https://doi.org/10.7840/kics.2025.50.2.296

# FM 라디오 기회신호를 활용한 방향탐지 기반 UAV 무선측위

김 기 태◆, 신 요 안°

# Direction Finding-Based Wireless Localization for UAVs Using FM Radio Signals of Opportunity

Ki-Tae Kim◆, Yoan Shin°

요 약

본 논문에서는 지향성 안테나를 통해 기회신호 가운데 하나인 FM 라디오 신호의 최대 수신 전력을 추정하여 FM 송신소 위치를 확보하고, 이를 통해 방향탐지를 수행 후 AoA 기반 삼각측량 기법을 적용하는 무선측위 알고리즘을 제안하고, 다양한 환경에 대한 모의실험을 통해 성능을 검증한다.

**키워드 :** 기회신호, FM 라디오, 방향탐지, AoA, 삼각측량, 무선측위

**Key Words :** signals of opportunity, FM radio, direction finding, AoA, triangulation, wireless localization

ABSTRACT

In this paper, we consider a directional antenna to maximize the received power of FM radio signals, one of the signals of opportunity, in order to determine the location of the FM transmitter. Building on this, we apply a direction finding-based wireless localization algorithm, specifically AoA-based triangulation and evaluate the performance of the proposed wireless localization method through simulations in various environments.

## Ⅰ. 서 론

기회신호 (Signal of Opportunity)는 이미 존재하는 무선 통신 또는 방송 신호이나 다른 용도로 활용하여 정보를 추출하거나 새로운 목적에 쓰일 수 있는 신호를 말한다. 이 신호는 추가적인 인프라 구축 없이 기존 신호를 재사용할 수 있다는 점에서 비용 효율적이고 활용도가 높다. FM 라디오 신호는 주로 방송을 위해 송출되는 신호이다. 그러나 이 신호는 높은 출력으로 송출되고 넓은 범위를 커버할 수 있어 장거리에서 쉽게 수신될 수 있다. 특히, FM 라디오 신호는 전파 특성이 강하여 장애물에 영향을 덜 받으며, 도시와 같은 복잡한 환경에서도 안정적으로 수신될 수 있다는 장점이 있다[1].

본 논문에서는 본래 방송 신호인 FM 라디오 신호를 실측 및 신호처리를 통해 무선측위 (Wireless Localization)[2]에 활용하는 방안을 제시한다. FM 라디오 신호는 이미 존재하는 FM 라디오 송신소 인프라를 추가적인 비용 없이 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)의 위치 추정에 사용함으로써 새로운 송신소나 추가적인 인프라를 구축할 필요가 없고, UAV에 FM 라디오 수신기를 탑재하는 것은 저전력 하드웨어를 사용하여 UAV의 에너지 효율성에 미치는 영향을 최소화할 수 있다[3]. 그러므로, 기존 인프라를 사용한다는 점에서 FM 라디오 수신기 탑재 비용 대비 높은 효율성을 제공한다. 특히, 상용 또는 군용으로 UAV 운용 시, 도심 저고도 지역이나 GPS (Global Positioning System) 재밍 (Jamming)이 발생한 상황에서 널리 분포되어 있는 FM 라디오 신호를 대체 신호로 활용 가능하다는 점에서 기회신호로서 특성을 반영한다. 기존 연구[4]는 다수 UAV를 활용하여 방향탐지를 통한 단일 FM (Frequency Modulation) 송신소 위치를 추정하는 방법론을 제시하였다. 본 논문에서는 이에 근거하여 기존 연구를 역 응용해, 다수 FM 송신소로부터 송출되는 FM 라디오 신호를 기회신호로 활용하여 단일 UAV의 위치 추정하는 방향탐지 기반 무선측위 방법론을 제시한다. 특히, 지향성 안테나를 통해 최대 수신 전력을 추정하여 FM 송신소 방향을 탐지한 후, AoA (Angle of Arrival) 기반 삼각측량 (Triangulation) 기법[5]을 적용하는 무선측위 알고리즘을 제안하고 성능을 검증한다.

