

FM 라디오 기회신호 기반 RSS 전력 가중치 모델을 활용한 UAV 무선측위

김기태*, 신요안°

Wireless Localization for UAVs Based on FM Radio Signals of Opportunity with RSS Power Weighting Model

Ki-Tae Kim*, Yoan Shin°

요약

본 논문에서는 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)에 대한 무선측위를 수행하기 위해, 지향성 안테나를 통해 기회신호 중 하나인 FM (Frequency Modulation) 라디오 신호의 최대 수신 전력을 활용하여 방향탐지를 수행하고, 이를 통해 FM 송신소의 위치를 확보한 후 AoA (Angle of Arrival) 기반 삼각측량 기법을 적용한다. 이후, RSS (Received Signal Strength) 추정 전력 가중치를 활용하여 최종 UAV 위치를 결정하는 RSS 추정 전력 가중 삼각측량 기법을 제안하고, 다양한 채널 잡음 환경에 대한 모의실험을 통해 성능을 검증한다.

키워드 : 기회신호, FM 라디오, 방향탐지, RSS, 추정 전력 가중치 모델링, AoA, 삼각측량, 무선측위

Key Words : signals of opportunity, FM radio, direction finding, RSS, estimated power weighting modeling, AoA, triangulation, wireless localization

ABSTRACT

In this paper, we consider wireless localization of an unmanned aerial vehicle (UAV). We use a directional antenna to estimate the maximum received power of frequency modulation (FM) radio signals, which are considered as a type of signals of opportunity, to perform direction finding and determine the location of FM transmitters. After that, we apply an angle of arrival (AoA)-based triangulation method. Furthermore, we propose a received signal strength (RSS) estimated power weighting model to refine the final UAV location estimation, leading to the proposed RSS estimated power-weighted triangulation approach. Performance of the proposed method is verified through simulations in various channel noise environments.

I. 서론

기회신호 (Signal of Opportunity)는 추가적인 인프라 구축 없이 기존 무선 통신 또는 방송 신호를 다양한 용도로 재사용할 수 있다는 점에서 비용 효율적이고 활용도가 높다^[1]. 기회신호로 활용될 수 있는 신호 중 하나인 FM 라디오 신호는 높은 출력으로 송출되고 넓은 범위를 커버할 수 있어 장거리에서 쉽게 수신될 수 있다. 특히, FM 라디오 신호는 전파 특성이 강하여 장애물의 영향을 덜 받으며, 개활지와 복잡한 도심 등 다양한 환경에서 안정적으로 수신될 수 있다는 장점이 있다^[2].

본 논문에서 고려한 바와 같이 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)의 무선측위^[3]에 FM 라디오 기회신호를 활용한다면, 새로운 송신소나 추가 인프라를 구축할 필요가 없다는 점에서 FM 라디오 수신기 탑재 비용 대비 높은 효용성을 기대할 수 있다^[1].

이에 본 논문에서는 본래 방송 신호인 FM 라디오 신호의 최대 수신 전력을 추정하여 방향탐지^[4]를 수행한다. 그 뒤, RSS (Received Signal Strength) 추정 전력을 모델링하고, 이를 가중치로 활용하는 AoA (Angle of Arrival)^[5] 방향탐지 기반 무선측위 알고리즘인 RSS

* 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 : 202411-272-B-LU, Received November 7, 2024; Revised November 12, 2024; Accepted November 12, 2024

추정 전력 가중 삼각측량 (Triangulation) 기법을 제안한다. 이러한 접근 방식의 배경은 다음과 같다. 지향성 안테나를 통해 실측된 FM 라디오 신호의 최대 수신 전력은 시간에 따라 변동성이 커서 신뢰성이 있는 직접 가중치로 적용하기 적절치 않다. 따라서, 이러한 변동성을 해결하기 위해, RSS 전력 가중치 모델링을 적용하여 실측 FM 라디오 신호의 전력과 유사하게 모델링함으로써 안정적인 성능을 도출한다. 특히, 제안된 RSS 전력 가중치 모델은 단순히 수신된 신호 세기에만 의존하지 않고, 신호 세기와 환경적 특성을 함께 고려하여 신뢰성 있는 결과를 제공한다는 차별성을 갖는다. 이는 다양한 채널 환경에서도 높은 성능을 유지할 수 있게 하며, 기존의 단순 AoA 삼각측량 기법^[5]과 비교했을 때 적은 송신소 갯수로도 효과적인 위치 추정을 가능하게 한다.

II. FM 라디오 기회신호 수집 및 분석

본 논문에서 지향성 안테나를 활용해 FM 라디오 신호를 수신하고 방향탐지를 수행한 과정은 다음과 같다. FM 라디오 신호는 지향성 안테나와 이에 연결된 National Instruments 사의 NI USRP-2920 모델 USRP (Universal Software Radio Peripheral)로 수신되었으며, USRP 내부 ADC (Analog-to-Digital Converter)가 FM 신호를 디지털 IQ 데이터로 변환하였다. 변환된 디지털 데이터는 이더넷 통신을 통해 USRP에서 PC로 전송되어, 이후 MATLAB을 사용하여 FM 복조 및 기타 후속 신호처리를 수행하였다. 지향성 안테나를 통해 FM 송신소의 위치를 추정하기 위해, 지향성 안테나를 일정한 속도로 회전하면서 가장 큰 신호 전력이 수신되는 회전 각도를 송신기의 방향으로 추정하였다^[4].

