

기지국 높이에 따른 TDoA/AoA 기반 3차원 측위 성능 하한 분석

서하숨, 정홍석, 양두희, 김선우

한양대학교 융합전자공학부

{tgt0707, hssjung, yangdh95, remero}@hanyang.ac.kr

Performance Lower Bounds Analysis for TDoA/AoA-Based 3D Positioning with Height of Base Station

Hasom Seo, Hongseok Jung, Duhui Yang, Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 기지국 높이에 따른 TDoA (time difference of arrival)/AoA (angle of arrival) 기반 3차원 측위 성능 하한을 분석한다. 기존 기지국 배치에 따른 측위 성능 분석 연구는 기지국 높이를 고려하지 않는 2차원 측위에 대하여 진행되었다. 하지만, TDoA/AoA 기반 3차원 측위는 기지국 높이에 따라 수직 측위 정확도가 크게 달라지므로 이에 대한 성능 분석이 필요하다. 이를 분석하고자 기지국 높이가 다른 세 가지 실험 환경을 구성하였고, 실험 결과 대각선상의 기지국 간 높이가 동일한 경우 가장 낮은 측위 성능 하한을 보였으며, 모든 기지국의 높이가 동일한 환경에서 높은 측위 성능 하한을 검증했다.

I. 서론

최근 도심 환경에서 긴급 구조, urban air mobility와 같은 서비스를 안정적으로 지원하기 위해 5G 무선통신을 통한 정밀 3차원 측위 시스템의 중요성이 부각되고 있다 [1]. 단말과 기지국 간의 시각동기에 어려움이 있는 5G 무선통신 시스템은 TDoA(time difference of arrival)/AoA (angle of arrival) 기반 측위 기법이 주로 사용된다. 기존 기지국 배치에 따른 TDoA/AoA 기반 측위 성능 분석은 기지국 높이를 고려하지 않은 2차원 측위에 대해 진행되었다. 하지만, 3차원 측위의 경우, 기지국 높이 배치에 따른 수직 측위 오차 영향이 크기 때문에 이에 대한 측위 성능 분석이 필요하다 [2]. 따라서 본 논문에서는 기지국의 높이 배치에 따른 TDoA/AoA 기반 3차원 측위 성능 하한과 TDoA/AoA 측정값 오차에 따른 영향을 분석한다.

II. 시스템 모델 및 TDoA/AoA 기반 측위 성능 하한

단말 $\mathbf{u} = [u_x, u_y, u_z]^T \in \mathbb{R}^3$ 는 상향링크를 통하여 위치를 알고있는 기지국 $\mathbf{s}_k = [s_{x,k}, s_{y,k}, s_{z,k}]^T \in \mathbb{R}^3, \{k=1, \dots, N\}$ 를 향해 측위를 위한 reference signal을 송신한다. 이때 서로 다른 기지국은 시각 동기화되어있으며, 배열안테나를 통하여 reference signal을 수신한다. 수신한 reference signal을 통하여 k 번째 기지국은 time of arrival, AoA를 측정하며 기준 기지국을 통해 TDoA 값을 얻는다. 잡음이 존재하지 않는 TDoA 측정값 τ_k , 방위각 θ_k 와 고도각 ϕ_k 로 이루어진 AoA 측정값 $\{\theta_k, \phi_k\}$ 는 다음과 같다.

$$\tau_k = \|\mathbf{u} - \mathbf{s}_k\| - \|\mathbf{u} - \mathbf{s}_1\|, \quad (1)$$

$$\theta_k = \arctan \frac{u_y - s_{y,k}}{u_x - s_{x,k}}, \quad (2)$$

$$\phi_k = \arctan \frac{u_z - s_{z,k}}{l_k}, \quad (3)$$

이때, $l_k = \sqrt{(u_x - s_{x,k})^2 + (u_y - s_{y,k})^2}$ 이다. N 개의 기지국에서 잡음을

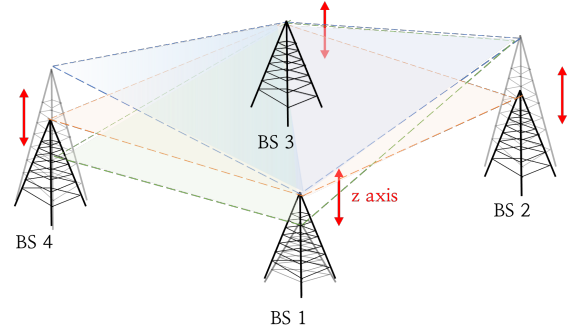


그림 1. BS 높이에 따른 측위 하한 분석 시나리오

포함한 TDoA, AoA 측정값으로 이뤄진 측정값 벡터 $\tilde{\mathbf{m}} \in \mathbb{R}^{3N-1}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{m} + \mathbf{n}, \quad (4)$$

