

논문 2015-52-1-14

이동 수신기 환경에서 연속된 T/FDOA와 DOA를 이용한 고정 신호원의 위치 추정 방법

(Estimation and Analysis of Two Moving Platform Passive Emitter Location Using T/FDOA and DOA)

박진오*, 이문석*, 박영미**

(Jin-Oh Park[Ⓢ], Moon Seok Lee, and Young-Mi Park)

요약

현대의 수동형 위치 추정(passive emitter localization) 분야에서는 수신기 운용의 효율성을 위해 적은 수의 수신기를 이용한 원거리 신호원의 정밀한 위치추정을 지향한다. 적은 수의 수신기로 정밀한 위치추정을 위해서 연속적이고, 측정 정보들의 복합적 활용을 통해 위치 추정 성능 향상을 기대할 수 있다. 본 논문에서는 제한된 환경의 2개의 이동하는 수신기 환경에서 측정 정보별 이론적 위치추정 성능을 분석하고, 위치추정 성능이 우수할 것으로 예상되는 TDOA (time difference of arrival) 와 FDOA (frequency difference of arrival), 그리고 DOA (direction of arrival) 복합 측정 정보기반으로 비선형 최소자승법 중 하나인 LM (Levenberg-Marquardt) 방법을 이용하여 지상 고정 신호원의 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 구체적으로 TDOA를 이용하여 산출한 방위 모호성이 포함된 DOA들을 이용하여 신호원의 초기 위치를 산출하고, 해당 신호원의 초기 위치와 T/F/DOA를 이용하여 위치추정 성능을 향상 시킨다.

Abstract

Passive emitter localization is preferred to use a small number of receivers as possible for the efficiency of strategic management in the field of modern electronic warfare support. Accurate emitter localization can be expected when utilizing continuous measurable parameters and a appropriate combination of theirs. For this reason, we compare CRLB (Cramer-Rao lower bound) of two moving platform with various measurable parameters to choose a appropriate combination of parameters for a better localization performance. And we propose the passive emitter localization method based on Levenberg-Marquardt algorithm with combined TDOA/FDOA and DOA to achieve better accuracy of emitter localization which is located on the ground and stationary. In addition, we present a method for determining the initial emitter position for LM algorithm's input to avoid the divergence of estimation and local minimum.

Keywords : Electronic warfare support, Passive emitter location, TDOA, FDOA, DOA

* 정회원, LIG넥스원
(LIG Nex1)

** 정회원, 국방과학연구소
(Agency for Defense Development)

Ⓢ Corresponding Author (E-mail: jin5park@lignex1.com)

※ 본 논문은 2012년 국방과학연구소의 “미상신호 위치탐지 및 추적장치”에 대한 연구용역으로 지원되었음.

접수일자: 2014년06월16일, 수정일자: 2014년10월07일
게재확정: 2014년12월24일

I. 서론

수동형 위치 추정분야(passive emitter localization)는 신호원에서 방사되는 신호만을 이용하여, 신호원의 위치를 추정한다^[1~2]. 기존의 신호원의 위치를 찾는 방법은 신호원에서 방사하는 신호의 위상과 세기를 측정하여 방향을 탐지 정보를 기반으로 위치를 추정하는 방법

들이 주를 이루었다^[3~4]. 현재의 신호원의 위치 추정은 디지털 변환기술 및 신호처리 기술, 시각 동기화 기술이 발전함에 따라 장거리 이격된 다수의 수신기들 간에 측정된 신호원의 정보인 신호 도착시간 차(Time Difference of Arrival, TDOA), 혹은 신호 도착 주파수차(Frequency Difference of Arrival, FDOA) 정보를 이용하여 위치를 추정하는 시스템으로 발전하고 있다^[5~6]. 이는 정밀한 TDOA, FDOA의 측정을 바탕으로 하기 때문에 방향탐지 정보를 이용한 위치추정의 경우보다 높은 위치추정 성능을 가진다^[1~2, 5, 7]. 하지만, 다수의 수신기가 원거리 이격된 경우에는 신호원의 도달 범위가 협소할 경우에 일부 수신기에 신호가 수신되지 않아 위치추정이 불가능한 경우가 발생하여, 수신기간 이격거리를 줄이고 적은 수신기를 이용하거나^[8,9] 복합 정보를 이용하여 위치를 추정을 수행하는 방법이 선호되고 있다^[10~12].

적은 수의 수신기를 이용한 위치추정은 지속적으로 TDOA, FDOA, 방향탐지 정보(Direction of Arrival, DOA)를 측정하여 시계열 복합 정보를 이용하여, 정밀한 신호원의 위치추정이 가능한 것으로 알려져 있다^[13]. 반복적으로 신호원의 위치를 갱신하는 비선형 최소자승법(non-linear least squares)은 위치추정 성능이 우수하지만, 해당 방법은 잘못된 국소적 위치추정(local minimum)의 문제 혹은 위치 추정 불가(divergence)의 문제점을 가질 수 있는 것으로 알려져 있다^[14]. 또한, 이동하는 수신기의 경우에는 수신기의 위치, 이동방향 그리고 활용하는 정보의 종류에 따라 목표로 한 추정범위 내에서 신호원의 위치추정오차의 이론적 하한(Cramer-Rao lower bound, CRLB) 및 추정오차가 매우 큰 영역이 필연적으로 존재한다.

본 논문에서는 신호원의 수신 확률을 높이고 정밀한 위치추정을 위해 2개의 이동하는 수신기만을 이용하여 위치추정 범위 및 정보 측정성능을 가정한 환경에서 위치추정오차가 낮도록 우선적으로 CRLB를 통해 측정 가능한 정보를 단독/복합적으로 분석하도록 한다. 구체적으로 위치추정오차는 목표로 한 추정범위 내에서의 신호원 간 거리대비 위치추정 오차의 비율(RMSE(%))과 추정범위 대비 추정불가 영역의 비율(Blind zone Ratio(%))을 이용하여 분석하도록 한다.

