

단일 UAV를 활용한 TDOA/AOA 기반 미상 감시 레이더 위치 추정 기법

정우성*, 임재성°, 백호기*, 구자열**

TDOA/AOA-Based Unknown Surveillance Radar Localization Scheme Using a Single UAV

Wooseong Jeong*, Jaesung Lim°, Hoki Baek*, Jayeul Koo**

요약

적 감시 레이더의 위치 추정을 위하여 레이더 신호 탐지용 센서 노드로 Unmanned Aerial Vehicle(UAV)를 활용하게 되면 신속한 노드 운용성 등 다양한 장점이 있다. 특히, 단일 UAV로 운용된다면 비용 절감만이 아니라 다중 UAV의 사용시 발생하는 시간 동기화 문제에서 벗어날 수 있다. 최근에 제안된 단일 UAV 기반 미상 감시 레이더 위치 추정 기법은 Time Difference of Arrival(TDOA)를 채택하고 있기에 우수한 Dilution of Precision(DOP) 확보가 어렵고 또한 적진 깊이 위치한 레이더에는 가깝게 접근하기 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 감시 레이더의 빔회전과 Pulse Repetition Interval(PRI) 정보로부터 레이더 펄스 신호의 도착 시간차와 도착 각도를 추정하여 위치를 결정할 수 있는 TDOA와 Angle of Arrival(AOA)의 결합기법을 제안한다. 제안 기법은 TDOA 기법과 비교할 때 미상 레이더의 위치 추정 시에 발생하는 DOP 증속성이 완화되고 또한 위치추정 정확도가 크게 개선된다는 것을 MATLAB 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 특히 단일 UAV의 회전 반경이 일정 이상 보장되면 그 크기에 무관하게 높은 정확도를 가짐을 확인하였다.

Key Words : Surveillance radar, DOP, Position estimation, TDOA/AOA, UAV

ABSTRACT

When UAV is used as a sensor node for radar signal detection to estimate the location of the enemy surveillance radar, there are various advantages such as rapid node operation. In particular, in the case of using a single UAV, it is possible to drastically reduce operating costs and free from the problem of time synchronization among multiple UAVs. The technique recently proposed for estimating unknown surveillance radar position using a single UAV employs TDOA, making it difficult to obtain outstanding Dilution of Precision(DOP) and also difficult to approach radars located in enemy lines. Therefore, this paper proposes a combination of TDOA/AOA that estimates the arrival time difference and arrival angle of the radar pulse signal from the beam rotation information of the monitoring radar and the pulse repetition interval to determine the location. The proposed technique was evaluated through MATLAB simulation that compared to

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었음.(UD190033ED)

• First Author : Ajou University Department of Military Digital Convergence, wjddntjd99@ajou.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Ajou University Department of Military Digital Convergence, jaslim@ajou.ac.kr, 중신회원

* Kyungpook National University School of Computer Science and Engineering, neloyou@knu.ac.kr, 중신회원

** Ajou University Department of Military Digital Convergence, koo69234@ajou.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202204-051-0-SE, Received March 17, 2022; Revised April 25, 2022; Accepted April 26, 2022

the TDOA technique, it could mitigate the DOP dependencies arising from the position estimation of unknown radars and significantly improve the position estimation accuracy. In particular, it was confirmed that if the radius of rotation of a single UAV is guaranteed more than a certain level, it has high accuracy regardless of rotation size.

I. 서 론

현대전에서 아군의 공중 전투 시스템은 적대적인 레이더 시스템에 의해 크게 위협을 받는다. 따라서 적군 미상 레이더의 위치 추정은 레이더에 대한 경고, 레이더 교란 유도, 무기 공격 유도 등과 같은 상황에 있어 군사적으로 매우 중요하다^[1].

레이더 신호의 탐지 센서 노드로 Unmanned Aerial Vehicle(UAV)를 사용하게 되면 저비용으로 신속하게 작전 지역에 전개할 수 있으며, 자유롭게 노드를 운용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 효과적인 정보획득을 위해서 적진 깊이 위치한 레이더에 최대한 가깝게 접근하는 경우 UAV를 활용한 센서 노드의 저피탐 능력이 매우 중요해진다.

특히 단일 UAV를 사용하는 경우 UAV 군집 방식과 비교할 때 비용 문제, 시간 동기화 문제 등 측면에서 매우 효율적이다^[2]. 또한, Angle of Arrival (AOA) 기법은 배열 안테나를 이용하여 수신신호의 도착 각도 추정이 가능하기에, 단일 UAV에서 쉽게 적용할 수 있다.

Time of Arrival(TOA), Time Difference of Arrival (TDOA), AOA, Received Signal Strength(RSS) 등의 여러 기법들을 통해 미상 신호원의 위치를 추정하고자 하는 연구가 진행되어 왔다^[3-5]. 기존의 기법들은 UAV 환경에서 적용하기 어려울 뿐만 아니라, 신호원과의 거리가 탐지 센서 노드들 사이의 거리보다 클 때 발생하는 Dilution Of Precision(DOP) 문제에서 어려움이 있다. 이러한 DOP 문제는 위치 추정의 정확도를 떨어뜨리고, 특별한 조건에서는 위치 추정 방정식의 해가 존재하지 않게 된다.