이때 $\mathbf{m} = [\theta, \phi, \tau]^T \in \mathbb{R}^{3N-1}$ 이며 이 때, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]$, $\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]$, $\tau = [\tau_2, \dots, \tau_N]$ 와 같이 구성된다. 측정 오차 벡터 $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^{3N-1}$ 은 평균이 0이며 공분산 행렬 $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{3N-1 \times 3N-1}$ 를 갖는다. 여기서 $\mathbf{Q}$ 의 i, j 번째 성분 $q_{i,j}$ 는 다음과 같다.

$$q_{i,j} = \begin{cases} \sigma_\theta^2 & i=j=k \\ \sigma_\phi^2 & i=j=k+1, \dots, 2k \\ \sigma_\tau^2 & i=j=2k+1, \dots, 3k-1 \\ \sigma_\tau^2/2 & i \neq j=2k+1, \dots, 3k-1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

측위 성능 하한 분석을 위해 대표적으로 사용되는 CRLB(Cramér-Rao lower bound)을 사용하며, CRLB($\mathbf{u}$)는 다음과 같이 유도된다 [3].

$$\text{CRLB}(\mathbf{u}) = \sqrt{\text{trace}(\text{FIM}^{-1}(\mathbf{u}))}, \quad (6)$$

여기서 $\text{trace}(\cdot)$ 는 대각합이며, $\text{FIM}(\mathbf{u})$ 은 Fisher information matrix으로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{FIM}(\mathbf{u}) = \left(\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \mathbf{u}} \right)^\top \mathbf{Q}^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \mathbf{u}} \right). \quad (7)$$

여기서 $\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \mathbf{u}}$ 는 측정값 벡터 $\mathbf{m}$ 의 단말 위치 벡터 $\mathbf{u}$ 에 대한 자코비안 행렬이며 이는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \mathbf{u}} = \left[\frac{\partial \theta_1}{\partial \mathbf{u}}, \dots, \frac{\partial \theta_k}{\partial \mathbf{u}}, \frac{\partial \phi_1}{\partial \mathbf{u}}, \dots, \frac{\partial \phi_k}{\partial \mathbf{u}}, \frac{\partial \tau_1}{\partial \mathbf{u}}, \dots, \frac{\partial \tau_k}{\partial \mathbf{u}} \right], \quad (8)$$

여기서

$$\frac{\partial \theta_k}{\partial \mathbf{u}} = \left[\frac{-(u_y - s_{y,k})}{l_k^2}, \frac{(u_x - s_{x,k})}{l_k^2}, 0 \right]^\top, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial \mathbf{u}} = \left[\frac{-(u_x - s_{x,k})(u_z - s_{z,k})}{r_k^2 l_k}, \frac{-(u_y - s_{y,k})(u_z - s_{z,k})}{r_k^2 l_k}, \frac{l_k}{r_k^2} \right]^\top, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau_k}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\mathbf{u} - \mathbf{s}_k}{r_k} - \frac{\mathbf{u} - \mathbf{s}_1}{r_1} \quad \text{이며 이때, } r_k = \|\mathbf{u} - \mathbf{s}_k\| \text{이다.}$$

IV. 시뮬레이션 환경 구성 및 결과

A. 시뮬레이션 환경 구성 및 실험 방법

인접 기지국 간 x, y 평면에서 간격은 200m로 설정하였으며 기지국 수 N 은 4로 하였다. 이에 따른 기지국 위치는 그림 1과 같이 각 $\mathbf{s}_1 = [0, 0, z_1]^\top$, $\mathbf{s}_2 = [200, 0, z_2]^\top$, $\mathbf{s}_3 = [200, 200, z_3]^\top$, $\mathbf{s}_4 = [0, 200, z_4]^\top$ 로 하였으며, 단말의 위치는 $\mathbf{u} = [100, 100, 1]^\top$ 로 설정하였다. 기지국의 높이 배치의 경우 표 1과 같이 세 가지 case를 고려하였다.

B. 시뮬레이션 결과 및 분석

고려된 세 가지 배치 case에서 기지국 높이에 따른 측위 성능 분석을 위해 시뮬레이션을 통한 측위 성능 하한을 비교하였다. 그림 2는 TDoA 측정 오차 표준편차 σ_τ 를 1부터 5m까지 증가시켰을 때의 측위 성능 하한 분석 결과이며, 이때 방위각 측정 오차 표준편차 σ_θ , 고도각 측정 오차 표준편차 σ_ϕ 는 모두 0.1° 로 설정하였다. 표준편차가 1m 일때 측위 성능 하한은 case 1에서 약 5.8 m, case 2에서 약 9 m, case 3에서 약 4 m를 보였으며, 모든 오차 표준편차 값에서 case 3가 가장 낮은 측위 성능 하한을 보였다. 평균적으로 보았을 때 case 3가 case 2 대비 약 25% 감소한 결과를 보였으며 TDoA 오차 표준편차가 증가함에 따라 case 1과 3간의 성능 하한 차이는 지속적으로 감소하였다. 하지만, case 2의 경우 오차 표준편차가 증가함에도 거의 일정한 값을 유지하며 case 2가 다른 case들 대비 약 0.5 m 높은 측위 성능 하한을 보였다.