※ 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. RS-2023-00251595) 및 과학기술정보통신부와 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 지원 (IITP-2025-RS-2023-00258639)을 받아 수행되었음

◆ First Author : (ORCID:0009-0003-6004-0338) School of Electronic Engineering, Soongsil University, kitae96@soongsil.ac.kr, 학생(석사), 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4722-6387) School of Electronic Engineering, Soongsil University, yashin@ssu.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202410-251-B-LU, Received October 23, 2024; Revised October 25, 2024; Accepted October 25, 2024

## Ⅱ. FM 라디오 기회신호 수집 및 분석

그림 1은 FM 라디오 신호 수집을 위해 스펙트럼라이프 사의 FM-R2 모델 지향성 안테나를 설치한 상황을 보여준다. 여기서, 가급적 고층에서 LoS (Line-of-Sight) 환경을 확보하기 위해 숭실대학교 형남공학관 12층에 설치하였다. FM-R2 모델은 실내외 겸용 FM 지향성 안테나로 도심 지역의 반사파 잡음 저감용 안테나이다.

그림 2는 본 연구에서 FM 라디오 신호를 수신하고 처리한 과정을 도시한다. FM 라디오 신호는 지향성 안테나와 이에 연결된 National Instruments 사의 NI USRP-2920 모델 USRP (Universal Software Radio Peripheral)로 수신되며, USRP 내부 ADC (Analog-to-Digital Converter)가 FM 신호를 디지털 IQ 데이터로 변환한다. 변환된 디지털 데이터는 이더넷 통신을 통해 USRP 장치에서 PC로 전송되며, 이후 MATLAB을 사용하여 FM 복조 및 기타 후속 신호처리

그림 1. FM 라디오 신호 수신을 위한 지향성 안테나 설치
Fig. 1. Installation of a directional antenna for receiving FM radio signals

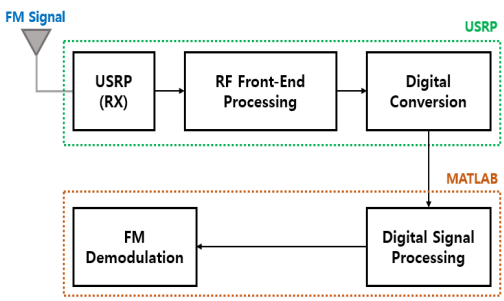


그림 2. USRP를 통한 FM 라디오 신호 수신 과정
Fig. 2. The process of receiving FM radio signals using USRP

를 수행한다. 지향성 안테나를 통해 FM 송신소의 위치를 추정하기 위해, 지향성 안테나를 일정한 속도로 회전하면서 가장 큰 신호 전력이 수신되는 회전 각도를 송신기의 방향으로 추정한다[6].

지향성 안테나를 통해 수신된 FM 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = A\cos(2\pi f_c t + \phi(t)), \tag{1}$$

여기서 $A$는 진폭, $f_c$는 중심 주파수, $\phi(t)$는 메시지 정보가 포함된 위상을 나타낸다. USRP는 $s(t)$를 하향변환 (Down-Converting) 하고 다음과 같은 복소수 형태의 IQ 데이터로 바꾼다.

$$x[n] = I[n] + jQ[n], \tag{2}$$

$x[n]$은 샘플링 주파수 $f_s = 500$ kHz로 샘플링 되며, 각 샘플은 16비트 정수로 표현된다. 수집된 16비트 정수 데이터를 부동소수점 데이터로 스케일링 후, 스케일링된 데이터를 주파수 영역으로 변환하기 위해 DFT (Discrete Fourier Transform)을 적용하고, 이를 이용해 전력스펙트럼밀도 (Power Spectral Density; PSD)를 구한다.

