

다중 신호원에 대한 닫힌 형태 기반 3차원 위치 추정

Closed-form based 3D Localization for Multiple Signal Sources

고요한^{1*} · 부성춘¹ · 이철수¹ · 임재욱¹ · 채주희²

¹LIG넥스원 C4I연구소
²LIG넥스원 전자전연구소

Yo-han Ko^{1*} · Sung-chun Bu¹ · Chul-soo Lee¹ · Jae-wook Lim¹ · Ju-hui Chae²

¹C4I R&D Laboratory, LIG Nex1, Gyeonggi-do 16911, Korea
²Electronic Warfare Laboratory, LIG Nex1, Gyeonggi-do 16911, Korea

[요 약]

본 논문에서는 다중 신호원이 존재하는 경우에 닫힌 형태 기반의 3차원 위치 추정 기법을 제안한다. TDOA나 AOA, FDOA와 같은 일반적인 위치 추정 기술은 단일 신호원이 존재하는 경우에 위치를 추정할 수 있으며, 미상의 다중 신호원이 존재하는 경우에 이를 구분하여 위치를 추정하는데 한계가 있다. 제안된 기법은 배열 안테나를 갖는 센서에 수신된 신호의 상호상관 벡터를 계산하고, 상호상관 값으로부터 TDOA값과 AOA값을 추정한다. 그리고 기준 센서의 위치를 이용하여 좌표 변환을 수행하고, 변환된 좌표에 대해 추정된 AOA값을 이용하여 좌표 회전을 수행한 후 각 신호원에 대한 3차원 위치를 추정한다. 제안된 기법은 컴퓨터 모의실험을 통해 그 성능을 검증한다.

[Abstract]

In this paper, we propose a closed-form based 3D localization method in the presence of multiple signal sources. General localization methods such as TDOA, AOA, and FDOA can estimate a location when a single signal source exists. When there are multiple unknown signal sources, there is a limit in estimating the location. The proposed method calculates a cross-correlation vector of signals received by sensors having an array antenna, and estimates TDOA and AOA values from the cross-correlation values. Then, the coordinate transformation is performed using the position of the reference sensor. Then, the coordinate rotation is performed using the estimated AOA value for the transformed coordinates, and then the three-dimensional position of each emitter is estimated. The proposed method verifies its performance through computer simulation.

Key word : 3D localization, Angle of arrival, Array antenna, Multiple signal sources, Time difference of arrival.

<https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.2.78>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 31 March 2022; Revised 6 April 2022
Accepted (Publication) 21 April 2022 (30 April 2022)

*Corresponding Author : Yo-han Ko

Tel: +82-31-8026-4626
E-mail: yohan.ko@lignex1.com

I. 서론

위치기반 서비스에 대한 수요는 이동통신, 교통, 항공, 국방 등 다양한 산업 분야에서 점차 증가하고 있으며, 이에 따라 신호원의 위치 측정 및 수신기의 위치 측정에 대한 중요성이 강조되고 있다. 미국의 위성항법 장치(GPS; global positioning system)와 유럽의 갈릴레오(galileo) 등으로 대표되는 범지구 위성항법시스템(GNSS; global navigation satellite system)은 인공 위성을 이용하여 사용자에게 PNT 정보(위치(positioning), 항법(navigation), 시각(timing) 정보)를 제공하는 전파항법시스템이다. 최근에 국내에서는 위치 결정에 대한 독립을 위해 한국형 위성항법시스템인 KPS(korean positioning system) 개발을 착수했으며, 2035년 서비스를 목표로 구축을 준비 중이다. 이러한 위성항법시스템은 지상으로부터 약 20,000km 상공에 위치한 위성으로부터 전파를 송신하기 때문에 지상에서 수신하는 신호의 전력은 잡음 전력보다 낮아 재밍 신호에 매우 취약하다 [1]-[3].

