

지구 곡률을 고려한 AOA 기반 3차원 위치 탐지 성능 분석

김 호 재*, 권 순 영*, 류 지 연**, 박 지 훈**, 강 지 연**, 김 형 남^o

Analysis of 3D Localization Performance Considering Earth's Curvature Based on AOA

Ho Jae Kim*, Soon-Young Kwon*, Ji Yeon Ryu**,
Ji-Hun Park**, Jee Yeon Kang**, Hyoung-Nam Kim^o

요 약

본 논문은 3차원 공간에서 개체의 위치를 탐지하는 알고리즘을 소개하고 모의실험을 통한 성능 분석을 진행한다. 개체의 위치 탐지는 민간 분야 및 군사적 임무 수행을 위해서 매우 중요한 연구 분야이다. 첨단 과학기술의 발전에 따라 현대전에서는 전자파를 활용하는 전자전이 점차 중요해지고 있으며, 특히 적의 위치 탐지 정보를 활용하여 아군의 작전 수행 및 대응을 위한 전략 수립을 하고 있다. 다양한 위치 탐지 알고리즘 중 도착 각도(angle of arrival, AOA)를 이용한 알고리즘은 단일 수신기를 이동시키며 수집한 도착 각도를 이용하여 적군의 위치를 탐지할 수 있다. 일반적으로 AOA를 사용할 경우 항공기를 이용하여 다수의 위치에서 신호를 수집하며, 이는 LOS(line of sight) 확보가 용이하여 많이 사용되고 있다. 3차원 위치 탐지 알고리즘은 방위각과 고도각 정보를 결합하여 사용함으로써, 단순히 2차원 평면에서의 위치 탐지를 넘어 고도 정보까지 획득할 수 있다. 군사 환경에서는 수백 km에 있는 위협 물체를 탐지하기 위해서 지구 곡률이 고려된 알고리즘 설계가 필요하다. 이에 본 논문에서는 기존 2차원 위치 탐지 알고리즘을 응용하여 기중치 기반 위도, 경도 추정 알고리즘을 제안하고, 이를 기반으로 3차원 고도 탐지 알고리즘을 제안한다.

키워드 : 위치 탐지, 신호 방향선, 도착 각도

Key Words : Localization, Line of bearing (LOB), Angle of arrival (AOA)

ABSTRACT

This paper introduces an algorithm for detecting the location of objects in three-dimensional space and conducts a performance analysis through simulation. The detection of an object's location is a very important research field for civilian applications and military mission execution. With the advancement of modern science and technology, contemporary warfare is progressing in the aspect of electronic warfare (EW), utilizing electromagnetic waves, where detecting the enemy's location is utilized for strategizing our forces' operations and responses. Among various location detection algorithms, the algorithm using the angle of arrival (AOA)

* 이 논문은 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 KAI, LIG넥스원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021T035016, 2021T035016-LIGNEX1)

• First Author : Department of Electrical and Electronics Engineering, Pusan National University, kkhjj007@pusan.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : School of Electrical and Electronics Engineering, Pusan National University, hnkim@pusan.ac.kr, 중신회원

* Department of Electrical and Electronics Engineering, Pusan National University, ysk1680@pusan.ac.kr, 학생회원

** LIG Nex1, jiyeon.ryu@lignex1.com, jihun.park@lignex1.com, jeeyeon.kang@lignex1.com

논문번호 : 202404-075-D-RN, Received April 25, 2024; Revised June 5, 2024; Accepted June 19, 2024

allows for the detection of the enemy's location by moving a single receiver and collecting arrival angles. Typically, when using AOA, aircraft are used to collect signals from multiple locations, which is widely used due to the ease of securing line of sight. The three-dimensional location detection algorithm, by combining azimuth and elevation angle information, goes beyond simply estimating location on a two-dimensional plane to acquiring altitude information as well. In a military environment, designing an algorithm that considers the curvature of the Earth is necessary for detecting threat objects hundreds of kilometers away. Therefore, this paper proposes a weighted latitude and longitude estimation algorithm by applying the existing two-dimensional location estimation algorithm, and then based on this algorithm, proposes a three-dimensional altitude detection algorithm.

1. 서 론

개체의 위치 탐지는 민간 분야 및 군사적 임무 수행을 위해서 매우 중요한 연구 분야이다. 무선 주파수(radio frequency, RF) 태그가 붙은 야생 동물 추적, GPS(global positioning system) 등 민간 분야와 더불어 적의 RF 신호를 수집, 분석 및 식별을 통하여 적의 활동을 감시하고 위협 무기체계에 대한 정보를 획득하여 군사적 임무를 수행할 수 있다^{1,2)}.