최근 단일 UAV를 사용하여 추정 DOP 값이 최소가 되도록 UAV를 목표 레이더의 추정 위치로 접근시켜 신호를 획득하는 TDOA 기법이 제안되었다^[6]. [6]에서는 Least Squares Method(LSM)와 Extended Kalman Filter(EKF)를 이용하여 위치를 추정하고 보정하고 있다. 하지만 기존 기법들과 같이 레이더와 UAV 사이의 거리가 멀 때에는 여전히 DOP 문제가 존재하며, UAV를 접근시키는 과정을 거처야만 DOP

문제를 해결할 수 있다. 위 논문은 감시 레이더의 위치 추정이라는 중요한 작전 상황에서 단일 UAV의 운용이라는 측면에서 큰 의미가 있다. 그러나, UAV의 회전 중심을 접근시키는 과정은 오랜 시간이 요구될 뿐만 아니라 추정 위치의 정확도 측면에서 비효율적이다. 또한 TDOA 단일 기법을 사용하므로 UAV의 회전 반경 변화에 큰 영향을 받게 된다.

따라서 본 논문에서는 단일 UAV를 이용하여 보다 효율적인 감시 레이더의 위치 추정을 목표로 TDOA와 AOA를 결합한 기법을 제안한다. 도착시간 차이와 각도 차이를 추정하기 위하여, 감시 레이더의 빔회전과 Pulse Repetition Interval(PRI) 정보를 이용하였다. 제안 기법은 TDOA 기법과 달리 DOP 종속성이 완화되기에 연속된 펄스군을 선택할 수 있다. 선택한 펄스군에서 대표 펄스를 선정하여 도착시간 차이와 각도 차이를 얻으며, LSM을 수행하여 위치를 추정한다. 제안 기법을 통해 추정 시간을 단축하면서도 높은 정확도를 얻을 수 있음을 MATLAB 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구를 살펴보고, 3장에서는 제안하는 시스템 모델과 TDOA/AOA 기법을 설명한다. 그리고 4장에서는 성능 분석을 위한 시뮬레이션 환경과, 결과를 기술한다. 마지막으로 결론으로 마무리한다.

II. 관련 연구

2.1 감시 레이더

레이더(Radar)는 강한 전자파 펄스를 방사한 후 포적에 부딪혀 돌아오는 전자파를 수신하고, 분석하여 표적과의 거리, 방향 등의 다양한 정보를 획득하기 위한 탐지시스템이다. 특히 공중 상황을 식별하기 위한 감시 레이더(Surveillance Radar) 시스템은 공방 같은 주요 거점 시설 방어, 항적기에 대한 피아식별, 대공방어 등의 중요한 군사적 가치를 지닌다. 감시 레이더는 방사한 펄스의 반사 신호만을 이용하여 항적을 식별하는 1차 감시 레이더(Primary Surveillance Radar)와 항공기 식별을 위한 부호화된 신호를 전송하여 항적을 식별하고 정보를 획득하는 2차 감시 레이더

(Secondary Surveillance Radar)로 나누어진다⁷⁾. 일반적으로 감시 레이더는 좁은 펄스 신호를 방사하면서 360도를 스캔하며, 휴지 시간을 통해 항공기에서 반사된 신호를 수신한다. 레이더 펄스 신호는 펄스 방사 시간과 휴지 시간으로 구성되는데, 이 간격을 PRI라고 한다. 일반적으로 감시 레이더는 도플러 성능 개선을 위해 일정한 크기의 PRI를 사용한다⁸⁾.

본 논문에서는 미국의 레이시온사의 공중 탐지 레이더인 AN/SPS-49의 사양을 참조하였다⁹⁾. AN/SPS-49의 다양한 제원중에서 PRI, 시간당 회전 각도, 펄스 빔폭을 제안 기법의 검증에 위한 시뮬레이션 파라미터로 사용하였다.

2.2 감시 레이더 위치추정

신호원으로부터 방사된 신호를 서로 다른 곳에 위치한 노드들이 수신한 시간 차이를 TDOA라 한다. 신호의 수신 시간차는 노드 사이의 거리에 비례하므로, 이를 기반으로 신호원의 추정 위치를 포함하는 쌍곡선을 만들 수 있다. 이러한 방법으로 다수 노드에서의 도착시간 차이를 통해 다수 쌍곡선의 교점을 신호원의 위치로 추정한다¹⁰⁾. 특히 감시 레이더와 같은 신호원을 활용한 위치 추정은 타임 스탬프와 같은 시간정보 없이 짧은 펄스를 탐지하여 위치를 추정한다는 점에서 일반적인 측위 기법과는 구분된다. 이를 위하여 레이더가 송출하는 펄스 신호를 기반으로 도착시간을 추정하기 위한 다양한 방법들이 제안되어 왔다¹¹⁾.

최근 [6]에서는 단일 UAV 노드를 이동시키면서 레이더로부터 전파된 펄스를 탐지하는 방식으로 시차를 두고 여러 지점에서 펄스를 수신하여 TDOA 기반 측위 기법을 적용하는 방법을 제안하였다. 이동하는 단일 UAV 노드를 활용하여 다수의 TDOA 값을 계산하기 위해선 각 위치에서 수신하는 신호의 출발시간 없이 도착시간을 얻을 수 있어야 하는데, 이를 위해 [6]에서는 고정 PRI 상황에서 도착시간 추정 방법을 제시하였다.