그리고, 분석 결과를 기반으로 위치추정 성능을 높일 수 있는 복합 정보들을 기반으로 비선형 최소자승법을

이용한 위치추정 시 나타나는 잘못된 국소적 위치추정 및 추정 불가를 줄이기 위해, TDOA를 이용한 DOA 정보로 신호원의 초기 위치값으로 활용하고, 복합정보들을 이용하여 비선형 최소자승법의 한 종류인 LM (Levenberg-Marquardt) 방법을 신호원의 위치 추정 방법으로 활용하여 위치추정을 수행하는 방법을 제안토록 한다.

본 논문의 구성은 II장에서 이동하는 수신기 기반의 3차원 시계열 TDOA, FDOA, DOA 정보모델을 설명하고, III장에서는 설정한 수신기의 운용환경에서 CRLB를 이용하여 단독/복합 정보모델별 x-y축에 대한 위치추정 오차 하한을 제시한다. IV장에서는 CRLB로부터 위치추정 오차가 작은 정보모델을 선택하고, 제안하는 알고리즘을 설명한다. V장에서는 이를 이용하여 위치추정 실험을 진행하고, 오차 성능을 제시 및 비교/분석한다. 끝으로 VI장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. T/FDOA 및 DOA 3차원 정보모델

본 장에서는 이동하는 2개의 수신기에서 측정된 TDOA, FDOA 그리고 DOA와 신호원의 관계를 설명한다. 그림 1과 같이 2개의 수신기에서 한 시점에 1쌍의 TDOA, FDOA 그리고 DOA가 측정 가능하지만, 신호원의 위치 추정에는 부족 결정(under-determined case) 상황이기 때문에 연속적으로 정보(TDOA, FDOA, DOA)들을 측정하는 것을 가정하고, 각 정보별 모델을 사전 설명한다^[13].

각 i, j 번째 수신기의 위치는 $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, $\mathbf{r}_j = [x_j, y_j, z_j]^T$ 이며, 속도는 $\mathbf{r}'_i = [x'_i, y'_i, z'_i]^T$, $\mathbf{r}'_j = [x'_j, y'_j, z'_j]^T$ 으로 등속이동으로 가정한다. 시

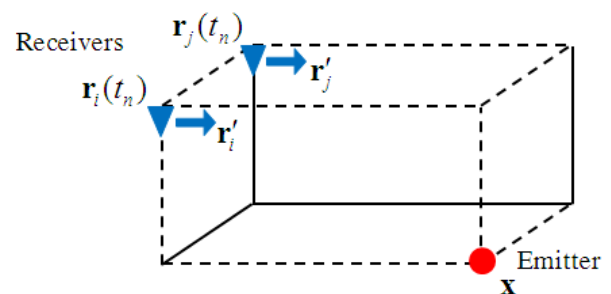


그림 1. 이동 수신기와 고정 신호원의 배치.
Fig. 1. The geometry of receivers and emitter.

간에 따른 수신기의 위치는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_i(t_n) &= \mathbf{r}_i(t_0) + \mathbf{r}_i' n t_\Delta, \\ \mathbf{r}_j(t_n) &= \mathbf{r}_j(t_0) + \mathbf{r}_j' n t_\Delta \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 t_0 는 최초의 시간이고, $\mathbf{r}_i(t_0)$ 와 $\mathbf{r}_j(t_0)$ 는 최초 수신기의 위치이다. n, t_Δ 은 각각 정보의 수집 순번, 정보의 수집시간 간격이다.

1. TDOA

신호원의 위치 $\mathbf{x} = [x_e, y_e, z_e]^T$ 와 i, j 번째 수신기의 위치 $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ 와의 거리 관계는 식 (2)과 같다.

$$\begin{aligned} d_i(t_n) &= \sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i(t_n))^T (\mathbf{x} - \mathbf{r}_i(t_n))}, \\ d_j(t_n) &= \sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{r}_j(t_n))^T (\mathbf{x} - \mathbf{r}_j(t_n))} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 t_n 은 n 번째 시간이고, d_i 과 d_j 는 각각 신호원과 \mathbf{r}_i 의 거리, 신호원과 \mathbf{r}_j 의 거리이다. 두 수신기간의 TDOA는 식 (3)과 같으며 신호원의 위치와 수신기의 위치 관계로 형성됨을 확인할 수 있다.

$$TDOA_{ji}(t_n) = \frac{d_j(t_n) - d_i(t_n)}{c} \quad (3)$$

여기서 c 는 전파의 속도이다.

2. FDOA

신호원 \mathbf{x} 와 수신기 $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ 의 도플러 주파수는 식 (4)와 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} \delta\nu_i(t_n) &= \frac{f_0}{c} \left(\frac{(\mathbf{x}' - \mathbf{r}_i')^T (\mathbf{x} - \mathbf{r}_i(t_n))}{d_i(t_n)} \right) \\ \delta\nu_j(t_n) &= \frac{f_0}{c} \left(\frac{(\mathbf{x}' - \mathbf{r}_j')^T (\mathbf{x} - \mathbf{r}_j(t_n))}{d_j(t_n)} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{x}' 는 신호원의 속도, f_0 는 신호원의 반송주파수이다. 두 수신기간 $FDOA_{ji}$ 는 식 (5)와 같으며, 신호원과 수신기의 위치와 속도, 그리고 송신주파수에 영향을 받음을 확인할 수 있다. 우리는 신호원의 속도는 고정이고, 신

호원의 반송 주파수는 사전정보가 있다고 가정한다.