첨단 과학기술의 발전에 따라 현대전에서는 전자파를 이용한 전자전(electronic warfare, EW) 이 역할이 점차 중요해지고 있다. 전자전이란 공간상에 전파되는 전자파의 각종 군사적 응용을 통칭하는 기술로, 전자공격(electronic attack, EA), 전자보호(electronic protect, EP) 그리고 전자전 지원(electronic warfare support, ES)으로 구분된다³⁾. 이 중 전자전 지원 활동은 신호정보수집(signal intelligence, SIGINT)이 주된 활동이며 적의 통신 및 비통신 장비로부터 의도적 혹은 비의도적으로 방사되는 각종 전자파를 탐색 및 감청하여 식별하고, 방사 위치를 추정하기 위해 수행되는 활동을 의미한다⁴⁾. 이러한 전자전 환경에서 적군의 배치 또는 행동 상태를 경계하는 적의 위협 물체(레이더, 통신장비, 미사일 등) 탐지 시스템도 중요한 기술 중 하나로 분류된다. 특히, 방향탐지(direction finding, DF) 기술은 적의 위협 물체의 방향 및 위치 탐지를 수행하는 전자전 지원 활동의 핵심 기술이다⁵⁾. 방향탐지 방식은 크게 능동형과 수동형으로 나뉘며, 능동형 방향탐지 방식은 레이더와 유사하게 신호를 송신한 후 목표물에서 반사되는 신호를 수신하여 방향을 탐지하는 방식이다. 반면, 수동형 방향탐지 방식은 목표물이 방출하는 위협을 수신하여 방향을 탐지하는 방식으로, 전파의 송신 과정이 없는 특성 때문에 적에게 탐지되지 않는 장점이 있다⁶⁾. 위치 탐지에서는 아군의 전자공격 및 전자보호를 위해 정교한 위치정보 획득이 요구되며, 이를 위해서는 위치추정

오차를 최소화하는 알고리즘에 관한 연구가 필요하다.

수동형 방향탐지 알고리즘은 시간, 각도, 위상, 주파수 및 진폭과 같은 정보를 이용하여 위치 탐지를 수행한다. 일반적인 기법으로는 도착 시간(time of arrival, TOA), 도착 시간 차(time difference of arrival, TDOA), 도착 각도(angle of arrival, AOA), 도착 위상차(phase difference of arrival, PDOA), 도착 주파수차(frequency of arrival, FDOA), 수신 신호 세기 차(received signal strength, RSS) 등이 있다⁷⁻¹¹⁾. TOA, TDOA, AOA, PDOA의 경우 개체 및 수신단의 이동 여부와 상관없이 위치 탐지가 가능하나, FDOA를 이용한 위치 탐지는 주파수 차이를 측정해야 하므로 수신기와 개체 간의 상대적인 움직임이 필요하다.

위치 탐지에 주로 사용되는 TDOA 및 FDOA를 이용한 위치 탐지는 다수의 수신기를 이용하여 각 수신기에 도달한 시간, 주파수 및 위상 차이를 이용한다. FDOA의 경우 정확한 주파수 측정이 필요하므로 FDOA를 이용한 위치 탐지 시스템은 잘 사용되지 않지만, TDOA 위치 탐지 알고리즘에 필요한 수신기의 수를 줄이기 위해 TDOA와 FDOA를 동시에 사용할 수 있다. 반면, AOA의 경우 수신된 신호의 도착 각도 방향으로 신호방향선(line of bearing, LOB)을 이용하여 적의 위치를 탐지하며, 단일 수신기를 이동시키며 수집한 도착 각도를 이용하여 적의 위치를 탐지할 수 있다¹²⁾.

전자전뿐만 아니라 다양한 위치 탐지 알고리즘 연구에서는 일반적으로 3개 이상의 수신기를 이용하여 위치 탐지를 수행한다^{13,14)}. 특히, 현대의 전자전은 수시로 급변하는 환경에 따라¹⁵⁾ 적군의 빠른 탐지뿐만 아니라 정밀한 탐지도 매우 중요하므로 다양한 위치 탐지 기법에 대한 연구가 필요하다. AOA를 이용한 탐지의 경우 단일 수신기(항공기 등)를 이용할 수 있어 다수의 수신기가 필요없이 위치 탐지가 가능한 장점이 있다^{2,13,16)}.

AOA를 이용한 기존의 연구를 살펴보면 다수의 수신 위치에서 획득한 LOB를 이용하여 삼각측량법을 이

용하면 표적의 위치 탐지가 가능하다^[12]. 그러나 삼각측량법은 지구 곡률을 고려하지 않은 LOB를 사용하므로 좌표계 변환 과정에서 왜곡 문제 때문에 위치 탐지 오차가 발생한다. 이를 해결하기 위해 비선형 최소제곱법(non-least square, NLS)을 이용하여 지구 곡률이 반영된 위치 탐지 연구가 진행되었다^[16].

정밀한 위치 탐지를 위해 3차원 위치 탐지에 대한 연구도 진행되고 있다. 고도 추정의 중요성이 대두되면서, 다양한 방향탐지 기법을 융합한 TDOA-AOA, RSS-AOA 등에 대한 연구가 많이 진행되고 있다^[17-20]. 그러나 AOA를 단독으로 이용하여 위치 탐지를 진행하는 연구는 활발히 진행되고 있지 않다. 앞서 언급한 바와 같이 전자전에서는 다양한 위치 탐지 기법에 대한 연구가 필요하므로 본 논문에서는 AOA만을 이용한 3차원 위치 탐지 기법에 대한 연구를 진행하였다.

기존 연구에서 AOA를 통한 3차원 위치 탐지는 방위각(azimuth)과 고도각(elevation)을 수집하여 신호방향선의 교점을 이용하여 신호원의 위치 탐지가 가능하다^[2]. 그러나 기존 연구에서 방위각을 이용한 위도와 경도의 위치 탐지는 지구 곡률을 고려하지 않은 채로 진행되었으므로 왜곡 때문에 정확한 위치 탐지를 할 수 없다.