그림 3은 고도각 측정 오차의 표준편차 σ_ϕ 를 0부터 3° 까지 증가시켰을 때의 측위 성능 하한이다. 이때 σ_θ 는 0.1° , σ_τ 는 2 m로 설정하였다. 오차 표준편차 0.5°에서 측위 성능 하한은 case 2의 경우 약 41 m를 보였으며, 표준 편차가 증가함에 따라 측위 성능 하한의 증가폭이 감소하는 것을 확인하였다. case 1과 3 경우 오차 표준 편차 0.5°에서 각 13.9 m, 8.7m의 성능 하한을 보였으며 모두 오차 표준편차가 증가함에도 case 1 대비 상대적으로 작은 폭인 1m 이내의 성능 하한 증가를 보였다.

표 1. 세 가지 case 별 BS 높이 배치

실험 항목	z_1 [m]	z_2 [m]	z_3 [m]	z_4 [m]
Case 1	30	60	30	30
Case 2	60	60	60	60
Case 3	50	25	50	25

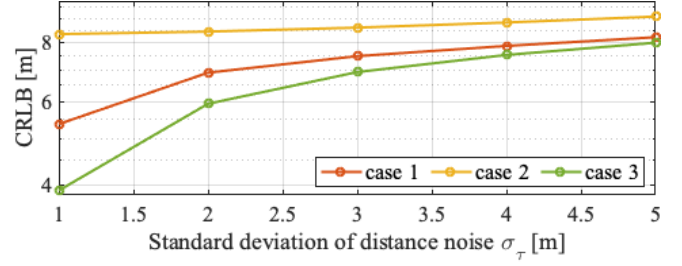


그림 2. TDoA 측정 오차 표준편차에 따른 측위 성능 하한

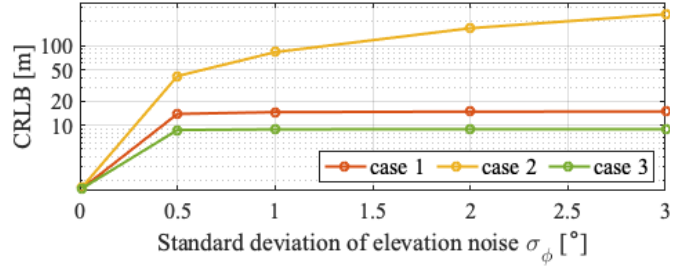


그림 3. 고도각 측정 오차 표준편차에 따른 측위 성능 하한

이는 case 2의 경우, 기지국의 높이가 모두 동일하기 때문에 TDoA 대비 AoA 오차에 따른 수직 측위 오차 영향이 크기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 기지국 높이에 따른 TDoA/AoA 기반 3차원 측위 성능 하한을 분석하였다. 기지국의 높이 배치를 총 세 가지 case로 나누었으며, 각 case에 대해 TDoA와 AoA의 측정 오차 표준편차 증가에 따른 성능 하한을 비교하였다. 비교 결과 case 2에 비해 case 3가 TDoA 측정 오차 표준편차 기준 25%, 고도각 측정 오차 표준편차 기준 72.43%의 평균적인 성능 하한 이득이 있음을 확인하였다. 또한, 모든 기지국이 같은 평면에 위치한 case 2의 경우, TDoA 기반 수직 측위 오차가 상대적으로 큼에 따라 AoA 오차에 따른 성능 하한 증가가 다른 case 대비 큰 것을 확인하였다. 향후, non line of sight와 multipath fading이 존재하는 practical한 환경에서 측위 성능 오차를 최소화하는 최적 배치 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00337857, 5G 및 다중 GNSS 기반 긴급구조용 복합측위 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] C. Isaia, and M. P. Michaelides, "A review of wireless positioning techniques and technologies: From smart sensors to 6G." *Signals*, 2022.
- [2] Z. Qin, J. Wang, and S. Wei, "A study of 3D sensor array geometry for TDOA based localization." In *Proc. CIE Int. Conf. Rada.*, 2016.
- [3] T. Jia, H. Wang, X. Shen, Z. Jiang, and K. He, "Target localization based on structured total least squares with hybrid TDOA-AOA measurements." *Signal Processing*, 2018.