국내외에서 다수의 재밍 피해가 보고되었으며, 2011년 이란의 미군 무인기 탈취 사건에서 보듯이 재밍은 단순한 잡음을 내보내거나 전파를 교란하는 수준을 넘어 위성 항법 신호와 비슷한 기만신호를 내보내 무인기를 원하는 곳으로 끌고 올 수 있는 수준까지 발전했다. 이러한 재밍 신호에 의한 피해를 줄이기 위해서 다양한 기술들이 연구되어 왔으며, 재밍 신호에 대응하기 위해 재밍원에 대한 위치를 추정하는 기술들이 다양하게 연구되고 있다. 재밍원에 대한 위치추정 기술로는 수신된 재밍 신호의 세기를 이용하는 RSSI(received signal strength indication) 기술, 수신된 재밍 신호의 전파도달시간을 이용하는 TOA(time of arrival) 기술, 수신된 재밍 신호의 도달시간 차이를 이용하는 TDOA(time difference of arrival) 기술, 수신된 재밍 신호의 입사방향을 이용하는 AOA(angle of arrival) 기술, 수신된 재밍 신호의 도플러 주파수 편이 차이를 이용하는 FDOA(frequency difference of arrival) 기술 등이 있다[4]-[6]. 또한 TDOA 기술, AOA 기술, FDOA 기술 등을 결합하여 위치를 추정하는 복합 기술이 있다. 일반적으로 전파환경에 따라 재밍 신호의 세기는 매우 크게 변화하므로 RSSI 기술은 위치 추정 정확도가 매우 낮다. 그리고 FDOA 기술은 재밍원과 센서 사이에 상대적인 이동 속도 차이(도플러 천이 차이)가 발생해야하기 때문에 이동 속도가 낮거나, 고정된 경우에는 위치 추정을 할 수 없다. TOA 기술은 재밍원과 센서 사이에 정확한 시각동기가 필요하기 때문에 미상 신호인 재밍원의 위치 추정에는 이용할 수 없다. TDOA 기술과 AOA 기술은 TOA 기술과 다르게 재밍원과 센서 사이에 정확한 시각동기를 필요로 하지 않기 때문에 미상 신호인 재밍원의 위치 추정에 적합한 기술이다. 하지만 앞서 기술한 TDOA 기술이나 AOA 기술, 복합 기술은 다수의 재밍원이 존재하는 경우에 위치 추정을 위한 관찰값을 결합할 때 모호성이 존재하기 때문에 주로 단일 재밍원의 위치 추정에 사용된다. 다수의 재밍원이 존재하는 경우의 위치 추정 방법은 TDOA 측정

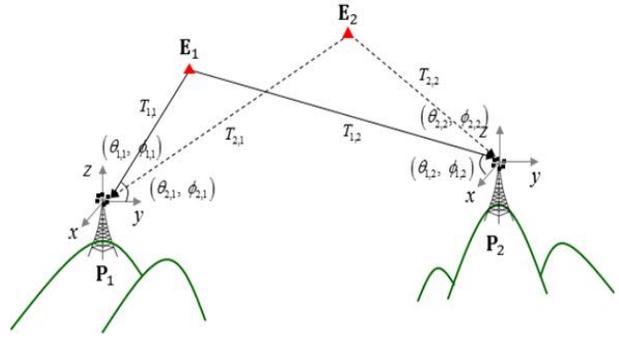


그림 1. 배열안테나를 갖는 2개의 센서와 재밍원의 배치 예
Fig. 1. An example of deployment of two sensors having array antenna and emitters

값 또는 AOA 측정값의 조합을 변경해가며 위치 추정을 수행하고, 통계적으로 위치 추정 결과가 많이 발생하는 지점을 재밍원의 최종 위치 추정 결과로 판단하는 방법 등 다양한 방법들이 연구되고 있다[4]-[6]. 그리고 실 환경에서 재밍원 추정을 위해서 센서를 설치하는 경우 장소 및 비용 등 다양한 제약사항으로 인해 소수의 센서만 설치가 가능한 경우가 발생한다. 또한 가시선(LOS; line of sight) 확보가 되지 않는 실 환경에서 재밍원의 전파는 소수의 센서에만 수신되는 경우가 발생한다.

본 논문에서는 2개의 센서에 다수의 재밍 또는 비협조 신호가 수신되는 환경에서 TDOA 측정값과 AOA 측정값을 이용한 닫힌 형태 기반 3차원 위치 추정기술을 제안한다. 그리고 컴퓨터 모의실험을 통해서 제안된 기술의 성능을 분석하여 결과를 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 센서에 수신되는 재밍 또는 비협조 신호에 대한 모델을 설명하고, 제안된 기술을 설명한다. III장에서는 컴퓨터 모의실험 환경 및 성능 분석 결과에 대해 설명하고, IV장에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

II. 본론

본 장에서는 배열안테나를 갖는 센서에 수신되는 다중 신호에 대한 특징을 기술하고, 다중 신호에 대한 3차원 위치 추정 기술을 제안한다.

2-1 배열안테나를 갖는 센서에 수신되는 신호 모델

그림 1은 배열안테나를 갖는 2개의 센서에 다수의 재밍 또는 비협조 신호가 수신되는 환경의 예를 보여준다. 각 센서에 수신되는 재밍 신호는 거리에 따른 신호 지연 차이와 위치에 따른 입사각 정보를 포함하고 있다.

