추적이 가능할 것으로 기대된다. 따라서, 본 논문에서 도출된 근거리 실증 데이터 및 오차 분석 결과는 드론의 탐지, 식별, 무력화로 구성되는 전체 통합 안티드론 시스템에서 RF 신호 기반의 드론 추적 방식을 적용할 수 있음을 보여주며 기초적인 데이터로 활용될 수 있다는 점에서 의미가 있다.

참 고 문 헌 (References)

[1] D. Cvitanić, “Drone applications in transportation,” in 2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Split, pp. 1-4, Sep 2020. https://www.researchgate.net/publication/344405724_Drone_applications_in_transportation
doi: https://doi.org/10.23919/SpliTech49282.2020.9243807

[2] M. Z. Anwar, Z. Kaleem, and A. Jamalipour, “Machine learning inspired sound-based amateur drone detection for public safety applications,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 68, No. 3, pp. 2526-2534, Mar 2019. https://ieeexplore.ieee.org/document/8616877
doi: https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2893615

[3] G. N. Pham, P. H. Nguyen, “Drone detection experiment based on image processing and machine learning,” International Journal of Scientific and Technology Research, Vol. 9, No. 2, pp. 2965-2971, Feb 2020. https://www.researchgate.net/publication/339873024_Drone_Detection_Experiment_Based_On_Image_Processing_And_Machine_Learning

[4] Y. K. Kwag, I. S. Woo, H. Y. Kwak, and Y. H. Jung, “Multi-mode SDR radar platform for small air-vehicle drone detection,” in 2016 CIE International Conference on Radar(RADAR), Guangzhou, pp. 1-4, Oct 2016. https://ieeexplore.ieee.org/document/8059254
doi: https://doi.org/10.1109/radar.2016.8059254

[5] J. C. Kim and Y. B. Ko, “Development of SDR-based Drone RF Signal Analysis Software,” Proceeding of the 2025 Korea Institute of Broadcast and Media Engineers Winter Conference, pp.322-323, 2025. https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE12571759

[6] P. Flak, “Drone detection sensor with continuous 2.4 GHz ISM band coverage based on cost-effective SDR platform,” IEEE Access, Vol. 9, pp. 114574-114586, Aug 2021. https://ieeexplore.ieee.org/document/9513316
doi: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104738

[7] M. F. Al-Sa’d, 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. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X18330760
doi: https://doi.org/10.1016/j.future.2019.05.007

[8] R. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 34, No. 3, 1986. https://ieeexplore.ieee.org/document/1143830
doi: https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830

[9] M. Yang, Y. Zhang, Y. Sun, and X. Zhang, “An Enhanced Spatial Smoothing Technique of Coherent DOA Estimation with Moving Coprime Array,” Sensors, Vol.23, No.19, p.8048, Oct 2023. https://www.mdpi.com/1424-8220/23/19/8048
doi: https://doi.org/10.3390/s23198048

[10] S. Han, J. Lee, and J. Cho et al., “Real-time Broadband Drone Radio Signal Monitoring using Low-cost Multiple SDRs,” Journal of the Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol.35, No.4, pp. 257-264, 2024. https://www.researchgate.net/publication/380987635_Real-Time_Broadband_Drone_RF_Signal_Monitoring_Using_Low-Cost_Multi-SDRs
doi: https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2024.35.4.257

[11] P. Gupta and S. P. Kar, “MUSIC and Improved MUSIC algorithm to Estimate Direction of Arrival,” Proceeding of 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP), pp. 757-761, 2015. https://ieeexplore.ieee.org/document/7322593
doi: https://doi.org/10.1109/ICCSP.2015.7322593

[12] C. Bender, “DJI drone IDs are not encrypted,” Technical Report, The University of Tulsa, Tulsa, OK, 2022. https://arxiv.org/abs/2207.10795
doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.10795

저 자 소 개

황 태 욱

- 2021년 ~ 현재 : 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자정보통신공학전공 재학 중
- ORCID : https://orcid.org/0009-0003-2238-5829
- 주관심분야 : 무선통신시스템, 디지털방송 전송시스템, 5G/6G

조 유 겸

- 2021년 ~ 현재 : 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자정보통신공학전공 재학 중
- ORCID : https://orcid.org/0009-0000-0773-7791
- 주관심분야 : 무선통신시스템, 디지털방송 전송시스템, 5G/6G

이 지 원

- 2023년 ~ 현재 : 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자정보통신공학전공 재학 중
- ORCID : https://orcid.org/0009-0003-6190-2526
- 주관심분야 : 무선통신시스템, 디지털방송 전송시스템, 5G/6G

백 채 희

- 2023년 ~ 현재 : 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자정보통신공학전공 재학 중
- ORCID : https://orcid.org/0009-0007-7505-5910
- 주관심분야 : 무선통신시스템, 디지털방송 전송시스템, 5G/6G

김 정 창

- 2000년 2월 : 한양대학교 전자·전자통신·전파공학과군(공학사)
- 2002년 2월 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부(공학석사)
- 2006년 8월 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부(공학박사)
- 2006년 9월 ~ 2008년 5월 : 포항공과대학교 정보통신연구소 전임연구원
- 2008년 5월 ~ 2009년 8월 : 포항공과대학교 미래정보기술사업단 연구조교수
- 2009년 8월 ~ 2010년 8월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2010년 9월 ~ 현재 : 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 교수
- 2017년 ~ 현재 : ETRI Journal, 편집위원
- 2018년 ~ 현재 : IEEE Transactions on Broadcasting, Associate Editor
- ORCID : https://orcid.org/0000-0002-8612-9360
- 주관심분야 : 무선통신시스템, 디지털방송 전송시스템, 5G/6G