안테나를 통해 수신된 FM 신호는 다음과 같다.

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

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

$$x[n] = I[n] + jQ[n], \quad (2)$$

$x[n]$ 은 샘플링 주파수 $f_s = 500$ kHz로 샘플링 되며, 각 샘플은 16비트 정수로 표현된다. 수집된 16비트 정

수 데이터를 부동소수점 데이터로 스케일링 후, 스케일링된 데이터를 주파수 영역으로 변환하기 위해 식 (3)의 DFT (Discrete Fourier Transform)을 적용하고, 이를 이용해 식 (4)와 같이 전력스펙트럼밀도 (Power Spectral Density; PSD)를 구한다.

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

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

여기서, N 은 샘플링 총 갯수, $X[k]$ 는 주파수 영역 스펙트럼을 나타낸다. 이 때, 중심 주파수 기준으로 FM 라디오 신호의 대역폭을 고려하여 해당 주파수 대역에서의 PSD를 적분하여 전력값을 추정한다^[6].

그림 1은 이러한 과정을 통해 최대 전력 방향에서 얻어진 중심 주파수 99.1MHz인 남산 송신소의 “Gukak FM” 라디오 신호 스펙트럼 예를 도시한다. 앞서 설명된 방식으로 이의 전력값을 추정하면 1.9023mW이다. 동일한 방법으로 모두 5개 송신소 (관악산, 청계산, 남산, 수봉산, 광교산)로부터의 서로 다른 5개 FM 라디오 신호를 확보하였다.

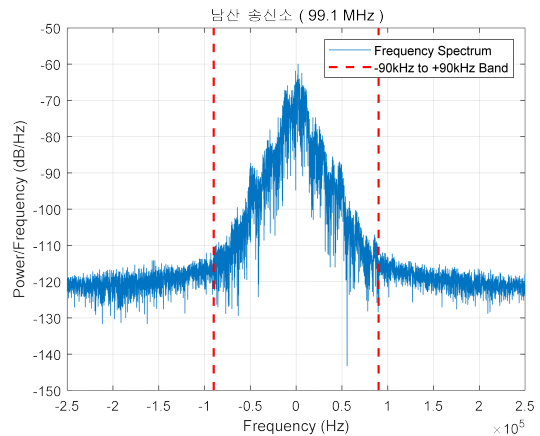


그림 1. 실제 수집한 FM 99.1 MHz 신호의 PSD
Fig. 1. PSD of the collected FM 99.1 MHz signals

III. 제안 알고리즘 및 성능 평가

3.1 제안된 방향탐지 기반의 무선측위 알고리즘

본 논문에서는 RSS 전력 가중치 모델을 AoA 기반 삼각측량 기법에 적용한 RSS 추정 전력 가중 삼각측량 기법을 제안한다. RSS 모델링 시 개활지 및 도심 등

다양한 환경 모두를 반영하기 위해, 식 (5)와 같이 경로 손실 모델에 Shadowing 효과를 반영하고, 그 뒤 Rician 페이딩 채널까지 고려한다^[7].

$$PL(\hat{d}) = PL(d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{\hat{d}}{d_0}\right) + X_\sigma \text{ [dB]}, \quad (5)$$

여기서, n 은 경로 손실 지수, $d_0 = 1\text{m}$ 은 기준 거리, $\hat{d}$ 는 송신기와 수신기 사이 추정 거리, X_σ 는 Shadowing의 영향으로서 평균 0, 표준편차 σ 인 정규 분포를 따르는 랜덤 변수이다.

그림 2는 UAV에 탑재된 적절한 방향탐지 장비를 통해 진북 방향을 확보하고, 탐지된 다수 FM 송신소들에 대해 2개 송신소 쌍을 고려해 송신소 방위각을 측정하는 상황을 도시한다. 2개 FM 송신소로부터 측정된 방위각을 각각 θ_a , θ_b 라 할 때, 식 (6)의 AoA 기반 삼각측량 기법^[5]을 적용후, RSS 추정 전력 가중치를 활용해 x , y 축 값들의 가중 평균으로 UAV의 최종 위치 (x, y) 를 식 (7)과 같이 얻을 수 있다.

$$x = \frac{y_b - y_a + \tan(\theta_a)x_a - \tan(\theta_b)x_b}{\tan(\theta_a) - \tan(\theta_b)}, \quad (6)$$

$$y = \tan(\theta_a)(x - x_a) + y_a.$$

$$x = \sum_{i=1}^K P_i x_i / \sum_{i=1}^K P_i, \quad y = \sum_{i=1}^K P_i y_i / \sum_{i=1}^K P_i, \quad (7)$$

여기서, $K \equiv \binom{M}{2}$ 는 확보된 M 개 FM 송신소에 대한 2개 쌍의 총 개수이다.