그림 1에서 각 센서에 수신되는 신호는 센서와 재밍원이 배치된 위치에 따라 서로 다른 입사각을 갖고 수신된다. $[\theta, \phi]$ 는 각 센서에 수신되는 재밍원의 입사각으로 각각 양각(elevation

angle) $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 과 방위각(azimuth angle) $\phi \in [0, 2\pi)$ 을 나타낸다. 그리고 $\mathbf{P}_i = [x_i, y_i, z_i]$ 는 i 번째 센서의 위치 벡터를 나타내고, $\mathbf{E}_j = [x_{Ej}, y_{Ej}, z_{Ej}]$ 는 j 번째 재밍원의 위치 벡터를 나타낸다.

두 센서에서의 도달시간차이는 상호상관을 통해 계산되며, 상호상관은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{1,2} = (y_1^* y_2)(\tau) = E\{y_1(t)y_2(t-\tau)\} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T y_1(t)y_2(t-\tau)dt$$

여기에서 $y_i(t)$ 와 τ , T 는 각각 i 번째 센서에서 수신한 신호, 지연시간, 신호 주기를 나타낸다.

j 번째 재밍원과 i 번째 센서 사이의 거리는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{j,i} = \|\mathbf{E}_j - \mathbf{P}_i\| = \sqrt{(\mathbf{E}_j - \mathbf{P}_i)(\mathbf{E}_j - \mathbf{P}_i)^T} \quad (2)$$

$$= \sqrt{(x_{Ej} - x_i)^2 + (y_{Ej} - y_i)^2 + (z_{Ej} - z_i)^2}$$

식 (2)를 이용하여 j 번째 재밍원과 i 번째 센서 사이의 전파 지연 시간을 나타내면 식 (3)과 같다.

$$T_{j,i} = \frac{r_{j,i}}{c} \quad (3)$$

여기에서 c 는 빛의 속도(299792458 [m/s])를 나타낸다.

식 (3)을 이용하여 첫 번째 센서와 두 번째 센서 사이의 TDOA값은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{j,(1-2)} = T_{j,1} - T_{j,2} = \frac{1}{c}(r_{j,1} - r_{j,2}) \quad (4)$$

그림 2는 L 개의 안테나 소자로 이루어진 배열안테나의 구조를 나타낸다. 이때 센서의 배열안테나 소자에 수신되는 신호는 평면파를 가정한다. 즉, 재밍원이 각 센서와 충분히 이격되어 있음을 가정한다. 그리고 각 안테나 소자는 등방성(isotropic)이고, 무지향(omnidirectional) 특성을 갖는 것을 가정한다. 각 안테나 소자에 수신되는 신호는 각 소자의 배치와 입사 방향에 따라서 서로 다른 위상지연을 갖는다. 각 소자의 위상 지연 벡터는 조향벡터라고 하며, 이러한 조향벡터는 배열안테나의 구조에 따른 공간 특성을 포함한다[7], [8].

단일 신호원을 고려하는 경우 i 번째 센서의 l 번째 안테나 소자에 수신되는 신호는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_l^i(t) = a_l^i s(t) + w_l^i(t) \quad (5)$$

여기에서 $y_l^i(t)$ 은 i 번째 센서의 l 번째 안테나 소자에 수신된

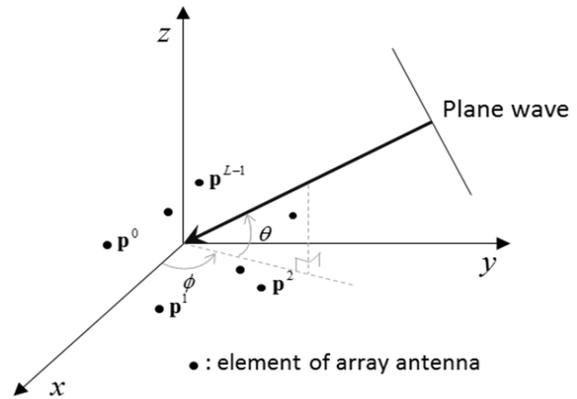


그림 2. 배열안테나 구조
Fig. 2. Structure of array antenna

신호이고, a_l^i 은 i 번째 센서의 l 번째 안테나 소자에 수신된 재밍원의 조향값이고, $s(t)$ 는 재밍원의 송신 신호를 나타낸다. $w_l^i(n)$ 은 i 번째 센서의 l 번째 안테나 소자의 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 가산백색가우시안잡음(AWGN; additive white gaussian noise)을 나타낸다. 식 (5)를 벡터형태로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\mathbf{y}_i(t) = [a_i^0, a_i^1, \dots, a_i^{L-1}]^T s(t) + [w_i^0(t), w_i^1(t), \dots, w_i^{L-1}(t)]^T \quad (6)$$

$$= \mathbf{A}_i s(t) + \mathbf{w}_i(t)$$

여기에서 $\mathbf{w}_i(t)$ 는 i 번째 센서의 수신 신호 잡음 벡터를 나타내고, \mathbf{A}_i 는 i 번째 센서에서의 재밍원 조향벡터를 나타내며, 식 (7)과 같다.