이에 본 논문에서는 지구 곡률이 반영된 LOB를 고려하여 가중치 기반으로 위도 및 경도를 탐지하는 2차원 알고리즘을 확장하여 3차원 위치 탐지 방식을 제안한다. 기존 2차원에서 진행된 지구 곡률이 반영된 NLS 기법은 두 개의 LOB를 이용하여 초기 위도, 경도를 계산하고 이를 기반으로 초기 위치의 도착 각도를 계산하여 측정된 도착 각도와의 차이를 개선한다. 이후 Jacobian 행렬을 이용하여 도착 각도를 보정하는 알고리즘을 사용하며, 이는 획득한 LOB 수 및 보정 반복 횟수에 따라 연산량이 증가하는 단점이 발생한다. 본 논문에서는 획득한 모든 LOB를 이용하여 두 개의

LOB로 계산할 수 있는 모든 위도, 경도를 획득한 후, 두 LOB의 직교성에 따라 가중치를 부여하여 2차원 위치 탐지 결과를 도출하는 가중치 기법을 제안한다. 이후 획득한 위도, 경도와 고도각을 이용하여 신호원의 고도를 계산하여 최종적으로 신호원의 3차원 위치 탐지를 수행한다. 이를 통해 기존의 지구 곡률이 반영된 2차원 위치 탐지 보다 추정 성능이 개선된 것을 확인할 수 있으며, 도착 각도 차이를 매번 계산하지 않아도 되는 장점이 있다. 또한, AOA만으로 3차원 위치 탐지가 가능하다는 장점이 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 지구 곡률을 고려한 2차원 위치 탐지 알고리즘을 소개한다. 3장에서는 2장에서 획득한 위도, 경도 정보와 고도각을 이용하여 신호원의 고도를 추정하는 알고리즘을 소개한다. 이후 4장에서는 모의실험을 통하여, 제안하는 알고리즘의 성능을 분석하며, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 지구 곡률이 반영된 가중치 기반 2차원 위치 탐지 기술

지구 곡률이 반영된 LOB의 경우 그림 1과 같이 LOB가 곡선 형태로 나타난다^[16]. 그림 1과 같이 i 번째 항공기 위치의 위도를 ϕ_i , 경도를 λ_i , 도착 각도를 θ_i 라고 하면 다음 단계를 통해 개체의 위도, 경도를 추정할 수 있다.

개체의 위치와 각 항공기 사이의 최단 거리는 지구 대원(great circle) 상에 존재하므로 그림 2와 같이 두 개의 대원의 교점을 이용하여 개체의 위치 탐지가 가능하다^[16]. 각 대원을 포함하는 평면을 벡터 연산으로 계산하고, 두 평면이 만나는 직선 중 지면에 해당하는 점을 구하여 개체의 위도, 경도를 추정할 수 있다. 위·경도 좌표계에서 항공기 a 의 위치는 식 (1)과 같이 3차원

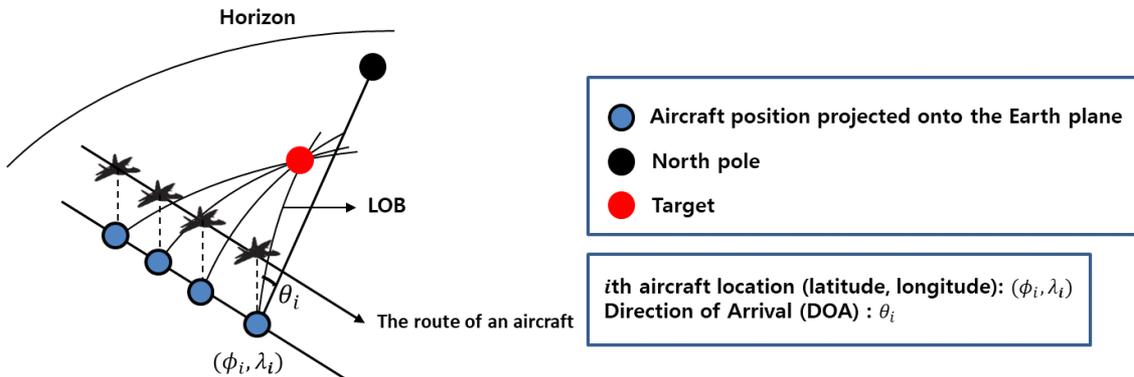


그림 1. 곡면 LOB를 이용한 위치 탐지 기법 개요
Fig. 1. Overview of localization techniques using curved LOBs.



그림 2. 지구 대원의 교점
Fig. 2. Intersection of the Earth's great circle.