III. 제안 기법

3.1 시스템 모델

제안하는 시스템 모델은 그림 1과 같다. UAV는 3차원 좌표계의 원점을 기준으로 고도 h 에서 반지름 r 의 회전운동을 하는 것으로 가정한다. 또한 미상 레이더의 위치는 $\mathbf{P}=[x_p, y_p, z_p]^T \in R^3$ 로 나타낸다. UAV는 회전운동 중에 레이더의 메인로브 빔내에서 방사되는 펄스 신호를 수신하게 되는데, 수신 지점 m 에서

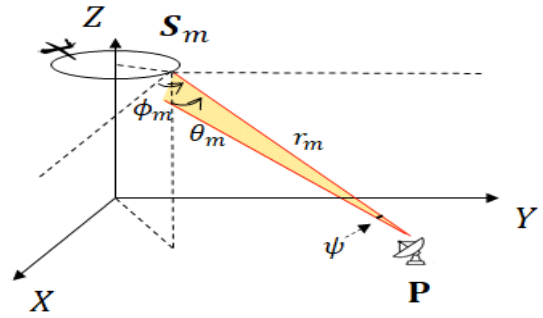


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

UAV 위치를 $\mathbf{S}_m = [x_m, y_m, z_m]^T \in R^3$ 로 정의한다. 레이더 \mathbf{P} 와 UAV \mathbf{S}_m 과의 거리를 r_m 로 정의하면, 레이더에서 송신된 신호가 UAV에 탐지될 때까지 전파 시간 T_m 과 광속 c 를 이용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$r_m = cT_m = \| \mathbf{P} - \mathbf{S}_m \| = \sqrt{(x_p - x_m)^2 + (y_p - y_m)^2 + (z_p - z_m)^2} \quad (1)$$

UAV의 위치 m 지점에서 레이더와의 거리 r_m 과, n 지점에서의 거리 r_n 의 차를 $d_{m,n}$ 로 정의한다. 또한, m 지점과 n 지점에서의 각각 도착 신호의 시간 차이를 $\Delta T_{m,n}$ 로 정의하면 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$d_{m,n} = r_m - r_n = c(T_m - T_n) = c(\Delta T_{m,n}) \quad (2)$$

제안하는 시스템에서는 펄스의 출발 시간정보를 모르기 때문에 (2)에서 T_m 과 T_n 을 결정할 수 없다. 따라서 $\Delta T_{m,n}$ 를 이용하여 TDOA 기법을 적용하고자 한다. 일반적으로 감시 레이더의 탐지 반경은 PRI의 크기에 비례하기 때문에 펄스 레이더의 PRI는 펄스폭보다 충분히 길게 설정된다¹¹⁾. 그림 2는 PRI를 이용한 TDOA 획득 방법이 나타나 있다. 본 논문에서 레이더의 PRI 값은 일정하다고 가정한다. UAV의 지점 m 에서의 대표 펄스 도착시간 t_m 으로부터 지점 n 의 대표 펄스의 도착시간 t_n 까지의 시간 중에 존재할 수 있는 PRI의 횟수를 K 로 정의하면, $\Delta T_{m,n}$ 을 (3)과 같이 구할 수 있다. 여기에서, K 는 $\Delta T_{m,n} < PRI$ 을 만족하는 최댓값으로 얻을 수 있다.

$$\Delta T_{m,n} = t_n - t_m - K \times PRI \quad (3)$$

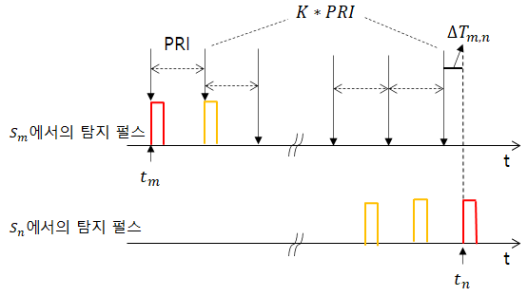


그림 2. PRI를 이용한 TDOA 획득
Fig. 2. Acquisition of TDOA using PRI

UAV는 원 운동하며 레이더에서 방출하는 펄스를 탐지한다. 레이더의 회전속도를 Ω ($^\circ/s$)로 가정하면 UAV는 임의의 위치에서 $360/\Omega$ 초마다 레이더의 빔 폭 내에 존재하는 다수의 PRI 펄스군을 탐지할 수 있다. 본 논문에서는 일정한 PRI를 가정하고 있으므로, 각 펄스가 지나갈 때마다 레이더는 $\delta = PRI \times \Omega$ 만큼 회전한다. 따라서 레이더의 펄스 빔폭을 ψ 로 정의하면, 한 번의 레이더 회전에서 탐지할 수 있는 펄스의 총 개수 N_p 는 다음과 같다.

$$N_p = \lfloor \psi / \delta \rfloor \quad (4)$$

그림 3에서는 UAV의 궤적과 대표 펄스 샘플링 방법을 나타내고 있다. 그림 3(a)는 UAV의 이동 궤적 위에 대표 펄스를 나타내고, 대표 펄스의 샘플링을 표현한 개념도이다. 그림 3(b)와 같이, 한 펄스군 내에서 도착하는 N_p 개의 펄스 중 가운데 펄스를 위치 추정을 위한 대표 펄스로 선택한다. 따라서 (5)와 같이, N_p 개의 펄스들 중 홀수의 경우는 중앙의 펄스를, 짝수의 경우 중앙에 가까운 왼쪽 펄스인 i 번째 펄스를 선택한다.