$$\mathbf{A}_i = [e^{-j\kappa_i^T \mathbf{p}_i^0}, e^{-j\kappa_i^T \mathbf{p}_i^1}, \dots, e^{-j\kappa_i^T \mathbf{p}_i^{L-1}}]^T \quad (7)$$

식 (7)에서 κ_i 와 \mathbf{p}_i^l 은 각각 i 번째 센서에 입사각 정보 $[\theta_i, \phi_i]$ 를 갖고 수신되는 평면파에 대한 파벡터(wave vector)와 l 번째 안테나 소자의 위치 벡터(position vector)를 나타내며, 각각 식 (8)과 식 (9)와 같다.

$$\kappa_i = -\frac{2\pi}{\lambda} [\cos\theta_i \cos\phi_i, \cos\theta_i \sin\phi_i, \sin\theta_i]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_i^l = [p_i^{x,l}, p_i^{y,l}, p_i^{z,l}]^T \quad (9)$$

여기에서 $\lambda(=c/f)$ 는 파장을 나타내고, $p_i^{k,l}$ 은 i 번째 센서의 l 번째 안테나 소자의 k 축에서의 위치값을 나타낸다.

2-2 다중 신호원에 대한 3차원 위치 추정

J 개의 재밍원을 고려할 때, i 번째 센서의 배열안테나에 수신

되는 신호는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{s} + \mathbf{w}_i = \sum_{j=0}^{J-1} \mathbf{A}_{j,i} s_j + \mathbf{w}_i \quad (10)$$

여기에서 \mathbf{A}_i 는 i 번째 센서의 조향행렬을 나타내고, $\mathbf{A}_{j,i}$ 는 i 번째 센서에 수신되는 j 번째 재밍원 신호의 조향벡터를 나타낸다.

식 (1)과 식 (10)을 이용하여 두 센서 사이의 TDOA값을 계산하면 다음 식 (11)과 같다.

$$\hat{T}_{j,(1-2)} = \operatorname{argmax}_{\tau_j} \sum_{l=0}^{L-1} |R_{j,(1-2)}^l| \quad (11)$$

$$\text{where } \tau_j \in \{\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{j-1}\} \setminus \{\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{j-1}\}$$

여기에서 $R_{j,(1-2)}^l$ 은 첫 번째 센서의 l 번째 안테나 소자에 수신된 신호와 두 번째 센서에 수신된 신호 사이의 상호상관을 나타내고, AB 는 A 에 대한 B 의 차집합을 나타낸다. $\hat{T}_{j,(1,2)}$ 는 j 번째 TDOA 추정값을 나타내며, 이때 l 번째 안테나 소자의 상호상관값은 식 (12)와 같은 특징을 갖는다.

$$R_{j,(1-2)}^l = R_{j,(1-2)}^l(\hat{T}_{j,(1-2)}) = |R_{j,(1-2)}^l| e^{-j(\boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{p}_i^l + \alpha)} \quad (12)$$

식 (12)를 벡터 형태로 나타내면, 상호상관 벡터는 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{j,(1-2)} &= \begin{bmatrix} |R_{j,(1-2)}^0| e^{-j\alpha} e^{-j\boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{p}_i^0} \\ |R_{j,(1-2)}^1| e^{-j\alpha} e^{-j\boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{p}_i^1} \\ \vdots \\ |R_{j,(1-2)}^{L-1}| e^{-j\alpha} e^{-j\boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{p}_i^{L-1}} \end{bmatrix} \quad (13) \\ &\simeq e^{-j\alpha} |R_{j,(1-2)}| [e^{-j\boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{p}_i^0}, e^{-j\boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{p}_i^1}, \dots, e^{-j\boldsymbol{\kappa}_i^T \mathbf{p}_i^{L-1}}]^T \\ &= e^{-j\alpha} |R_{j,(1-2)}| \mathbf{A}_{1-2} \end{aligned}$$

여기에서 각 안테나 소자에서의 상호 상관값 크기 $|R_{j,(1-2)}^l|$ 는 각 안테나 소자가 등방성이고, 무지향 특성을 갖는다면, $|R_{j,(1-2)}^l| \simeq |R_{j,(1-2)}^0| \simeq \dots \simeq |R_{j,(1-2)}^{L-1}|$ 와 같이 나타낼 수 있다. 식 (13)을 통해 상호상관 값은 상호상관 크기와 배열안테나에 수신되는 입사각 정보에 의한 위상회전 값을 포함하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (11)에서 추정된 TDOA값과 식 (13)의 입사각 정보는 동일한 재밍원으로부터의 시간 지연과 위상회전 결과이다. 식 (13)에서 입사각은 지연합(DNS; delay and sum), MVDR(minimum variance distortionless response), MUSIC(multiple signal classification), Root-MUSIC, ESPRIT(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques) 등 다양한 방향탐지 기술[4], [5], [7], [8]을 이용하