$$FDOA_{ji}(t_n) = \delta\nu_j(t_n) - \delta\nu_i(t_n) \quad (5)$$

3. DOA

신호원과 수신기간의 DOA의 관계는 Tangent half-angle 공식을 이용하여, 식 (6)과 같이 정의한다. DOA는 TDOA를 이용한 방향탐지에 의해 확보할 수 있으며, 두 수신기의 중점을 방향탐지 원점으로 가정한다.

$$\begin{aligned} DOA(t_n) &= 2\arctan\left(\frac{\sqrt{x_d^2 + y_d^2} - x_d}{y_d}\right), \\ x_d &= x_e - x_c(t_n), y_d = y_e - y_c(t_n), \\ x_c &= \frac{x_i + x_j}{2}, y_c = \frac{y_i + y_j}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

III. CRLB를 이용한 정보모델별 위치오차 분석

본 장에서는 2개의 이동하는 수신기에서 측정하는 TDOA, FDOA 그리고 DOA를 단독 혹은 복합적으로 이용하여 불편 추정기(un-biased estimator)의 이론적 최소의 분산을 의미하는 CRLB(Cramer-Rao lower bound)를 이용하여 위치추정 오차 분석방법을 설명한다. 그리고 특정 수신기 운용환경에서 위치추정 오차를 수신기와 신호원 간 거리대비 RMSE(root mean square error)의 비율인 RMSE %로 표현하여 분석하도록 한다. 이는 신호원의 거리에 대한 상대적인 오차관계에 주안점을 두어 분석하기 위함이다.

1. 정보모델별 위치추정오차 분석방법

CRLB는 추정 파라미터의 총 정보량을 의미하는 FIM(Fisher information matrix)와 역행렬 관계를 가지며, FIM은 식 (7)과 같이 정의한다^[15].

$$\mathbf{J} = \mathbf{H}^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{H} \quad (7)$$

여기서 \mathbf{H} 는 신호원의 위치 \mathbf{x} 에 대한 자코비안 행렬 (Jacobian matrix)로서 각 정보별 자코비안 행렬은 식 (8)~(13)과 같이 정의하고^[13], N 은 총 정보수집 개수이다. 그리고 $\boldsymbol{\Sigma}$ 은 각 정보별 공분산 행렬로 독립적이고

가우시안(Gaussian) 분포를 가진다고 가정하며, 식 (14)~(19)와 같이 정의한다^[13].

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{TDOA} &= \frac{\delta \mathbf{TDOA}}{\delta \mathbf{x}} \\ \mathbf{TDOA} &= [TDOA_{ji}(t_0), TDOA_{ji}(t_1), \dots, \\ & \quad TDOA_{ji}(t_{N-1})]^T \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{TDOA,DOA} &= \begin{bmatrix} \frac{\delta \mathbf{TDOA}}{\delta \mathbf{x}} \\ \frac{\delta \mathbf{DOA}}{\delta \mathbf{x}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{DOA} &= [DOA(t_0), DOA(t_1), \dots, DOA(t_N)]^T \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{FDOA} &= \frac{\delta \mathbf{FDOA}}{\delta \mathbf{x}} \\ \mathbf{FDOA} &= [FDOA_{ji}(t_0), FDOA_{ji}(t_1), \dots, \\ & \quad FDOA_{ji}(t_{N-1})]^T \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{H}_{FDOA,DOA} = \begin{bmatrix} \frac{\delta \mathbf{FDOA}}{\delta \mathbf{x}} \\ \frac{\delta \mathbf{DOA}}{\delta \mathbf{x}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{H}_{TFDOA} = \begin{bmatrix} \frac{\delta \mathbf{TDOA}}{\delta \mathbf{x}} \\ \frac{\delta \mathbf{FDOA}}{\delta \mathbf{x}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{H}_{TFDOA,DOA} = \begin{bmatrix} \frac{\delta \mathbf{TDOA}}{\delta \mathbf{x}} \\ \frac{\delta \mathbf{FDOA}}{\delta \mathbf{x}} \\ \frac{\delta \mathbf{DOA}}{\delta \mathbf{x}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\Sigma_{TDOA} = \text{diag}(\text{var}(\mathbf{TDOA})) \quad (14)$$

$$\Sigma_{TDOA,DF} = \text{diag}(\text{var}(\mathbf{TDOA}), \text{var}(\mathbf{DOA})) \quad (15)$$

$$\Sigma_{FDOA} = \text{diag}(\text{var}(\mathbf{FDOA})) \quad (16)$$

$$\Sigma_{FDOA,DF} = \text{diag}(\text{var}(\mathbf{FDOA}), \text{var}(\mathbf{DOA})) \quad (17)$$

$$\Sigma_{TFDOA} = \text{diag}(\text{var}(\mathbf{TDOA}), \text{var}(\mathbf{FDOA})) \quad (18)$$

$$\Sigma_{TFDOA,DOA} = \text{diag}(\text{var}(\mathbf{TDOA}), \text{var}(\mathbf{FDOA}), \text{var}(\mathbf{DOA})) \quad (19)$$

여기서 $\text{var}()$ 는 측정된 정보의 분산이고, $\text{diag}()$ 는 대각행렬이다.