$$i = \begin{cases} \frac{N_p}{2} & (N_p = 2k, k \in \mathbb{N}) \\ \frac{N_p + 1}{2} & (N_p = 2k - 1, k \in \mathbb{N}) \end{cases} \quad (5)$$

그림 3(c)에서는 시간에 흐름에 따라 탐지된 펄스를 도식화하였고, TDOA 기법과 TDOA/AOA 기법에서 위치 추정에 사용할 펄스열의 샘플링 방법을 나타내었다. TDOA 및 TDOA/AOA 측위 기법은 기하학적 오차로 유발되는 DOP에 크게 영향을 받는다^[12-13]. 따라서 펄스 샘플링시에 DOP 의존성을 고려하여야

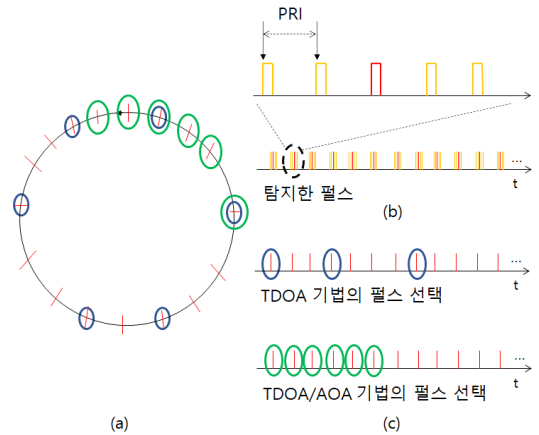


그림 3. UAV 궤적과 대표 펄스 샘플링; (a) UAV의 이동 궤적, (b) 펄스군과 대표 펄스 선택 예시, (c) 대표 펄스 샘플링 방법 예시
Fig. 3. UAV trajectory and representative pulse; (a) Model of UAV moving trajectory, (b) Example of pulse group and representative pulse selection, (c) Example of representative pulse sampling method

한다. 그림 3에서 보이는 것처럼 TDOA 기법을 사용한다면 DOP 의존성이 크기에 UAV는 최소 1회의 회전운동에서 얻은 펄스를 샘플링하는 것이 유리하다. 그러나 TDOA에 AOA를 결합하게 되면 DOP 한계점을 극복할 수 있기에 제안 기법은 레이더의 회전에 따라 얻어지는 대표 펄스를 연속적으로 선택할 수 있다.

AOA는 UAV에서 배열 안테나를 활용하여 3차원 좌표축에서 수신한 레이더 펄스의 도착 각도를 측정함으로써 얻어진다^[14]. 그림 4와 같이 선택한 펄스들의 위치 중 하나인 UAV의 위치 \mathcal{S}_m 에서 X, Y, Z 축에서의 각도 $\alpha_m, \beta_m, \gamma_m$ 는 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} \alpha_m &= \cos^{-1} \left(\frac{C(t_{m_0} - t_{m_x})}{\ell} \right) \\ \beta_m &= \cos^{-1} \left(\frac{C(t_{m_0} - t_{m_y})}{\ell} \right) \\ \gamma_m &= \cos^{-1} \left(\frac{C(t_{m_0} - t_{m_z})}{\ell} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

그림 4에서 보이듯, 각 축에서의 해당 각도는 (7)의 계산을 통해 방위각 ϕ , 고도 θ 의 형태로 사용한다.

$$\begin{bmatrix} \phi_m \\ \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{\cos \beta_m}{\cos \alpha_m} \\ \gamma_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

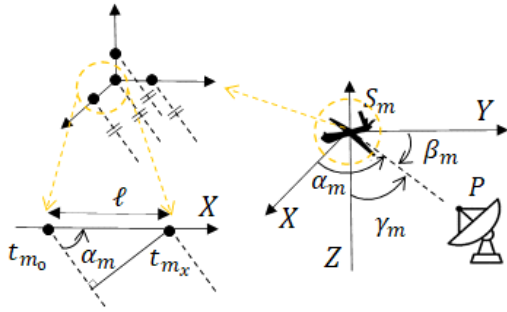


그림 4. AOA 측정 모델
Fig. 4. AOA measurement model

3.2 TDOA/AOA 기법

레이더 위치 P 와 UAV의 지점 S_m 사이의 거리 차이는 (8)과 같이 거리 r_m 과 방향 벡터 \mathbf{b}_m 의 곱으로 나타낼 수 있다. 여기에서 \mathbf{b}_m 은 (9)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{P} - \mathbf{S}_m = r_m \mathbf{b}_m \quad (8)$$

$$\mathbf{b}_m = [\sin\theta_m \cos\phi_m, \sin\theta_m \sin\phi_m, \cos\theta_m]^T \quad (9)$$

방향 벡터 \mathbf{b}_m 을 이용하여 (10)을 만족하는 행렬 \mathbf{G}_m 을 정의할 수 있다. 여기에서 \mathbf{G}_m 은 (11)과 같이 도착 각도 ϕ, θ 로 구성된다.

$$\mathbf{G}_m^T \mathbf{b}_m = 0, \mathbf{G}_m \mathbf{G}_m^T = \mathbf{I} \quad (10)$$

$$\mathbf{G}_m = \begin{bmatrix} \sin\phi_m & \cos\theta_m \cos\phi_m \\ -\cos\phi_m & \cos\theta_m \sin\phi_m \\ 0 & -\sin\theta_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