$$X[n] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}, \tag{3}$$

$$PSD[k] = \frac{1}{f_s N}|X[k]|^2, \tag{4}$$

여기서 $N$은 샘플링 총 개수, $X[k]$는 주파수 영역 스펙

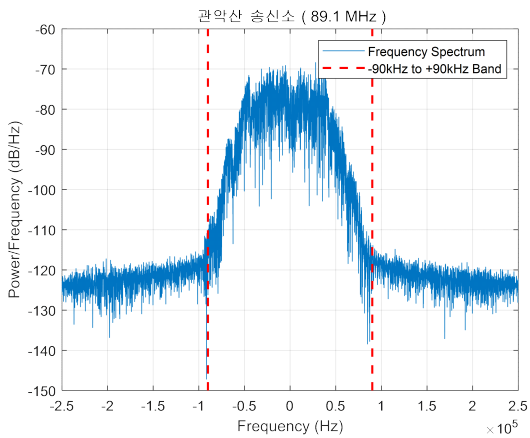


그림 3. 실제 수집한 FM 89.1 MHz 신호의 PSD
Fig. 3. PSD of the collected FM 89.1 MHz signals

표 1. 지향성 안테나를 통해 확보한 FM 송신소 목록
Table 1. List of FM transmitters acquired through the directional antenna

| 방송국 | 송신소 | 주파수 | 송신소 위치 |
|---|---|---|---|
| KBS2 FM | 관악산 | FM 89.1MHz | 경기도 과천시 |
| YTN FM | 청계산 | FM 94.5MHz | 경기도 성남시 |
| Gugak FM | 남산 | FM 99.1MHz | 서울시 용산구 |
| 경인 FM | 수봉산 | FM 90.7MHz | 인천시 미추홀구 |
| OBS 경인 FM | 광교산 | FM 99.9MHz | 경기도 용인시 |

트럼을 나타낸다. 이 때, 중심 주파수 기준으로 FM 라디오 신호의 대역폭을 고려하여 해당 주파수 대역에서의 PSD를 적분하여 전력값을 추정한다[7].

그림 3은 이러한 과정을 통해 최대 전력 방향에서 얻어진 중심 주파수 89.1MHz인 FM 라디오 신호의 스펙트럼 예를 도시한다. 89.1MHz는 KBS2 FM 방송국의 중심 주파수로서 송신소는 관악산 송신소이다. 앞서 설명된 방식으로 이에 대한 전력값을 추정하면 1.9023 mW이다. 표 1에는 동일한 방법으로 확보한 5개 송신소 정보가 정리되어 있다.

## Ⅲ. 제안 알고리즘 및 성능 평가

### 3.1 제안된 방향탐지 기반의 무선측위 알고리즘

본 논문에서 제안하는 무선측위 알고리즘은 다수 UAV를 통해 단일 FM 불법 송신기의 방향을 탐지하고 이를 바탕으로 송신기 위치를 추정하는 기존 연구[4]를 역 응용하여, 다수 FM 송신소로부터 송출되는 FM 라디오 신호를 기회신호로 활용하여 단일 UAV의 위치를 추정한다.

그림 4는 단일 UAV에 탑재된 적절한 방향탐지 장비를 통해 진북 방향을 확보하고 2개의 FM 송신소에 대하여 FM 신호 방향 및 방위각을 측정하는 상황을 도시한다. 2개 FM 송신소로부터 측정된 방위각을 $\theta_a$, $\theta_b$라 할 때, AoA 기반의 삼각측량 기법은 두 방향탐지 결과의 교차점으로 UAV의 위치 $(x, y)$를 아래 식과 같이 유도할 수 있다[5].

$$x = \frac{y_b - y_a + \tan(\theta_a)x_a - \tan(\theta_b)x_b}{\tan(\theta_a) - \tan(\theta_b)}, \qquad (5)$$
$$y = \tan(\theta_a)(x - x_a) + y_a.$$

### 3.2 모의실험 결과

그림 5는 다양한 채널 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)에 대해 5개 (관악산, 청계산, 남산, 수봉산, 광교산 송신소) FM 라디오 기회신호를 활용한 RMSE (Root Mean Squared Error) 무선측위 성능을 도시한다. 송신소 총 5개 중 $M \equiv 2$ 개, 3개, 4개, 5개를 무작위로 선택하고, $\binom{M}{2}$개의 송신소 쌍 조합에 대해 식 (5)의 AoA 기반 삼각측량 기법을 적용후, $x$ 축과 $y$ 축 값들의 평균으로 최종 위치 추정값을 구한다.