이론적으로 달성할 수 있는 위치추정 오차의 분산 하한을 나타내는 CRLB를 x-y축으로 2차원 투영(Projection)하기 위해 식 (20)을 이용하고^[10], 이는 2차원 모델로 오차의 분산 하한을 나타내는 단편(slice)과는 구분된다^[9].

$$\mathbf{CRLB}_P = \mathbf{P} \mathbf{J}^{-1} \mathbf{P}^T \quad (20)$$

여기서 \mathbf{P} 는 투영행렬로 식 (21)과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

\mathbf{CRLB}_P 를 이용하여 신호원에 대한 위치추정 오차를 나타내는 CEP_{xy} 는 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다^[15].

$$CEP_{xy} = \frac{3}{4} \sqrt{k} \sqrt{\text{trace}(\mathbf{CRLB}_P)} \quad (22)$$

여기서 $\text{trace}()$ 는 대각행렬의 합을 나타낸다. k 는 오차타원 내부에 위치추정 값이 존재할 확률인 P_e 와 상관관계를 가지는 오차타원의 크기를 나타내며, 식 (23)과 같은 관계를 갖는다^[9].

$$k = -2 \ln(1 - P_e), 0 < P_e < 1 \quad (23)$$

여기서, P_e 는 CEP의 정의에 따라 0.5로 설정한다. 신호원과 수신기 간 거리의 비율 오차인 RMSE(%)로 변환하기 위해 식 (24)와 같이 CEP_{xy} 를 이용하여 나타낸다.

$$RMSE(\%) = \frac{1.2 CEP_{xy}}{d} \times 100, \quad (24)$$

$$d = \sqrt{(x_e - x_c)^2 + (y_e - y_c)^2}$$

2. 수신기 운용환경에서 정보별 위치추정오차 분석

본 절에서는 이동하는 2개 수신기의 운용환경과 정보모델의 분산 오차를 설정하여 단독 및 복합 정보모델에 대해 목표한 추정범위 내에서 예측되는 위치추정 오차에 대한 CRLB 분석을 수행한다. 분석과정에서 위치추정 오차가 RMSE 100% 이상일 경우는 위치추정 불가영역으로 가정한다.

III장에서 제시한 정보모델들을 기반으로 표 1과 같은 수신기 운용환경에서의 지상의 고정 신호원에 대한 위치추정오차 및 불가영역을 산출한다. 2개의 수신기는 5km 이격되어 170m/s의 속력으로 0도 방향으로 이동하고, 정보들의 분산 오차는 각각 TDOA 15ns, FDOA 0.3Hz, DOA 1도로 가정한다. 또한 추정범위는 수신기

표 1. 2개의 수신기 운용환경 시나리오 1
Table 1. Parameter for simulation scenario #1.

구 분	값
r_i	[0, 2.5, 2] km
r_j	[0, -2.5, 2] km
r'_i	170 m/s, x축 +방향
r'_j	170 m/s, x축 +방향
TDOA 정확도(표준편차)	15 ns
FDOA 정확도(표준편차)	0.3 Hz
DOA 정확도(표준편차)	1 deg.
탐지거리	± 250 km
수집 샘플	16개, 1초 간격

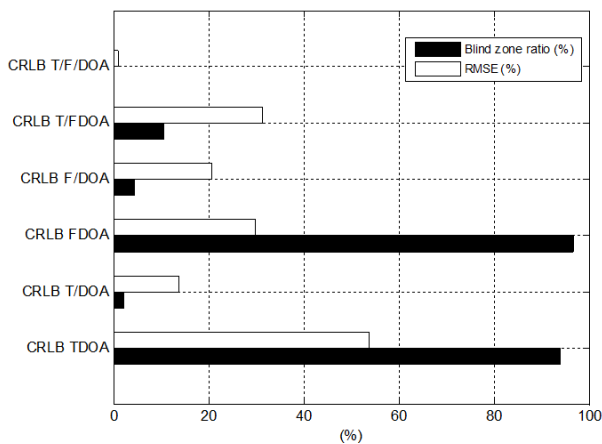


그림 2. 정보별 추정불가영역 비율 및 위치추정오차 비율.

Fig. 2. Comparison blind zone ratio and RMSE % according to measurable parameters.

간 중점기준 ± 250 km의 범위를 가지며, 1초마다 동일 신호원에 대한 정보를 수집하여 16개 수집 완료시에 위치추정을 수행하는 것으로 가정한다.

위치추정을 위해 그림 2와 같이 단독 정보 혹은 복합 정보들로 ± 250 km 위치추정범위에서 위치추정 불가영역 비율 Blind zone ratio %와 평균 위치추정 오차비율 RMSE %로 표현하였다.

그림 2에서 T/FDOA와 DOA를 이용한 위치추정의 이론적 오차의 하한은 평균 RMSE 약 1%이고, 위치추정 불가영역의 비율은 약 0% 으로서, 단독 정보 혹은 다른 복합 정보들을 이용한 위치추정보다 낮은 위치추정오차와 추정불가영역의 비율이 적다.

IV. TDOA, FDOA, DOA와 신호원의 초기 위치를 이용한 LM방법 기반의 위치추정

본 장에서는 이론적 위치추정 오차하한이 가장 작은 TDOA, FDOA, DOA 정보를 이용하여 위치추정을 수행하는 현실적인 알고리즘을 제안한다.

본 논문에서는 비선형 최소자승법 중 Gauss-Newton 방법의 빠른 수렴 속도와 Gradient Descent 방법의 안정적 수렴의 특성을 가지는 LM 방법^[15]을 선택하여 위치추정을 수행한다. 그리고, 비선형 최소자승법이 가지는 발산 및 국소적 잘못된 위치추정의 확률을 낮추기 위해서 TDOA를 이용한 신호원의 DOA와 수신기의 수신감도에 의한 최대 위치추정범위를 이용하여 신호원의 초기 위치를 지정하는 방법을 제안한다.