여 추정할 수 있다. 식 (13)을 사용하여 첫 번째 센서에서의 j 번째 재밍원의 입사각 추정값은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{j,1} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{z}_{Ej} - z_1}{\sqrt{(\hat{x}_{Ej} - x_1)^2 + (\hat{y}_{Ej} - y_1)^2}} \right) + \beta_{\theta_{j,1}} \\ \hat{\phi}_{j,1} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{y}_{Ej} - y_1}{\hat{x}_{Ej} - x_1} \right) + \beta_{\phi_{j,1}} \end{cases} \quad (14)$$

여기에서 $\beta_{\theta_{j,1}}$ 와 $\beta_{\phi_{j,1}}$ 는 각각 양각 추정 오차와 방위각 추정 오차를 나타낸다. 그리고 식 (14)를 통해 방위각은 재밍원과 센서 사이의 x 와 y 좌표의 함수이고, 양각은 2차원 좌표에 z 좌표 값이 추가된 함수로 표현되는 것을 알 수 있다.

3차원 위치 추정을 위해서 식 (11)의 TDOA 값을 변형하면, 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{T}_{j,(1-2)} &= T_{j,1} - T_{j,2} = \frac{1}{c}(r_{j,1} - r_{j,2}) \quad (15) \\ &= \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{(\mathbf{E}_j - \mathbf{P}_1)(\mathbf{E}_j - \mathbf{P}_1)^T} - \sqrt{(\mathbf{E}_j - \mathbf{P}_2)(\mathbf{E}_j - \mathbf{P}_2)^T} \right\} \\ &= \frac{1}{c} \left\{ \sqrt{(\mathbf{E}_j' - \mathbf{P}_1')(\mathbf{E}_j' - \mathbf{P}_1')^T} - \sqrt{(\mathbf{E}_j' - \mathbf{P}_2')(\mathbf{E}_j' - \mathbf{P}_2')^T} \right\} \end{aligned}$$

여기에서 \mathbf{E}_j' 과 \mathbf{P}_i' 은 첫 번째 센서 좌표를 원점으로 하는 좌표 변환 후 첫 번째 센서에서 추정된 j 번째 재밍원의 방위각을 기준으로 위상 회전된 새로운 좌표를 의미한다. 이는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \mathbf{E}_j' = (\mathbf{E}_j - \mathbf{P}_1) \cdot [\operatorname{real}(e^{-j2\pi\phi_{j,1}}), \operatorname{imag}(e^{-j2\pi\phi_{j,1}}), e^{-j2\pi\phi_{j,1}}]^T \\ \mathbf{P}_i' = (\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_1) \cdot [\operatorname{real}(e^{-j2\pi\phi_{j,1}}), \operatorname{imag}(e^{-j2\pi\phi_{j,1}}), e^{-j2\pi\phi_{j,1}}]^T \end{cases} \quad (16)$$

여기에서 \cdot 는 원소곱을 나타낸다.

식 (14)와 식 (15)를 이용하여 재밍원의 변환 좌표인 \mathbf{E}_j' 을 먼저 계산하면 다음 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{E}}_j' &= [\hat{x}_{Ej}', \hat{y}_{Ej}', \hat{z}_{Ej}']^T \quad (17) \\ &= \left[\frac{\tilde{x}_{Ej}^2 + \tilde{y}_{Ej}^2 + \tilde{z}_{Ej}^2 - c\hat{T}_{j,(1-2)}}{2(\tilde{x}_{Ej} + \tilde{z}_{Ej} \tan \hat{\theta}_{j,1} + c\hat{T}_{j,(1-2)} \sqrt{1 + \tan^2 \hat{\theta}_{j,1}})}, 0, 0 \right]^T \end{aligned}$$

여기에서 $[\tilde{x}_{Ej}, \tilde{y}_{Ej}, \tilde{z}_{Ej}]^T$ 는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_{Ej} \\ \tilde{y}_{Ej} \\ \tilde{z}_{Ej} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_2')^2 + (y_2')^2 + (z_2')^2} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y_2'}{x_2'} \right) - \hat{\phi}_{j,1} \right) \\ \sqrt{(x_2')^2 + (y_2')^2 + (z_2')^2} \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{y_2'}{x_2'} \right) - \hat{\phi}_{j,1} \right) \\ z_2' \end{bmatrix} \quad (18)$$