실험 결과, 활용되는 송신소 개수가 $M \equiv 2$ 개에서 5개로 증가할수록 성능이 점차 향상됨에 따라 해당 알고리즘의 성능이 검증되었다. 특별히, SNR이 20 dB 이상인 양호한 채널 환경에서는 모든 방식에서 60 m 이내 오차의 성능을 보였으며, 특히 송신소 5개를 활용한 경우 약 20 m 이내 오차의 우수한 성능을 확인하였다.

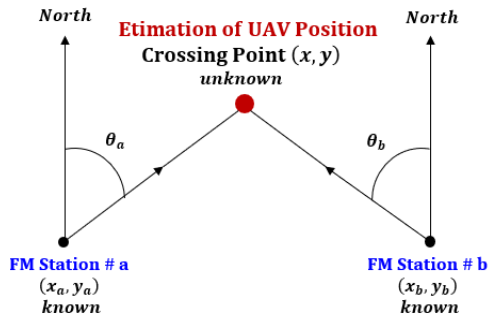


그림 4. 제안 방식의 AoA 기반의 삼각측량 기법
Fig. 4. AoA based triangulation of the proposed method

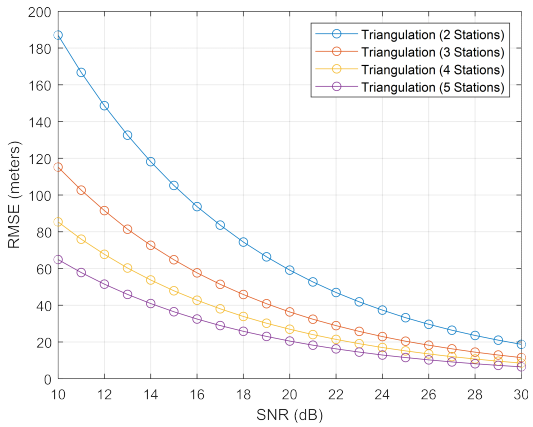


그림 5. FM 라디오 신호를 활용한 무선측위 결과
Fig. 5. Results of wireless localization using FM radio signals

## References


[1] R. Kapoor, S. Ramasamy, A. Gardi, and R. Sabatini, “UAV navigation using signals of opportunity in urban environments: An overview of existing methods,” *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 377-383, Dec. 2016. (https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.156)

[2] K.-T. Kim, K.-Y. Kim, and Y. Shin, “A technique for improving wireless localization precision using chirp signals,” *J. KICS,* vol. 49, no. 2, pp. 207-210, Feb. 2024. (https://doi.org/10.7840/kics.2024.49.2.207)

[3] Y. Li, S. Shi, and J. Xue, “Time allocation and power control in multi-UAV energy harvesting network,” *J. Wireless Netw.,* vol. 29, no. 2, pp. 5092-5106, May 2024. (https://doi.org/10.1007/s11276-023-03421-6)

[4] J. Xia, Z. Zheng, and W. Zhang, “Research and design of an FM radio transmitter positioning system based on UAV,” in *Proc. IEEE ITNEC 2017,* pp. 127-131, Chengdu, China, Dec. 2017. (https://doi.org/10.1109/ITNEC.2017.8284922)

[5] D. Niculescu and B. Nath, “Ad hoc positioning system (APS) using AoA,” in *Proc. IEEE INFOCOM 2003*, pp. 1734-1743, San Francisco, USA, Mar. 2003. (https://doi.org/10.1109/INFCOM.2003.1209196)

[6] B.-J. Jang, “Direction finding technology: Tutorial, review, and research prospects,” *J. KIEES,* vol. 30, no. 8, pp. 607-617, Aug. 2019. (https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2019.30.8.607)

[7] G. Garrison, “A Power Spectral Density Analysis for Digital FM,” *IEEE Trans. Commun.,* vol. 23, no. 11, pp. 1228-1243, Nov. 1975. (https://doi.org/10.1109/TCOM.1975.1092742)