직교 좌표계에서 지구 중심을 기준으로 하는 방향 벡터 \mathbf{v}_a 로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_a &= (v_{a,x}, v_{a,y}, v_{a,z}) \\ &= (\cos(\phi_a) \cos(\lambda_a), \cos(\phi_a) \sin(\lambda_a), \sin(\phi_a)). \end{aligned} \quad (1)$$

항공기 위치, 지구 중심 및 북극이 포함되는 평면을 나타내는 벡터 \mathbf{V}_{G_a} 는 지구 중심에서 북극 방향을 나타내는 방향 벡터 $\mathbf{v}_N = (0, 0, 1)$ 과 \mathbf{v}_a 의 벡터 외적으로 표현되며, 이는 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{V}_{G_a} = \mathbf{v}_N \times \mathbf{v}_a, \quad (2)$$

개체의 위치와 항공기 a 의 위치를 포함하는 대원의 평면을 나타내는 방향벡터 \mathbf{V}_{T_a} 는 \mathbf{V}_{G_a} 를 \mathbf{v}_a 축으로 θ_a 만큼 회전한 벡터와 같다. 이는 로드리게스 회전 공식으로 계산 가능하며^[21], 식 (3)을 이용하여 \mathbf{V}_{T_a} 를 획득할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{T_a} &= \mathbf{V}_{G_a} \cos(\theta_a) + (\mathbf{v}_a \times \mathbf{V}_{G_a}) \sin(\theta_a) \\ &\quad + \mathbf{v}_a (\mathbf{v}_a \cdot \mathbf{V}_{G_a}) (1 - \cos(\theta_a)). \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \cdot 연산은 벡터의 내적을 나타낸다. 마찬가지로 항공기 b 위치에 대하여 동일한 과정을 반복하여 개체의 위치와 항공기 b 의 위치를 포함하는 대원의 평면을 나타내는 방향벡터 \mathbf{V}_{T_b} 를 계산할 수 있다.

두 대원이 만나는 평면의 직선 벡터 $\mathbf{V}_{T(a,b)}$ 는 두 대원의 평면벡터 $\mathbf{V}_{T_a}, \mathbf{V}_{T_b}$ 의 외적을 이용하여 구할 수 있으며, 이는 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{V}_{T(a,b)} = \frac{\mathbf{V}_{T_a} \times \mathbf{V}_{T_b}}{\|\mathbf{V}_{T_a} \times \mathbf{V}_{T_b}\|}. \quad (4)$$

그러나 두 대원의 평면이 이루는 각에 따라 벡터 $\mathbf{V}_{T(a,b)}$ 의 방향이 지구중심을 기준으로 2가지가 발생할 수 있고, 이러한 모호성은 두 신호의 도착 각도 θ_a, θ_b 의 차이를 이용하여 해결할 수 있으며, 이는 식 (5)와 같다.

$$\mathbf{V}_{T(a,b)} = \begin{cases} \mathbf{v}_T, & \text{if } (\theta_a < \theta_b) \text{ or } (\theta_a - \theta_b > 180). \\ -\mathbf{v}_T, & \text{else.} \end{cases} \quad (5)$$

최종적으로 벡터 $\mathbf{V}_{T(a,b)} = (v_{T(a,b),x}, v_{T(a,b),y}, v_{T(a,b),z})$ 를 이용하여 항공기 a, b 위치에서 획득한 LOB를 이용하여 개체의 위도, 경도 ($\phi_{T(a,b)}, \lambda_{T(a,b)}$)를 결정할 수 있고, 이는 식 (6)을 통하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{T(a,b)} &= \tan^{-1} \left(\frac{v_{T(a,b),z}}{\sqrt{v_{T(a,b),x}^2 + v_{T(a,b),y}^2}} \right), \\ \lambda_{T(a,b)} &= \tan^{-1} \left(\frac{v_{T(a,b),y}}{v_{T(a,b),x}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

N 개의 위치에서 신호를 측정할 때 계산 가능한 위도, 경도의 위치는 $(N-1)C_2$ 개를 획득할 수 있다. 이때 획득한 위도, 경도 값은 측정된 두 도착 각도가 직교할수록 정확도가 높아진다. 이를 이용하여 앞서 추정된 $(N-1)C_2$ 개의 위도, 경도 ($\phi_{T(a,b)}, \lambda_{T(a,b)}$) 탐지 결과에 가중치를 곱하여 직각에 가까울수록 높은 가중치를 설정하여 개체의 위도, 경도를 계산한다. 가중치는 90° 를 기준으로 예각의 교차 각을 사용하며, 다음 식과 같이 나타낸다.

$$w_{(a,b)} = \begin{cases} \frac{|\theta_a - \theta_b|}{90}, & (|\theta_a - \theta_b| < 90). \\ \frac{180 - |\theta_a - \theta_b|}{90}, & \text{else.} \end{cases} \quad (7)$$

이후 수집한 위도, 경도 결과에 가중치를 곱하여 최종적인 탐지 결과를 도출하며, 최종적으로 추정된 위치 (ϕ_T, λ_T)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_T &= \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N w_{(i,j)} \phi_{T(a,b)}}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N w_{(i,j)}}, \\ \lambda_T &= \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N w_{(i,j)} \lambda_{T(a,b)}}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N w_{(i,j)}}. \end{aligned} \quad (8)$$

III. 3차원 위치 탐지를 위한 고도 추정 기술

3차원 위치 탐지 알고리즘은 2차원 위치 탐지 알고리즘과 달리 고도 정보가 필요하므로, 2차원에서 사용되는 도착 각도인 방위각 정보와 함께 고도각 정보를 추가 활용하여 위협의 위치를 추정한다. 3차원 위치추정은 크게 두 단계로 나누어 진행되며, 먼저 그림 3과 같이 방위각을 이용하여 위도 및 경도를 추정한 후, 추정된 위도, 경도 정보와 고도각을 함께 이용하여 그림 4와 같이 고도를 추정한다²⁾.