(10)에서 \mathbf{b}_m 을 (8)을 이용하여 대입하면 (12)로 나타낼 수 있으며, 다시 정리하면 (13)으로 표현된다.

$$\mathbf{G}_m^T (\mathbf{P} - \mathbf{S}_m) = 0 \quad (12)$$

$$\mathbf{G}_m^T \mathbf{P} = \mathbf{G}_m^T \mathbf{S}_m \quad (13)$$

동일한 방식으로 UAV의 n 지점에서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{G}_n^T \mathbf{P} = \mathbf{G}_n^T \mathbf{S}_n \quad (14)$$

m 지점과 n 지점에서의 식 (13)과 (14)를 더하면

(15)를 얻을 수 있다. (15)는 레이더 위치 P , UAV의 두 지점에서의 위치 벡터($\mathbf{S}_m, \mathbf{S}_n$)와 펄스 도착 각도 성분으로 구성된 행렬($\mathbf{G}_m, \mathbf{G}_n$)로 구성된다.

$$\mathbf{G}_m^T \mathbf{P} + \mathbf{G}_n^T \mathbf{P} = \mathbf{G}_m^T \mathbf{S}_m + \mathbf{G}_n^T \mathbf{S}_n \quad (15)$$

한편, 식 (9)에서 정의된 \mathbf{b}_m 과 \mathbf{b}_n 은 모두 단위 벡터이며 $\mathbf{b}_m - \mathbf{b}_n$ 과 $\mathbf{b}_m + \mathbf{b}_n$ 은 수직이다. 따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_m (\mathbf{b}_m - \mathbf{b}_n)^T (\mathbf{b}_m + \mathbf{b}_n) = 0 \quad (16)$$

식 (2)에서 r_m 은 $d_{m,n}$ 과 r_n 의 합으로 표현되고, (8)과 같이 $r_m \mathbf{b}_m$ 을 P 와 S_m 의 계산으로 나타내면 (17)로 정리할 수 있다. (17)을 좌변에 P 항을, 우변에 S 항을 포함하도록 다시 정리하면 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & (\mathbf{b}_m - \mathbf{b}_n)^T (r_m \mathbf{b}_m + r_n \mathbf{b}_n) \\ &= (\mathbf{b}_m - \mathbf{b}_n)^T (r_m \mathbf{b}_m + r_n \mathbf{b}_n + d_{m,n} \mathbf{b}_n) \\ &= (\mathbf{b}_m - \mathbf{b}_n)^T (2\mathbf{P} - \mathbf{S}_m - \mathbf{S}_n + d_{m,n} \mathbf{b}_n) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & (\mathbf{b}_m - \mathbf{b}_n)^T \mathbf{P} \\ &= (\mathbf{b}_m - \mathbf{b}_n)^T \left(\frac{1}{2} (\mathbf{S}_m + \mathbf{S}_n - d_{m,n} \mathbf{b}_n) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

따라서 (15)와 (18)을 활용하여 레이더 위치 \hat{P} 를 추정할 수 있다. (15)와 (18)을 연립하여 레이더의 추정 위치 \hat{P} 에 대해 정리하면 (19)와 같이 주어진다. 여기에서 $\hat{F}_{m,n}$, $\hat{D}_{m,n}$ 는 각각 (20), (21)로 정의된다.

$$\hat{F}_{m,n} \hat{P} = \hat{D}_{m,n} \quad (19)$$

$$\hat{F}_{m,n} = \begin{bmatrix} (\hat{\mathbf{b}}_m - \hat{\mathbf{b}}_n)^T \\ \hat{\mathbf{G}}_m^T + \hat{\mathbf{G}}_n^T \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\hat{D}_{m,n} = \begin{bmatrix} (\hat{\mathbf{b}}_m - \hat{\mathbf{b}}_n)^T \left(\frac{1}{2} (\mathbf{S}_m + \mathbf{S}_n - \hat{d}_{m,n} \hat{\mathbf{b}}_n) \right) \\ \hat{\mathbf{G}}_m^T \mathbf{S}_m + \hat{\mathbf{G}}_n^T \mathbf{S}_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

두 지점 m, n 에서의 방정식을 N 개의 지점에서 일반화하여 \hat{F} 와 \hat{D} 를 (22)와 같이 정의하면 이를 활용하여 (23)을 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{F}}_{2,1} \\ \hat{\mathbf{F}}_{3,1} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{F}}_{N,1} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{D}}_{2,1} \\ \hat{\mathbf{D}}_{3,1} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{D}}_{N,1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\hat{\mathbf{F}}\hat{\mathbf{P}} = \hat{\mathbf{D}} \quad (23)$$

$$\hat{\mathbf{P}} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \hat{\mathbf{D}} \quad (24)$$

마지막으로, (23)에서 $\hat{\mathbf{F}}$ 의 의사역행렬(pseudo inverse)을 구하여 LSM을 수행함으로써 (24)와 같이 레이더의 추정 위치 $\hat{\mathbf{P}}$ 를 얻게 된다.

IV. 성능 분석

본 장에서는 접근 불가능한 거리에 설치된 미상 레이더의 위치 파악을 위하여 단일 UAV 운용 환경에 적합하도록 제안하는 TDOA/AOA 기법의 성능평가를 위하여 시뮬레이션을 통해 기존 TDOA 기법⁶⁾과 비교 평가한다.