1. TDOA를 이용한 신호원 초기 위치 후보군 선정

신호원이 원거리에 있다고 가정했을 때는 그림 3과 같이 신호원에서 방사되는 신호의 파면(wave front)은 거의 직선이 되고, 0~180도 범위만 방향탐지를 수행한다면, 식 (25)로부터 유도하여 식 (26)와 같이 DOA를 산출할 수 있다. 여기서, B는 r_i 와 r_j 간의 거리이다.

$$TDOA_{ji}(t_n) = \frac{B \sin(DOA(t_n))}{c} \quad (25)$$

$$DOA(t_n) = \sin^{-1} \left(\frac{TDOA_{ji}(t_n) c}{B} \right) \quad (26)$$

하지만, 0~360도의 범위에 대해서는 DOA의 모호성

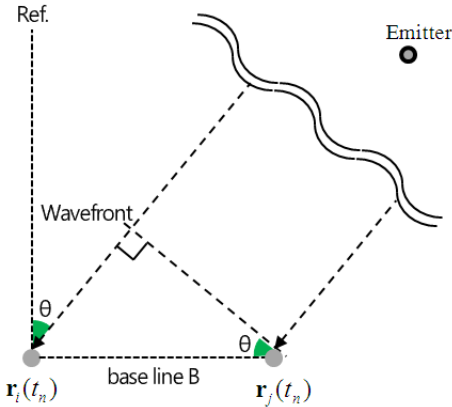


그림 3. TDOA를 이용한 방향탐지 개념.
Fig. 3. Concept of direction finding using TDOA.

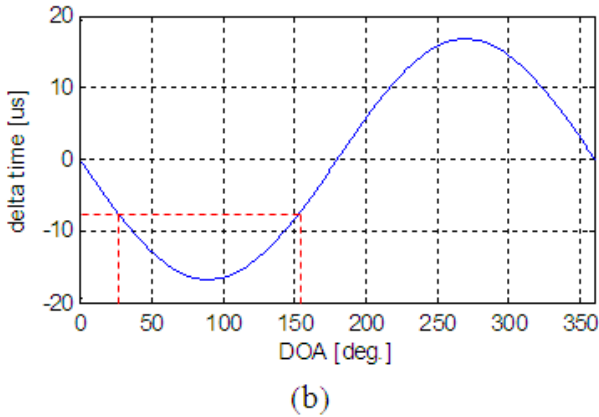
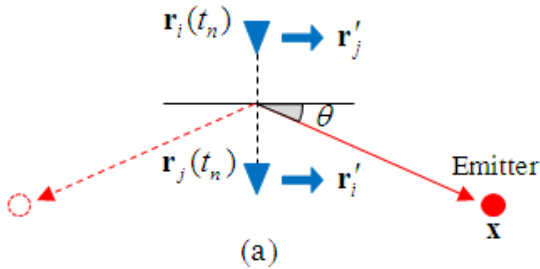


그림 4. TDOA에 따른 DOA 모호성 발생의 예:
(a) TDOA 측정값에 따른 신호원의 DOA 모호성, (b) 서로 다른 방위에서 같은 TDOA 발생

Fig. 4. Example of DOA Ambiguity when using TDOA DF: (a), (b) TDOA DF ambiguity according to measured TDOA.

이 발생하게 된다. 예를 들면 그림 4 (b)와 같이 서로 다른 방위에 대해 동일 TDOA를 갖게 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 360도 범위 내에서 2개의 DOA가 나오는 것을 의미하고, 이 중 하나가 실제 DOA이고 다른 하나는 모호성이 발생한 DOA이다. 이는 각각

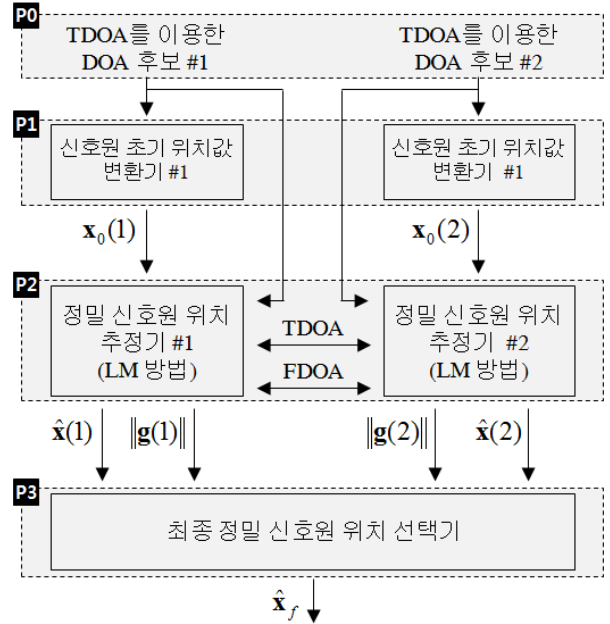


그림 5. 제안한 위치추정 방법.
Fig. 5. The proposed algorithm for emitter localization.

$DOA_1(t_n)$ 과 $DOA_2(t_n)$ 로 표현하며, 그림 5와 같이 제안하는 알고리즘의 P0단계에 해당된다.

우리는 표 1과 같이 수신 운용환경에서 최대 위치추정범위 R_{max} 를 250km로 가정했는데, TDOA를 이용하여 도출한 2개의 DOA와 최대 위치추정범위를 결합하여 LM방법의 신호원의 초기 위치로 식 (27)과 같이 지정하며, 그림 5의 P1에 해당된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0(1) &= \left[\frac{R_{max}}{2} \cos(DOA_1(t_n)), \right. \\ &\quad \left. \frac{R_{max}}{2} \sin(DOA_1(t_n)), 0 \right]^T \\ \mathbf{x}_0(2) &= \left[\frac{R_{max}}{2} \cos(DOA_2(t_n)), \right. \\ &\quad \left. \frac{R_{max}}{2} \sin(DOA_2(t_n)), 0 \right]^T \end{aligned} \quad (27)$$

2. TDOA, FDOA, DOA와 신호원의 초기 위치를 이용한 LM방법 기반의 위치추정

본 절에서는 위치추정의 안정성과 수렴성을 위해 Gauss-Newton 방법과 Gradient descent 방법의 장점을 가진 LM 방법을 이용하여 위치 추정을 수행하도록 한다.