방위각을 이용한 위도, 경도 추정은 2장에서 제시된 위도, 경도 추정 알고리즘을 사용하여 추정한다. 이후 추정 결과인 $\hat{\phi}_T, \hat{\lambda}_T$ 정보와 i 번째 측정된 고도각 φ_i 를 이용하여 고도를 추정할 수 있다. 우선 고도각 φ_i 를 이용하여 식 (9)와 같이 고도각의 기울기를 표기할 수 있다.

$$\tan \varphi_i = \frac{z_e - z_i}{\sqrt{(\phi_e - \phi_i)^2 + (\lambda_e - \lambda_i)^2}} \quad (9)$$

여기서 ϕ_i, λ_i, z_i 는 i 번째 항공기의 위치, ϕ_e, λ_e, z_e 는 개체의 위치를 나타낸다. 위도와 경도의 추정 결과인 $\hat{\phi}_T, \hat{\lambda}_T$ 정보와, 이미 알고 있는 i 번째 수신기의 z 축

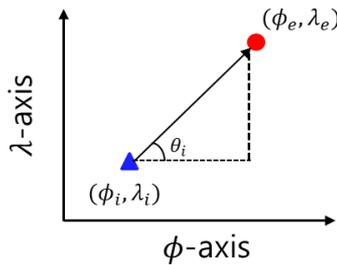


그림 3. 위도, 경도의 기하학 구조 (방위각)
Fig. 3. Geometry of latitude and longitude (azimuth angle).

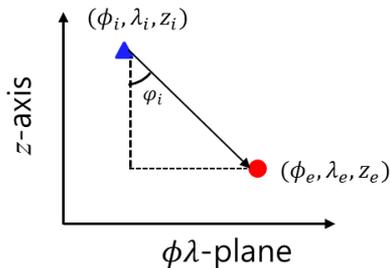


그림 4. 위경도 평면과 고도의 기하학 구조 (고도각)
Fig. 4. Geometry of latitude and longitude plane and altitude (elevation angle).

정보 z_i 및 측정 고도각 φ_i 를 이용하면, 식 (9)를 다음 식 (10)과 같이 변형할 수 있다.

$$\hat{z}_T = \sum_{i=1}^N \frac{\left(z_i + \tan \varphi_i \sqrt{(\hat{\phi}_T - \phi_i)^2 + (\hat{\lambda}_T - \lambda_i)^2} \right)}{N} \quad (10)$$

N 개의 위치에서 신호를 측정하였으므로, 각 항공기 위치에서 추정된 z_T 값을 평균하여 최종적인 위협의 고도 \hat{z}_T 를 추정할 수 있다.

IV. 모의실험을 통한 위치 탐지 성능 분석

본 장에서는 위치 탐지 알고리즘을 이용하여 탐지 성능 분석을 진행한다. 모의실험에 사용한 항공기 배치 및 개체의 위치는 표 1에 나타내었다. 획득한 도착 각도의 오차는 0.2° 로 설정하였으며, 지구는 완벽한 구형으로 가정하였다.

그림 5는 NLS를 사용하여 추정된 위도, 경도 위치 탐지 결과를 나타내었으며, 그림 6은 본 논문에서 제안한 알고리즘을 사용하여 추정된 위치 탐지 결과를 나타

표 1. 모의 실험에 사용된 개체 및 항공기 위치
Table 1. Object and aircraft locations used in simulations.

Locations of aircraft (ϕ_i, λ_i)	(36, 128.1, 12)
	(36.5, 128.2, 12)
	(37, 128.3, 12)
	(37.5, 128.4, 12)
	(38, 128.5, 12)
Location of target (ϕ_e, λ_e)	(37.25, 131.7, 2)
Number of LOBs (N)	5

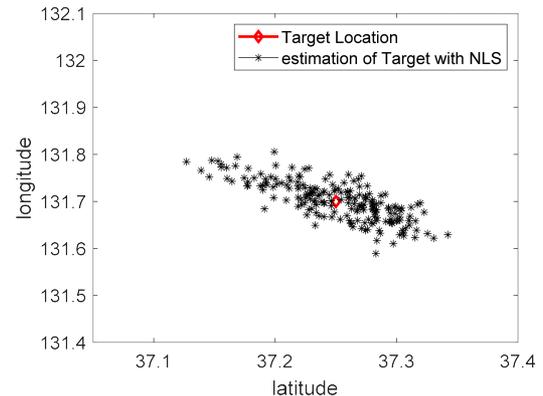


그림 5. NLS를 사용하여 추정된 위도, 경도 위치 탐지 결과
Fig. 5. Latitude and longitude localization results using NLS.

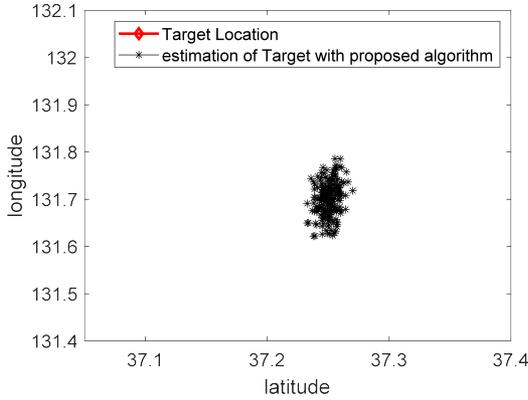


그림 6. 제안한 기법을 사용하여 추정한 위도, 경도 위치 탐지 결과
Fig. 6. Latitude and longitude localization results using proposed method.