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 MATLAB을 활용하여 진행되었다. 시뮬레이션 환경은 그림 1의 시스템 모델을 기반으로 구성하였다. UAV의 좌표는 $[0, 0, h]$, 레이더의 좌표는 $[x_p, y_p, z_p]$ 이며, UAV의 회전 중심을 고정한 상태로 레이더의 위치를 변화시켰다. 시뮬레이션에 사용된

표 1. 레이더 파라미터
Table 1. Radar parameter

Radar parameter	Values
PRI	1000 μ s
Azimuth Beam Width	3.3°
azimuth rotation rate	36°/s
radar position	[300km, 300km, 0km]

표 2. UAV 운용 파라미터
Table 2. UAV operation parameter

UAV parameter	Values
speed	50 m/s, 100m/s
altitude (h)	15 km
rotation radius (r)	1 - 12 km
Time error variance	10×10^{-8} s
Angle error variance	0.05°

레이더의 파라미터는 표 1과 같다. 시뮬레이션에 요구되는 UAV의 회전 고도, 반경 등 UAV 운용 파라미터는 표 2와 같다. UAV는 완벽한 원운동을 하며, UAV의 위치는 오차가 없고, UAV와 레이더간 전파 경로는 LOS (Line of Sight)로 가정한다. 분석 결과는 100,000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 시행하여 평균하였다. 또한 펄스 수신 시각 및 도착 각도의 오차는 각각 분산 σ^2 을 갖는 백색잡음으로 가정하였다.

4.2. 시뮬레이션 결과 분석

그림 5는 UAV 운용 시간 증가에 따른 TDOA 기법과 제안하는 TDOA/AOA 기법의 레이더 위치 추정 오차를 Root Mean Square Error(RMSE)로 평가한 결과이다. 본 시뮬레이션에서는 UAV에서 수신한 펄스군에서 대표 펄스를 선택하여 모두 사용하였다.

레이더와의 거리는 약 420km에서 UAV의 고도는 15km, 회전 반경은 7km인 상태로 속도는 100m/s와 50m/s로 설정하였다. TDOA 기법은 UAV가 1회전을 마칠 때까지 지속적으로 RMSE 성능이 좋아짐을 확인하였다. 이에 비해 TDOA/AOA 기법은 1/3 바퀴 정도만 UAV가 이동하여도 충분한 정확도를 획득할 수 있었다. 또한 동일 궤적을 그리며 수집하는 신호 포인트의 위치와 시각 차이만 존재하기 때문에, 결국 일정 시간이 지난 후 UAV가 충분한 원 궤적을 그리며 이동하였을 때 TDOA와 TDOA/AOA 기법 모두 속도가 다른 두 경우의 RMSE 값은 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

그림 6은 UAV의 회전 반경과 사용한 대표 펄스의 수를 변화시켜 TDOA 기법과 TDOA/AOA 기법의 성능을 RMSE로 비교 평가한 결과이다. 레이더의 파라미터는 표 1과 같으며, UAV의 회전 반경을 1~12km

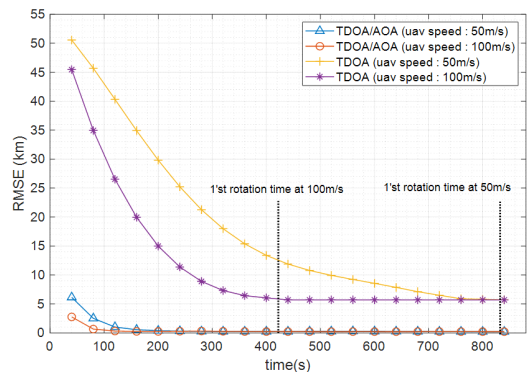


그림 5. UAV의 속도와 시간의 진행에 따른 RMSE
Fig. 5. RMSE according to the change of speed and time of UAV

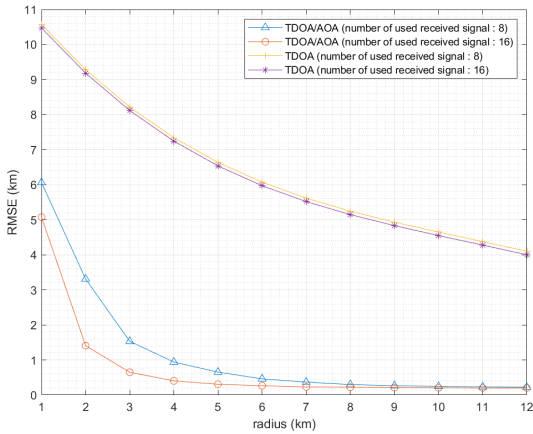


그림 6. 회전 반경 변화와 사용한 신호의 수에 따른 RMSE
Fig. 6. RMSE according to the change of radius and the number of used signal

로 사용하였다. UAV의 운용 속도는 50m/s로 고정하였으 며, 이 외 UAV 파라미터는 표 2와 같다. 운용 시 간에 대한 변수들을 고정하기 위해, 해당 시뮬레이션 에서는 대표 펄스의 수를 8과 16으로 고정된 상황 에서 UAV 노드를 DOP를 위해 원 궤적에 고르게 분포 시켰다. 그림에서 기존 TDOA 기법 대비 TDOA/AOA 기법의 RMSE가 전 반경 구간에서 좋아 짐을 확인하였다. 특히, 회전 반경이 커질수록 RMSE 가 좋아지는 기존 기법과 다르게, 적절한 반경을 보장 하면 이후로는 반경을 늘리지 않아도 RMSE 성능이 충분히 나옴을 확인하였다. TDOA 기법에서는 사용 펄스의 수 증가가 성능에 영향을 거의 미치지 않았으 나, TDOA/AOA 기법의 경우에는 각 지점의 각도 정보 가 추가되어 RMSE 성능이 좋아지는 결과가 나타 났다.