표 1. 모의실험 파라미터

Table 1. Simulation parameters

Parameters		Value
Carrier frequency		1 GHz
Sampling frequency		10 MHz
Bandwidth		1 MHz
Number of samples		10000
Array antennas		Uniform circular array
Element spacing		0.5 λ
Number of elements		7
Position of sensor#1 (x, y, z)		[-50000, 2000, 1000] m
Position of sensor#2 (x, y, z)		[50000, -1000, 2000] m
Position of emitter	Emitter#1	[-30000, 9000, 4000] m
	Emitter#2	[2000, 15000, 10000] m
	Emitter#3	[28000, 8000, 11000] m
Noise temperature		300 K

j번째 재밍원에 대한 3차원 위치를 추정은 식 (17)에서 식 (16)의 좌표 변환과 위상 회전을 보상하여 계산되며, 이는 식 (19)와 같다.

$$\hat{E}_j = [\hat{x}_{Ej} \cos(\phi_{j,1}), \hat{x}_{Ej} \sin(\phi_{j,1}), \hat{x}_{Ej} \tan(\theta_{j,1})]^T + P_1 \quad (19)$$

$$= [\hat{x}_{Ej} \cos(\phi_{j,1}) + x_1, \hat{x}_{Ej} \sin(\phi_{j,1}) + y_1, \hat{x}_{Ej} \tan(\theta_{j,1}) + z_1]^T$$

식 (19)를 통해 방위각 추정 정확도는 제안된 기법의 2차원 (x-y축) 위치 추정 성능에 영향을 미치고, 양각 추정 정확도는 3차원 위치 추정 성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

III. 모의실험

제안하는 기법의 성능검증은 컴퓨터를 이용한 모의실험을 통해 수행하였다. 모의실험에서 센서의 수는 2개이고, 방향탐지는 첫 번째 센서에서만 수행된다고 가정하였다. 즉, 배열안테나는 첫 번째 센서에만 설치되어 있음을 가정하였다.

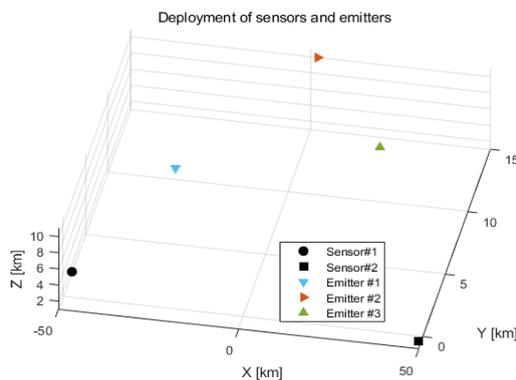
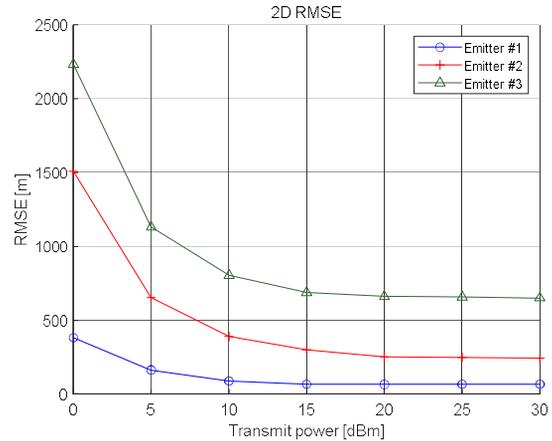
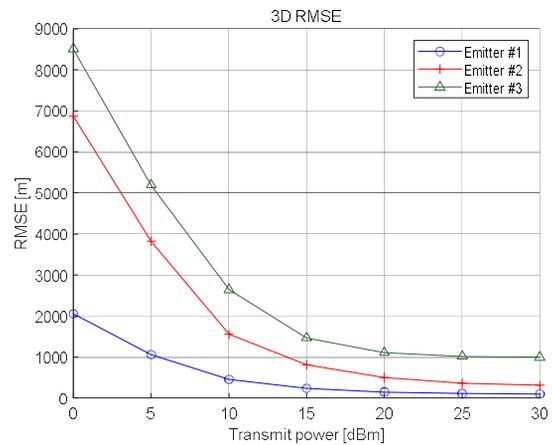