낸 것이다. 각 알고리즘의 반복 횟수는 200회로 설정하였다. 그림 5와 그림 6의 위치 탐지 오차는 RMSE(root mean square error)를 사용하여 계산할 수 있으며, RMSE 계산은 식 (11)과 같이 한다.

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\hat{w} - w)^2}{M}} \quad (11)$$

여기서 M 은 모의실험 횟수, w 실제 값, \hat{w} 은 알고리즘을 이용한 추정값을 나타낸다. 위 실험 결과를 바탕으로 그림 5의 NLS 기법의 RMSE는 약 4.5km, 그림 6의 제안하는 기법은 약 2.7km가 나오는 것을 확인하였다.

그림 7과 그림 8은 표 1의 환경에서 기존의 3차원

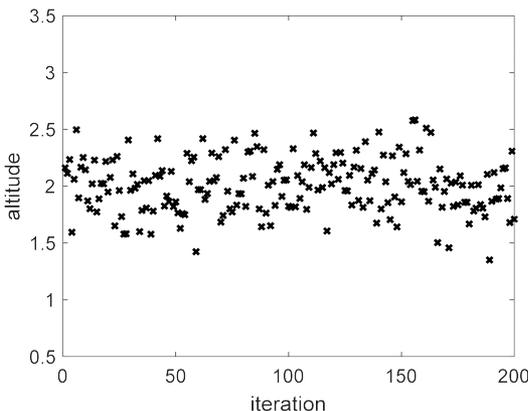


그림 7. 기존 3차원 추정 알고리즘의 고도 추정 결과 (방위각 오차: 0.2°, 고도각 오차: 0°)
Fig. 7. Altitude estimation results of conventional algorithm (deviation of azimuth: 0°, deviation of elevation: 0°).

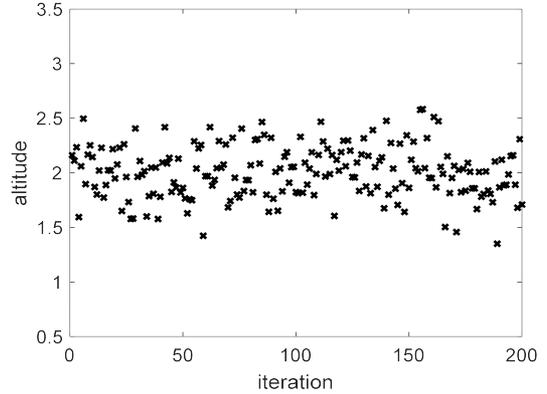


그림 8. 가중치 기반 3차원 추정 알고리즘의 고도 추정 결과 (방위각 오차: 0.2°, 고도각 오차: 0°)
Fig. 8. Altitude estimation results of proposed algorithm (deviation of azimuth: 0.2°, deviation of elevation: 0°).

고도 추정 기법과 제안하는 가중치 기반 기법의 모의실험을 통한 고도 추정 결과를 나타낸 것이다. 방위각 오차는 0.2°로 설정하였으며, 고도각 오차는 0°로 설정하였다. 실험 결과 고도 추정의 RMSE는 기존 기법의 경우 약 380m, 제안하는 기법의 경우 약 230m 오차가 발생하는 것을 확인하였고, 가중치 기법의 오차가 적은 것을 확인할 수 있다. 두 알고리즘의 고도 추정 오차가 발생하는 이유는 식 (10)에서와 같이 고도 추정 시 위도, 경도 탐지 결과에 의존하기 때문이며, 위·경도 탐지 결과가 우수한 가중치 기법의 고도 추정 오차가 낮은 것을 확인할 수 있었다.

그림 9와 그림 10은 앞서 진행한 모의실험 환경에서 방위각 오차를 0.2°로, 고도각 오차를 0.2°로 변경한 결과이다. 실험 결과 고도 추정 RMSE 오차는 기존 기법

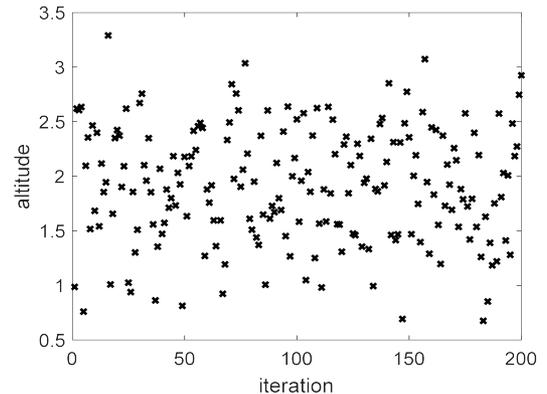


그림 9. 기존 3차원 추정 알고리즘의 고도 추정 결과 (방위각 오차: 0.2°, 고도각 오차: 0.2°)
Fig. 9. Altitude estimation results of conventional algorithm (deviation of azimuth: 0.2°, deviation of elevation: 0.2°).