그림 7에서는 UAV의 회전 반경 변화와 레이더의 위치 변화에 따른 TDOA 기법과 TDOA/AOA 기법의 성능을 RMSE로 비교한 결과이다. 그림 5, 그림 6의 시뮬레이션에서는 레이더의 위치를 [300, 300, 0]에, UAV의 회전축을 [0, 0, h]에 고정하여 시뮬레이션을 진행하였으나, 본 시뮬레이션에서는 레이더의 위치를 변화시키며 RMSE 성능의 차이를 비교하였다. 레이더 위치 외에 UAV의 속도는 50m/s, 고도는 15km로 설정 하였으며, 나머지 레이더와 UAV의 파라미터는 표 1, 2와 같다. UAV의 회전 반경 변화를 기준으로, 레이더의 위치를 [300, 300, 0]와 [200, 200, 0]의 두 가지 상황에 놓아 실험하였다. 그림 7에서 보듯, TDOA와 AOA를 결합한 제안 기법이 항상 우수한 성능을 보였으며, UAV와 레이더의 거리가 가까운 경우

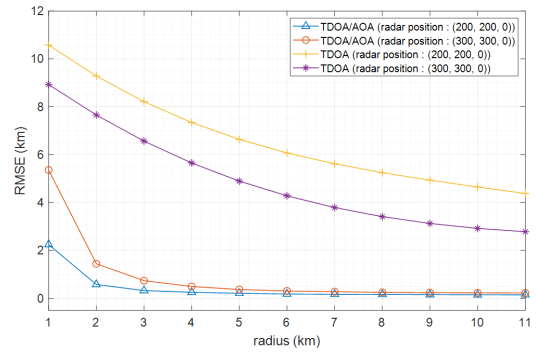


그림 7. 레이더의 위치와 회전 반경 변화에 따른 RMSE
Fig. 7. RMSE according to the change of radius and position of radar

더 높은 정확도를 가졌다. 특히, TDOA 기법의 경우 DOP 의존성에 의해 레이더와의 거리 차이가 회전 반 경 변화와 무관하게 정확도에 영향을 미쳤다. 그러나, 제안 기법은 회전 반경이 보장되면 레이더와의 거리 차이가 정확도에 큰 영향을 주지 않아 DOP 문제를 해결하였음을 확인하였다.

그림 8은 시뮬레이션을 위하여 가산한 잡음의 오차 분산의 변화에 따른 RMSE 성능평가이다. UAV의 속 도는 50m/s, 회전 반경은 5km, 고도는 15km를 사용 하였으며, 이 외의 파라미터는 표 1, 2와 동일하다. 본 시뮬레이션에서는 각도 오차 분산(σ_a^2)을 0.01° 부터 0.05° 까지 변화시키며 RMSE를 평가하였으며, 시간 오차 분산(σ_t^2)을 10^{-7} , 5×10^{-7} , 10^{-6} 의 3가지의 경 우로 테스트하였다. 가산되는 백색잡음의 정도에 따라 RMSE 성능이 달라지며, 시간과 각도 잡음이 성능에 영향을 미침을 확인하였다.

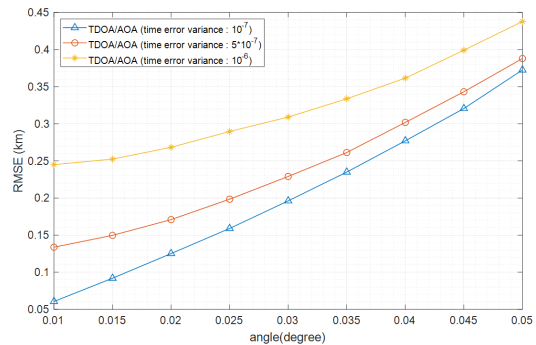


그림 8. 수신신호의 시간 및 각도 오차의 변화에 따른 RMSE
Fig. 8. RMSE according to the change of time and angle error of received signal

V. 결 론

본 논문에서는 하나의 UAV만을 사용하여, 감시 레이더의 위치를 추정하는 기법을 연구하였다. 기존 TDOA 기법은 TDOA의 특성인 DOP 문제를 해결하기 위해 원 궤적을 그리면서 접근한다. 따라서 이 방법은 레이더에 가깝게 접근해야 하는데 그 과정에서 탐지당할 위험성이 크고 또한 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 TDOA/AOA의 결합기법을 제안하였다. UAV가 감시 레이더의 펄스 신호를 탐지하고, 레이더의 회전주기와 PRI 정보를 통해 TDOA와 AOA 연산을 수행한 후 LSM을 이용해 레이더의 위치를 추정하는 방법이다. TDOA/AOA 결합기법은 TDOA 기법과 비교할 때 DOP에 제한받지 않고 짧은 시간에 훨씬 정확한 위치 정보를 획득할 수 있음을 시뮬레이션 검증을 통해서 평가하였다. 또한 제안 기법은 적진 깊이 위치한 미상 레이더에 가깝게 접근할 필요가 없는 장점이 있다. 하지만 AOA 방식에 요구되는 배열 안테나가 추가로 필요하므로 약간의 비용 부담이 있으나, 하나의 UAV를 운용하므로 큰 부담은 아닐 것이다.