TDOA, FDOA 그리고 DOA의 측정데이터는 식 (28)

~(30)과 같이 정의하고, 이를 이용한 연속적인 측정데이터는 식 (31)과 같이 표현한다.

$$TDOA_{ji}(t_n)_m = TDOA_{ji}(t_n) + \epsilon(t_n)_{TDOA} \quad (28)$$

$$FDOA_{ji}(t_n)_m = FDOA_{ji}(t_n) + \epsilon(t_n)_{FDOA} \quad (29)$$

$$DOA(t_n)_m = DOA(t_n) + \epsilon(t_n)_{DOA} \quad (30)$$

여기서 $\epsilon(t_n)_{TDOA}$, $\epsilon(t_n)_{FDOA}$ 는 각각 독립적인 TDOA의 측정오차, FDOA의 측정오차이고, 가우시안 확률분포를 가진다고 가정한다. $\epsilon(t_n)_{DOA}$ 는 DOA의 측정 오차이고, TDOA를 이용한 DOA이므로 식 (25)와 같은 상관관계를 가진다.

$$m = \begin{bmatrix} TDOA_m \\ FDOA_m \\ DOA_m \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} TDOA_m &= trans([TDOA_{ji}(t_0)_m, \\ &\quad TDOA_{ji}(t_1)_m, \\ &\quad \dots, TDOA_{ji}(t_{N-1})_m]) \\ FDOA_m &= trans([FDOA_{ji}(t_0)_m, \\ &\quad FDOA_{ji}(t_1)_m, \\ &\quad \dots, FDOA_{ji}(t_{N-1})_m]) \\ DOA_m &= trans([DOA(t_0)_m, \\ &\quad DOA(t_1)_m, \\ &\quad \dots, DOA(t_{N-1})_m]) \end{aligned}$$

여기서, $trans()$ 는 전치행렬을 나타낸다. TDOA, FDOA, DOA의 수학적 모델은 식 (32)과 같이 $M(x)$ 로 표현한다.

$$\begin{aligned} M(x) &= \begin{bmatrix} TDOA \\ FDOA \\ DOA \end{bmatrix} \\ TDOA &= trans([TDOA_{ji}(t_0), \\ &\quad TDOA_{ji}(t_1), \\ &\quad \dots, TDOA_{ji}(t_{N-1})]) \\ FDOA &= trans([FDOA_{ji}(t_0), \\ &\quad FDOA_{ji}(t_1), \\ &\quad \dots, FDOA_{ji}(t_{N-1})]) \\ DOA &= trans([DOA(t_0), \\ &\quad DOA(t_1), \\ &\quad \dots, DOA(t_{N-1})]) \end{aligned} \quad (32)$$

begin

$$k = 0, \nu = 2, \mathbf{x} = \mathbf{x}_0$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{J}(\mathbf{x})^T \mathbf{J}(\mathbf{x}), \mathbf{g} = \mathbf{J}(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

$$found = (\|\mathbf{g}\|_\infty \leq \epsilon_1), \mu = \tau \cdot \max(diag(\mathbf{A}))$$

while ((*not found*) and ($k < k_{max}$))

$$k = k + 1; \mathbf{h}_{lm} = -(\mathbf{A} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{g}$$

if $\|\mathbf{h}_{lm}\| \leq \epsilon_2(\|\mathbf{x}\| + \epsilon_2)$

found = true

else

$$\mathbf{x}_{new} = \mathbf{x} + \mathbf{h}_{lm}$$

$$\rho = \frac{0.5(\mathbf{f}(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x})) - 0.5(\mathbf{f}(\mathbf{x}_{new})^T \mathbf{f}(\mathbf{x}_{new}))}{0.5\mathbf{h}_{lm}(\mu\mathbf{h}_{lm} - \mathbf{g})}$$

if $\rho > 0$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_{new}$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{J}(\mathbf{x})^T \mathbf{J}(\mathbf{x}); \mathbf{g} = \mathbf{J}(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

found = ($\|\mathbf{g}\|_\infty \leq \epsilon_1$)

$$\mu = \mu \cdot \max\left(\frac{1}{3}, 1 - (2\rho - 1)^3\right); \nu = 2$$

else

$$\mu = \mu \cdot \nu; \nu = 2\nu$$

end

end

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}$$

end

그림 6. 위치추정을 위한 LM 방법.

Fig. 6. LM algorithm for emitter localization.

LM 방법의 비용함수 $f(x)$ 는 식 (33)과 같이 표현하고, LM 방법은 그림 6^[15]과 같이 표현한다.

$$f(x) = M(x) - m \quad (33)$$

그림 6에서 ϵ_1 는 LM 방법의 종료 조건을 나타내는 상수이고, ϵ_2 는 단계 크기이며, τ 와 k_{max} 는 각각 사용자 정의 상수, 알고리즘 최대 반복 횟수이다.

그리고, $J(x)$ 는 $f(x)$ 의 자코비안(jacobian) 행렬이다. 그림 5의 P2와 같이 각각의 LM방법을 이용한 정밀 신호원 추정기에 식 (27)의 $x_0(1)$ 과 $x_0(2)$ 를 신호원의 초기 위치로 설정하고, 해당 방향의 DOA_1 와 DOA_2 를 설정한다. 그리고, TDOA와 FDOA 정보를

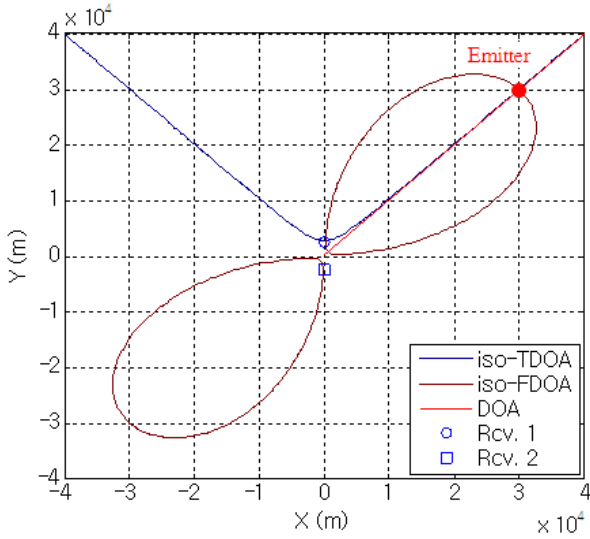


그림 7. 수신단과 신호원 관계에 의한 LOP.
Fig. 7. LOP between Receivers and emitter.