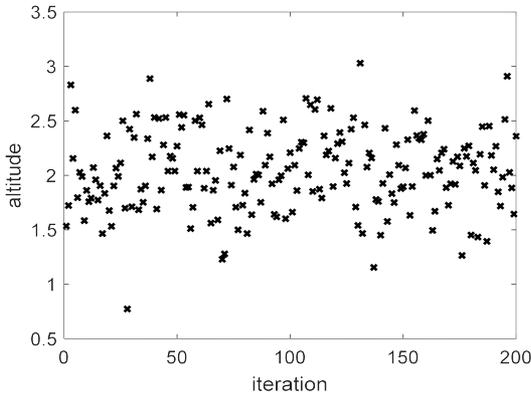


그림 10. 가중치 기반 3차원 추정 알고리즘의 고도 추정 결과 (방위각 오차: 0.2°, 고도각 오차: 0.2°)
 Fig. 10. Altitude estimation results of proposed algorithm (deviation of azimuth: 0.2°, deviation of elevation: 0.2°).

의 경우 약 540m, 제안하는 기법의 경우 360m 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 앞선 결과와 동일하게 고도 각 오차가 발생하더라도 가중치 기법의 고도 추정 성능이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 전자전에서 적의 정밀한 위치 탐지를 위하여 지구 곡률이 반영된 3차원 위치 탐지 알고리즘을 제안하였다. 실제 전장 환경에서는 수백 km에 있는 위협 물체를 탐지해야 하는 경우가 많으며, 이를 위해서는 지구 곡률이 고려된 알고리즘 설계가 필요하다.

모의실험을 통하여 도착 각도 측정 오차가 0.2° 발생한다고 가정하면 NLS 기법은 4.5km의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 제안하는 알고리즘은 2.7km 오차가 발생하였으며, NLS 기법보다 성능이 우수한 것을 확인하였다. 고도 추정을 위해서는 방위각과 고도각 정보를 모두 이용한 3차원 위치 탐지 알고리즘이 필요하며, 3차원 위치 탐지 알고리즘은 2차원 알고리즘에서 추정된 위도, 경도 정보와 고도각을 이용하여 고도 추정이 가능한 것을 확인하였다. 고도 추정은 위도, 경도 탐지 결과에 의존하므로, 위·경도 탐지 결과가 우수한 가중치 기법의 고도 추정 성능이 우수한 것을 확인하였다.

미래 전자전에서는 적의 정밀한 위치 탐지를 통해 적군의 동향을 더욱 긴밀하게 감시하고, 공격에 적극 대비해야 한다. 이를 위해서는 고도 추정 성능의 중요성이 더욱 커질 것이기 때문에, TDOA, FDOA 등 다양한 기법과 융합하여 고도 추정 성능을 향상할 수 있는 알고

리즘 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] R. J. Bamberger, J. G. Moore, R. P. Goonasekaram, and D. H. Scheidt, "Autonomous geolocation of RF emitters using small, unmanned platforms," *Johns Hopkins APL Technical Digest*, vol. 32, no. 3, pp. 636-646, Dec. 2013.
- [2] M. Khalaf-Allah, "Emitter location with azimuth and elevation measurements using a single aerial platform for electronic support missions," *Sensors*, vol. 21, no. 12, pp. 1-24, Jun. 2021.
 (<https://doi.org/10.3390/s21123946>)
- [3] D. Adamy, *EW101*, Artech House, MA, 2001.
- [4] J. S. Lim, "Technological status and development trend of electronic warfare equipment," *Electromagnetic Wave Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 55-63, Oct. 2000.
- [5] J. Jeon, S. Jo, and M. Chae, "Design and fabrication of 2-dimensional direction finding receiver using phase comparison," *J. Korea Inst. Military Sci. and Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 52-58, Feb. 2020.
- [6] M. T. Grabbe, B. M. Hamschin, and A. P. Douglas, "A measurement correlation algorithm for line-of-bearing geo-location," *2013 IEEE Aerospace Conf.*, Big Sky, MT, USA, Mar. 2013.
 (<https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6496828>)
- [7] S. Wang, R. Inkol, and B. R. Jackson, "Relationship between the maximum likelihood emitter location estimators based on received signal strength (RSS) and received signal strength difference (RSSD)," in *Proc. 2012 26th Biennial Symp. Commun. (QBSC)*, Kingston, ON, Canada, pp. 64-69, May 2012.
 (<https://doi.org/10.1109/QBSC.2012.6221353>)
- [8] X. Qu, L. Xie, and W. Tan, "Iterative constrained weighted least squares source localization using TDOA and FDOA measurements," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 15, pp. 3990-4003, Aug. 2017.