References

- [1] S. Kemkemian, M. Nouvel-Fiani, and E. Chamouard, "Radar and electronic warfare cooperation: How to improve the system efficiency," *IEEE Radar Conf.*, pp. 773-778, May 2010. (<https://doi.org/10.1109/RADAR.2010.5494518>)
- [2] E. Tzoreff, B. Z. Bobrovsky, and A. J. Weiss, "Single receiver emitter geolocation based on signal periodicity with oscillator instability," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 62, no. 6, pp. 1377-1385, Mar. 2014. (<https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2298831>)
- [3] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Positioning using time-difference of arrival measurements," *ICASSP '03*, vol. 6, pp. VI-553-6, 2003. (<https://doi.org/10.1109/ICASSP.2003.1201741>)
- [4] R. Peng and M. L. Sichertiu, "Angle of arrival localization for wireless sensor networks," *IEEE SECON*, pp. 374-382, 2006. (<https://doi.org/10.1109/SAHCN.2006.288442>)
- [5] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses, and N. S. Correal, "Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks," *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 54-69, Jul. 2005. (<https://doi.org/10.1109/MSP.2005.1458287>)
- [6] H. Lee, J. Park, and J. Lim, "Estimation of surveillance radar location based on TDOA using a single UAV," *J. KICS*, vol. 46, no. 7, pp. 1120-1130, 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.7.1120>)
- [7] U. S. Department of Transportation, FAA, "Aeronautical information manual : Official guide to basic flight information and atc procedures," Washington, D.C., Federal Aviation Administration, pp. 231-232, Oct. 2017.
- [8] S. B. Rasool and M. R. Bell, "Efficient pulse-Doppler processing and ambiguity functions of nonuniform coherent pulse trains," *IEEE Radar Conf.*, pp. 1150-1155, May 2010. (<https://doi.org/10.1109/RADAR.2010.5494448>)
- [9] B. Hao, J. Zhu, Z. Li, S. Xiao, and L. Tong, "Passive radar source localization based on PSAAA using single small size aircraft," *IEEE GC Wkshps.*, pp. 1-6, 2015. (<https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2015.7413956>)
- [10] B. Friedlander, "A passive localization algorithm and its accuracy analysis," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 234-245, Jan. 1987. (<https://doi.org/10.1109/JOE.1987.1145216>)
- [11] J. Kim, S. Choi, and J. Lim, "Optimal receiving node selection algorithm for improving TDOA-based location estimation accuracy in swarm drone operation environments," *ICEIC*, Feb. 2022. (<https://doi.org/10.1109/ICEIC54506.2022.9748558>)
- [12] F. Zhang, H. Li, Y. Ding, S. H. Yang, and L. Yang, "Dilution of precision for time

difference of arrival with station deployment,” *IET Sign. Process*, pp. 1-12, 2021. (<https://doi.org/10.1049/sil2.12036>)

- [13] B. Li, K. Zhao, and X. Shen, “Dilution of precision in positioning systems using both angle of arrival and time of arrival measurements,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 192506-192516, 2020. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033281>)
- [14] R. Peng and M. L. Sichitiu, “Angle of arrival localization for wireless sensor networks,” *3rd Annu. IEEE Commun. Soc. Sensor and Ad Hoc Commun. and Netw.*, pp. 374-382, 2006. (<https://doi.org/10.1109/SAHCN.2006.288442>)

백 호 기 (Hoki Baek)



2006년 2월 : 아주대학교 정보 컴퓨터공학 학사
 2008년 2월 : 아주대학교 정보 통신공학 석사
 2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 박사
 2014년 3월~2015년 2월 : 아주대학교 장위국방연구소 전임연구원
 2015년 3월~2021년 2월 : 아주대학교 국방디지털융합학과 강의를 교수
 2021년 3월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 조교수
 <관심분야> 5G/6G, UAV 네트워크, V2X 통신, IoT, 국방전술네트워크, 시간동기, 위치인식
 [ORCID:0000-0001-9213-7845]

정 우 성 (Wooseong Jeong)



2022년 2월 : 아주대학교 국방 디지털융합학과 학사
 2022년 6월~현재 : 공군 소위
 <관심분야> UAV 통신네트워크, 위치인식, 무선네트워크
 [ORCID:0000-0002-7081-9148]

구 자 열 (Jayeul Koo)



1984년 3월 : 공군사관학교 전자공학과 학사
 1993년 12월 : 국방대학교 전산학 석사
 2013년 8월 : 아주대학교 NCW 공학 박사
 2015년 3월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과 교수
 <관심분야> 통신공학, 항공전자, 시스템공학

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자공학 학사
 1985년 2월 : KAIST 영상통신 석사
 1994년 8월 : KAIST 디지털통신 박사
 1995년 9월~1998년 2월 : SK 텔레콤 중앙연구원 책임연구원
 1998년 3월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과 정교수
 2006년 8월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연구센터장
 <관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방전술통신
 [ORCID:0000-0003-0080-9398]