입력으로 갖는다. 출력은 각각 추정된 신호원의 위치 $\hat{\mathbf{x}}(1)$ 과 $\hat{\mathbf{x}}(2)$ 를 가지고, 알고리즘의 모델과 측정 정보 간의 매칭 정도를 나타내는 잔차들(residuals)의 절대 값인 $\|\mathbf{g}(1)\|$, $\|\mathbf{g}(2)\|$ 를 출력하며, 이 값이 작을수록 모델과 측정 정보들 간에 정합도가 큰 것을 의미한다. 이런 잔차들의 의미에서 착안하여 그림 5의 P3에서는 각각의 정밀 신호원 추정기에서 출력되는 $\|\mathbf{g}(1)\|$ 과 $\|\mathbf{g}(2)\|$ 를 비교하여 상대적으로 작은 값을 선택하고, 그에 따른 신호원의 위치값을 선택하여 최종 신호원 위치 추정값인 $\hat{\mathbf{x}}_f$ 를 출력하도록 제안한다. 여기서 적절히 DOA와 TDOA, FDOA를 선택한다면, 예를 들어 그림 7과 같은 형상의 LOP(Line of Position)을 가질 수 있다.

V. 모의 실험 및 결과 비교/분석

본 장에서는 제안하는 위치 추정 방법과 다른 방법을 이용하여 위치추정 실험을 진행하여 오차 성능, 탐지불가 영역, 그리고 계산량을 제시 및 분석/비교한다.

먼저, 제안한 알고리즘에서 TDOA를 이용한 DOA 측정을 표 1과 같이 TDOA 15ns 정확도로 모의실험을 500회 반복 수행하면, DOA RMSE는 그림 8과 같다. 원점에서 x축에 수직이 되는 영역을 제외하면 0.1~1도의 RMS 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 단, 이 때는 방탐 모호성이 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

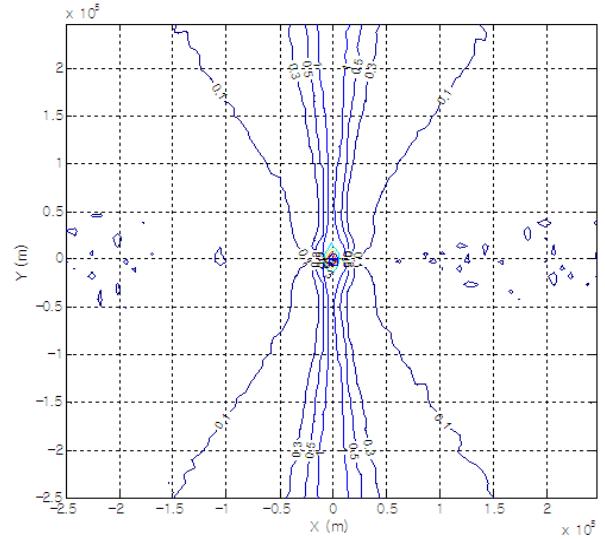
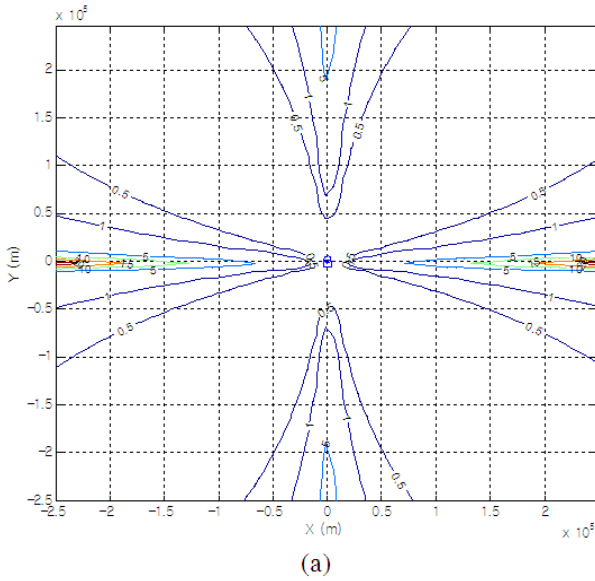


그림 8. 운용환경 #1에 따른 TDOA를 이용한 방탐 오차.
Fig. 8. DOA RMS for the scenario #1 using TDOA.

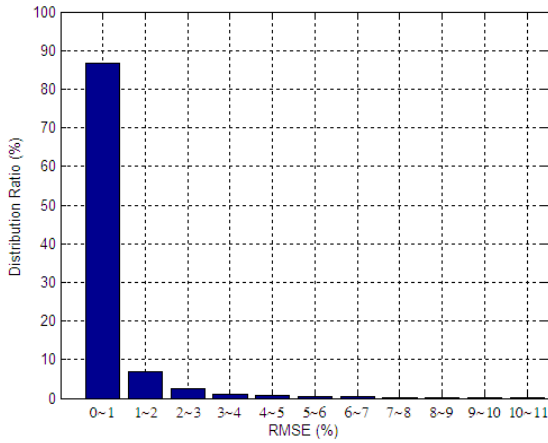
표 1과 같이 수신기간 5km를 이격하고, 170m/s의 속력으로 같은 방향으로 이동하는 운용환경에서 ± 250 km의 위치 추정범위에서 1초마다 16개의 정보를 수집한다고 가정할 때 CRLB를 이용한 위치 추정 하한 RMSE (%)는 그림 9와 같다. RMSE 0~1%를 차지하는 비율이 그림 9 (b)와 같이 전체 위치추정 영역 대비 약 87%를 차지하는 것을 알 수 있고, 그림 11 (a)의 CRLB T/F/DOA 항목과 같이 전체 위치추정 영역에서 위치추정 오차는 평균 약 RMSE 1%를 가진다.