- (<https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2703667>)
- [9] R. Zhang, J. Riu, X. Du, B. Li, and M. Guizani, "AOA-Based three-dimensional multi-target localization in industrial WSNs for LOS conditions," *Sensors*, vol. 18, no. 8, pp. 1-19, Aug. 2018.
(<https://doi.org/10.3390/s18082727>)
- [10] S. Kang, T. Kim, and W. Chung, "Hybrid RSS/AOA localization using approximated weighted least square in wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 20, no. 4, pp. 1-12, Feb. 2020.
(<https://doi.org/10.3390/s20041159>)
- [11] N. O'Donoghue, *Emitter Detection and Geolocation for Electronic Warfare*, Artech House, MA, 2020.
- [12] J. H. Lee, M. C. Kim, S. W. Cho, and S. W. Kim, "Performance of LOB-based emitter localization using linear LSE algorithms," *J. Korea Inst. Military Sci. and Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 36-40, Feb. 2010.
- [13] E. Myagmar, S. Kwon, and D. M. Lee, "Performance analysis on an object location estimation algorithm using a single receiver," *J. Korean Inst. Inf. Sci. and Eng.*, vol. 42, no. 2, pp. 264-271, Feb. 2015.
(<https://doi.org/10.5626/JOK.2015.42.2.264>)
- [14] Y.-H. Ko, S. Bu, C. Lee, J. Lim, and J. Chae, "Closed-form based 3D localization for multiple signal sources," *J. Advanced Navigation Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 78-84, Apr. 2022.
(<https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.2.78>)
- [15] K. Kim, "The changes in the future war patterns and ROK's response," *Korea and Global Affairs*, vol. 1, no. 1, pp. 115-152, 2017.
(<https://doi.org/10.22718/kg.2017.1.1.115>)
- [16] B. Park, S. Kim, J. Ahn, and S. W. Kim, "Stationary emitter geolocation based on NLSE using LOBs considering the earth's curvature," *J. Korean Inst. Commun. and Inf. Sci.*, vol. 42, no. 3, pp. 661-672, Feb. 2017.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.3.661>)
- [17] R. A. Khalil and N. Saeed, "Hybrid TOA/AOA localization for indoor multipath-assisted next-generation wireless networks," *Results in Eng.*, vol. 22, pp. 1-8, Jun. 2024.
(<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102200>)
- [18] A. Pourkabirian, F. Kooshki, M. H. Anisi, and A. Jindal, "An accurate RSS/AoA-based localization method for internet of underwater things," *Ad Hoc Netw.*, vol. 145, pp. 1-13, Jun. 2023.
(<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103177>)
- [19] Y. Zou, W. Wu, and Z. Zhang, "Source localization based on hybrid AOA, TDOA, and RSS measurements," *IEEE Sensors*, vol. 23, no. 14, pp. 16293-16302, Jul. 2023.
(<http://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3283276>)
- [20] X. Kang, D. Wang, Y. Shao, M. Ma, and T. Zhang, "An efficient hybrid multi-station TDOA and single-station AOA localization method," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 8, pp. 5657-5670, Aug. 2023.
(<http://doi.org/10.1109/TWC.2023.3235753>)
- [21] J. M. McCarthy, *An Introduction to Theoretical Kinematics*, The MIT Press, London, 1990.

김 호 재 (Ho Jae Kim)



2015년 2월 : 부산대학교 전자
전기공학부 학사 졸업
2017년 2월 : 부산대학교 전기
전자컴퓨터공학과 석사 졸업
2024년 2월 : 부산대학교 전기
전자공학과 박사 졸업
2024년 3월~현재 : 부산대학교

전기전자공학과 박사 후 연구원
<관심분야> 디지털 방송 신호처리, 레이더 위치탐지
[ORCID:0000-0002-6665-7078]

강 지 연 (Jee Yeon Kang)



2015년 2월 : 광운대학교 전자
통신공학과 학사 졸업
2022년 5월~현재 : LIG 넥스원
전자전연구소 선임연구원
<관심분야> 전자전, 신호처리,
소프트웨어 공학

권 순 영 (Soon-Young Kwon)



2018년 2월 : 부산대학교 전자
공학과 학사 졸업
2018년 3월~현재 : 부산대학교
전기전자공학과 석박통합과정
<관심분야> 디지털 방송 신호
처리, 레이더 신호처리
[ORCID:0000-0002-7280-8549]

김 형 남 (Hyoung-Nam Kim)



1993년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 학사 졸업
1995년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 석사 졸업
2000년 2월 : 포항공과대학교 전
자전기공학과 박사 졸업
2000년 5월 : 포항공과대학교 전
자컴퓨터공학부 박사 후 연구원

2000년 5월~2003년 2월 : 한국전자통신연구원 무선방
송연구소 선임 연구원
2003년 3월~2007년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공
학부 조교수
2007년 3월~2012년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공
학부 부교수
2009년 2월~2010년 2월 : Johns Hopkins Univ.
Visiting Scholar
2015년 9월~2016년 8월 : Univ. of Southampton
Visiting Professor
2012년~현재 : 부산대학교 전자공학과 교수
<관심분야> 적응신호처리, 레이더 및 소나 신호처리,
디지털 방송 신호처리, 생체신호처리
[ORCID:0000-0003-3841-448X]

류 지 연 (Ji Yeon Ryu)



2017년 2월 : 고려대학교 컴퓨
터학과 학사 졸업
2017년 1월~현재 : LIG 넥스원
전자전연구소 선임연구원
<관심분야> 전자전, 신호처리,
소프트웨어 공학

박 지 훈 (Ji-Hun Park)



2020년 2월 : 부산대학교 전자
공학과 학사 졸업
2022년 8월 : 부산대학교 전기
전자컴퓨터공학과 석사 졸업
2022년 11월~현재 : LIG 넥스
원 전자전연구소 연구원
<관심분야> 전자전, 신호처리,
소프트웨어 공학