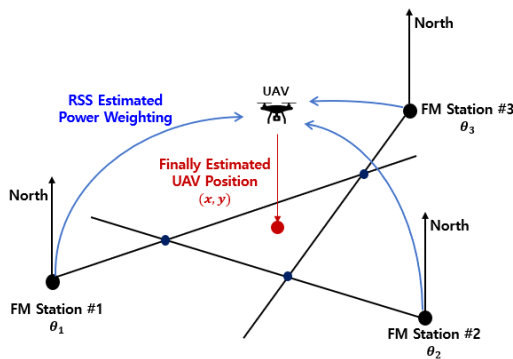


그림 2. 제안 방식의 RSS 추정 전력 가중 삼각측량 기법
Fig. 2. RSS estimated power-weighted triangulation of the proposed method

3.2 모의실험 결과 및 결론

그림 3은 다양한 채널 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)에 대해 5개 송신소 (관악산, 청계산, 남산, 수봉산, 광교산) FM 라디오 기회신호를 활용한 RMSE (Root Mean Squared Error) 무선추위 성능을 도시한다. 모의실험을 위해 경로 손실 지수 $n = 3.5$, Shadowing 표준편차 $\sigma = 6\text{dB}$, Rician K-Factor 7을 고려하였다. 송신소 총 5개 가운데 $M = 2, 3, 4, 5$ 개를 무작위로 100번 선택하고, 각 선택마다 총 K 개 송신소 쌍 조합에 대해 식 (6)의 AoA 기반 삼각측량 기법을 적용후, 식 (7)의 RSS 추정 전력 가중 삼각측량 기법을 최종 적용하여 RMSE를 계산하였다. 각 선택에 대해 10,000번의 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하여 다양한 환경 요인을 반영한 RMSE를 도출하고, 이를 통해 100번의 무작위 선택에 대한 평균 RMSE를 구하였다. 추가로, 제안된 기법과의 비교 기법으로 $M = 2$ 개일 때의 기본적인 AoA 기반 삼각측량 기법의 결과도 같이 도시하였다.

그림 3의 결과로부터, 제안된 RSS 추정 전력 가중 삼각측량 기법은 활용되는 송신소 갯수가 $M = 2$ 개에서 5개로 증가할수록 성능이 큰 폭으로 향상됨에 따라 해당 알고리즘의 성능이 검증되었다. 특별히, SNR이 20dB 이상인 양호한 채널 환경에서는 모든 경우 60m 이내 오차의 성능을 보였다. $M = 2$ 개일 때 기본적인 AoA 기반 삼각측량 기법과 비교해 보면, SNR이 10dB에서 약 20m 차이의 큰 성능 향상이 가능함을 확인하였다.

결과적으로, 제안된 RSS 추정 전력 가중 삼각측량 기법은 기본적인 AoA 기반 삼각측량 기법에 비해 의미

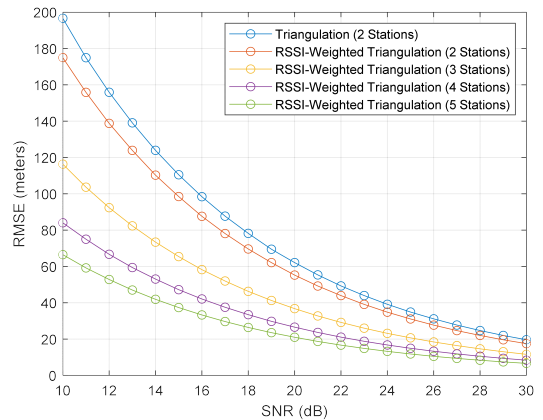


그림 3. 제안된 RSS 추정 전력 가중 삼각측량 기법의 무선추위 결과
Fig. 3. Results of wireless localization using the proposed RSS estimated power-weighted triangulation

있는 성능 향상을 제공할 수 있음을 확인하였다. 다만, 취득할 수 있는 송신소 개수가 증가함에 따라 기존 정보와 중복되거나 가중치의 비중이 낮아지면서 성능 향상 폭은 다소 줄어드는 경향을 보였다. 하지만, $M=2$ 개인 경우 기존 기법보다 크게 우수한 성능을 보였으며, 이는 실제 UAV 운용시 최소한의 송신소 신호만 수신 가능한 상황일 때도 효과적으로 대처할 수 있음을 시사한다. 또한, 제안 기법은 경로 손실, Shadowing, Rician 페이딩 등 다양한 채널 환경을 반영하여 개활지와 도심 등 다양한 운용 환경에서 신뢰할 수 있는 성능을 제공할 수 있도록 설계되었다.

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/10.1109/tcsi.2020.2979347>)
- [2] 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>)
- [3] 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>)
- [4] 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>)
- [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] 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>)
- [7] B. H. Liu, B. Otis, S. Challa, P. Axon, C. T. Chou, and S. Jha, "On the fading and shadowing effects for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE MASS 2006*, pp. 51-60, Vancouver, Canada, Oct. 2006. (<https://doi.org/10.1109/MOBHOC.2006.278597>)