그림 3. 센서 및 재밍원 배치

Fig. 3. Deployment of sensors and emitters



(a) 2D RMSE



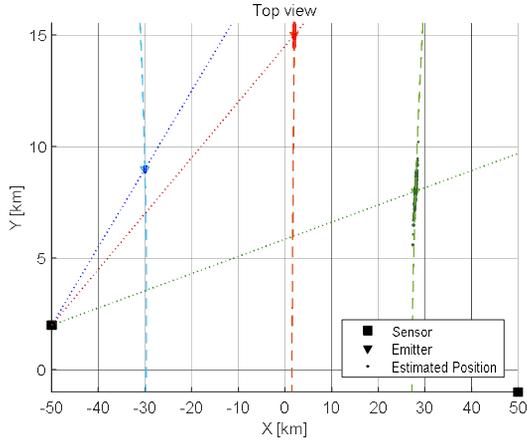
(b) 3D RMSE

그림 4. 위치 추정 성능

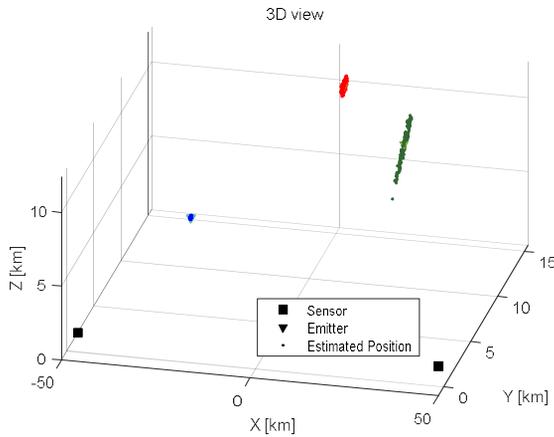
Fig. 4. Performances of position estimation

표 1은 모의실험을 위한 파라미터를 나타낸다. 모의실험에서는 7소자 등간격 원형 어레이를 가정하였으며, 각 소자는 등방성 및 무지향 특성을 가지고 있다고 가정한다. 또한 배열안테나에 수신되는 신호는 평면파를 가정하였고, MUSIC 기반 방향탐지 기법을 적용하였다. 재밍원 수는 3개를 가정하여 모의실험 하였으며, 그림 3은 센서와 재밍원 배치를 나타낸다. 그림 3을 통해 알 수 있듯이 기준 센서(센서 1)와 재밍원 사이의 거리는 재밍원 1이 가장 가깝고, 재밍원 2가 중간 거리이며, 재밍원 3이 가장 멀게 배치되어 있다.

그림 4는 재밍원의 위치 추정 성능을 RMSE(root mean square error)로 나타낸다. 그림 4(a)는 x-y 평면에서의 위치 추정 RMSE를 나타내고, 그림 4(b)는 3차원에서의 위치 추정 RMSE 성능을 나타낸다. 그림 4를 통해 재밍원 1의 위치추정 RMSE가 가장 낮고, 재밍원 3의 위치추정 RMSE가 가장 높은 것을 알 수 있다. 즉, 2D RMSE와 3D RMSE 모두 기준 센서로부터 멀리 위치하는 재밍원의 위치 추정 성능이 점차 저하되는 것을 알 수 있다. 그리고 재밍원의 송신 출력이 증가하면 위치



(a) Results of localization (2D view (top view))



(b) Results of localization (3D view)

그림 5. 위치 추정 결과
Fig. 5. Results of localization

추정 성능이 점차 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 송신 출력이 증가하면 수신 신호 대 잡음비(SNR; signal to noise ratio)가 증가하여 TDOA와 AOA 추정 정확도가 향상되기 때문이다.

그림 5는 재밍원의 송신 출력이 30dBm일 때의 3차원 위치 추정 결과를 x-y 평면에서 나타낸 결과와 3차원에서 나타낸 결과이다. 그림 5를 통해 알 수 있듯이 기존 위치 추정 기술들은 다수의 신호원이 존재하는 경우에 이를 구분하여 위치를 추정할 수 없으나, 제안된 기법은 미상의 다중 신호원이 수신되는 경우에 이를 구분하여 위치 추정이 가능한 것을 알 수 있다. 그림 5(a)에서 재밍원의 추정된 위치 분포를 보면 TDOA 쌍곡선(파선 표시) 상에 위치하는 것을 알 수 있다. 이는 센서와 재밍원 사이의 거리가 멀어지면 AOA 추정 오차에 의해 발생하는 거리 오차가 TDOA 추정 오차에 의해 발생하는 거리 오차보다 크기 때문에 위치 추정에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

그림 6은 재밍원 수 변화에 따른 재밍원 1의 위치 추정 성능을 나타낸다. 이때 추가되는 재밍원 4와 재밍원 5의 위치는 각각 [-27000, 8000, 5000] m, [0, 14000, 13000] m 이다. 그림 6의

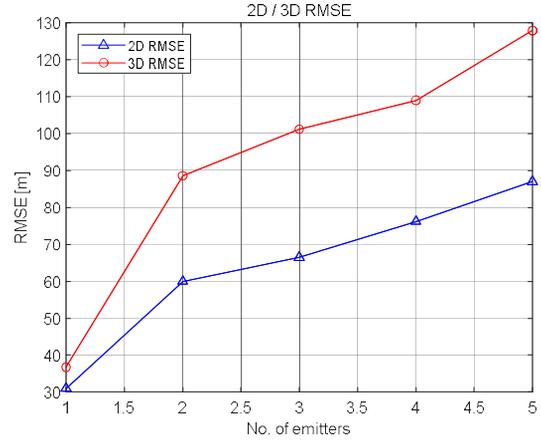


그림 6. 재밍원 수 변화에 따른 RMSE 변화
Fig. 6. RMSE change according to the number of emitters

결과로부터 재밍원 수가 증가하면 2D RMSE와 3D RMSE가 모두 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 재밍원 수가 증가하면 SINR(signal to interference plus noise ratio)이 점차 감소하여 상호상관 성능이 저하되기 때문이다.

IV. 결론

본 논문에서는 배열안테나를 갖는 2개의 센서에 다수의 신호원이 수신되는 경우 3차원 위치 추정 기법을 제안하였으며, 제안된 기법은 TDOA 측정값과 AOA 측정값을 결합한 닫힌 형태 기반 위치 추정기법이다. 기존의 기술은 단일 신호원에 대한 위치 추정만 가능하였으나 제안된 기법은 상호상관과 좌표 변환, 좌표 회전을 이용하여 다중의 미상 신호원을 구분하여 각각의 위치를 추정할 수 있으며, 신호원의 송신 전력이 커지면 위치 추정 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 또한 재밍원 수가 증가하더라도 각 재밍원을 구분하여 위치 추정하는 것을 확인하였다. 그리고 이러한 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해서 확인하였다.

References

- [1] Korea Aerospace Research Institute (KARI). Korean Positioning Systems (KPS) [Internet]. Available: https://www.kari.re.kr/kor/sub03_08_01.do
- [2] J. M. Joo and M. B. Heo, "Feasibility Study on Korea Positioning System (KPS)," *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, Pyeongchang, pp. 937-938, Feb. 2020.
- [3] Elliott D. Kaplan and Christopher J. Hegarty, *Understanding*

GPS: Principles and Applications, 2nd ed. Artech House Publishers, 1996.

- [4] J. C. Liberti and R. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, Prentice Hall PTR, 1999.
- [5] Li Cong and Weihua Zhuang, "Hybrid TDOA/AOA Mobile User Location for Wideband CDMA Cellular Systems," *IEEE Tran. on Wireless Communications*, Vol. 1, No. 3, pp. 439-447, July 2002.
- [6] F. Quo and K. Ho, "A quadratic constraint solution method for TDOA and FDOA localization," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 2588-2591, May 2011.
- [7] H. L. V. Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, Wiley-Interscience, 2002.
- [8] Y. H. Ko, H. I. Kang, C. S. Lee, D. K. Kim, K. J. Kim, and Y. B. Park, "Analysis of Direction Finding, Interference Cancellation, and Beamforming Performance by Array Antenna Pattern Measurement Distance," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 21, No. 6, pp. 593-600, Dec. 2010.



고요한 (Yo-han Ko)

2005년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부, 공학사
2007년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부, 공학석사
2011년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부, 공학박사
2011년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원, 수석연구원
※관심분야 : MIMO-OFDM 시스템, 항법시스템, 위성항법수신기, 디지털 신호처리



부성춘 (Sung-chun Bu)

2002년 2월 : 건국대학교 전자정보통신공학과, 공학사
2004년 2월 : 건국대학교 전자정보통신공학과, 공학석사
2005년 8월 ~ 2007년 3월 : 토필드 연구원
2007년 4월 ~ 2011년 3월 : 코아로직 선임연구원
2011년 4월 ~ 현재 : LIG넥스원, 수석연구원
※관심분야 : 광역보강시스템, 위성항법수신기



이철수 (Chul-soo Lee)

2000년 2월 : 한양대학교 전자공학과, 공학사
2002년 8월 : KAIST 전기및전자공학과, 공학석사
2002년 ~ 2007년 : ETRI, 연구원
2010년 8월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과, 공학박사
2010년 9월 ~ 현재 : LIG넥스원, 수석연구원
※관심분야 : 통신시스템 및 신호처리, 위성항법, 보정항법



임재욱 (Jae-wook Lim)

2010년 2월 : 서울과학기술대학교 전자공학과, 공학사
2012년 2월 : 광운대학교 임베디스소프트웨어공학과, 공학석사
2011년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원, 선임연구원
※관심분야 : 항법시스템, 위성항법수신기, 임베디드시스템



채주희 (Ju-hui Chae)

2015년 8월 : 고려대학교 전기전자전파공학부, 공학사
2017년 8월 : 고려대학교 전기전자공학부, 공학석사
2017년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원, 선임연구원
※관심분야 : 디지털 신호처리, 위치탐지 시스템