같은 운용환경과 정보 측정 정확도를 가질 때, 제안한 알고리즘에 의한 위치 추정 RMSE (%)와 계산량 비교를 위해 모의 실험을 100회 반복하였으며, 그 결과는 그림 10, 11과 같다. RMSE 0~1%를 차지하는 비율이 그림 10 (b)와 같이 전체 위치추정 영역 대비 약 59%를 차지하는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 11 (a) Proposed T/F/DOA 항목과 같이 위치추정 불가영역은 약 0.1%를 차지하고, 이를 제외한 위치추정 영역에서 평균 약 RMSE 2.3%를 가지는 것을 확인할 수 있다.

제안한 알고리즘의 탐지영역에 따른 성능을 분석하면, 그림 8과 같이 TDOA에 의한 방탐 오차는 원점에서 x축에 수직이 되는 영역에서 크게 나기 때문에, 여기서 나온 DOA를 이용하는 제안한 알고리즘의 결과인 그림 10 (a)에는 원점을 지나는 x축의 수직인 영역에서 상대적으로 높은 위치 추정 오차를 갖는 것으로 분석된다. 또한, CRLB에서 가정한 DOA 정확도와 TDOA에



(a)



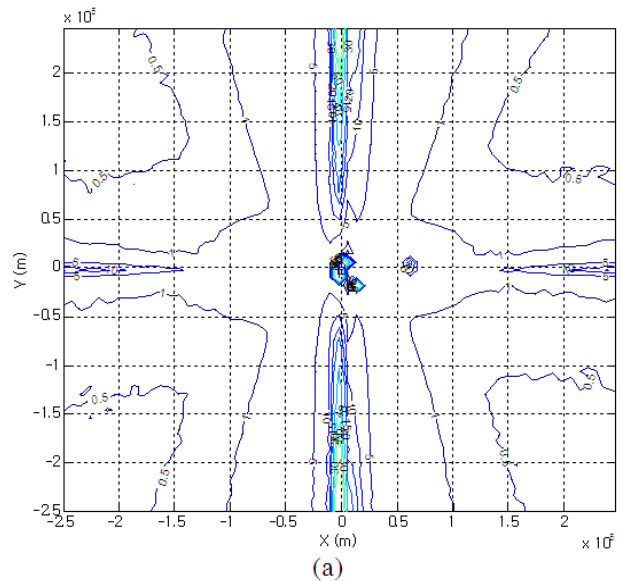
(b)

그림 9. T/F/DOA 정보 기반의 CRLB를 이용한 위치 추정 오차 하한 RMSE (%): (a) RMSE (%) 등고선, (b) 추정 범위내의 RMSE (%)의 비율에 따른 히스토그램

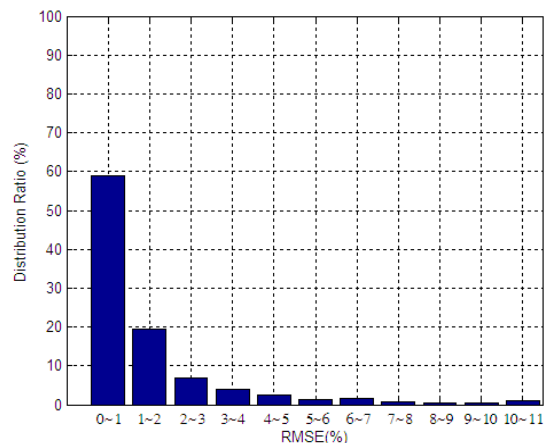
Fig. 9. CRLB RMSE (%) for the scenario #1 using T/F/DOA/DOA: (a) Contour of RMSE (%), (b) Histogram of RMSE (%)

의한 DOA 실제 정확도의 차이가 있지만, 그림 9 (a)와 그림 10 (a)는 목표한 위치추정 범위에서 유사한 위치 추정 오차의 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 11 (a) T/F/DOA w/o init pos. 항목과 같이 신호원의 위치를 원점으로 설정하고 T/F/DOA를 이용하여 위치를 추정하는 경우에는 위치추정 불가영역이 약 19% 차지하고, 이를 제외한 영역의 평균 위치 추정오차는 약 RMSE 68%를 차지한다. 이는 제안한 방법에서의 2.3% RMSE보다 약 65% p 성능저하를 갖는 것을 의미한다. 또한, 제안한 위치추정 방법은 원점을 초기



(a)



(b)

그림 10. T/FDOA/DOA 정보 기반의 제안한 방법을 이용한 위치 추정 오차 RMSE (%): (a) RMSE (%) 등고선, (b) 추정 범위내의 RMSE (%)의 비율에 따른 히스토그램

Fig. 10. RMSE (%) for the scenario #1 using T/FDOA/DOA: (a) Contour of RMSE (%), (b) Histogram of RMSE (%)

위치 값으로 설정한 방법 대비 위치추정 불가영역은 약 19% p 향상 되어 위치추정 가능구역이 증가하는 것을 의미한다. 그리고, 그림 11 (a) T/F w/o init pos. 항목과 같이 신호원의 위치를 원점으로 설정하고 T/FDOA만을 이용한 위치 추정의 경우에는 위치추정 불가영역이 약 51% 차지하고, 이를 제외한 탐지영역의 평균 위치 추정오차는 약 RMSE 99%를 가진다.

계산량을 비교하면 그림 11 (b)와 같이 제안한 알고리즘이 시간/공간 복잡도가 가장 높지만 신호원의 위치를 원점으로 설정하고 T/F/DOA를 이용한 경우에 비해

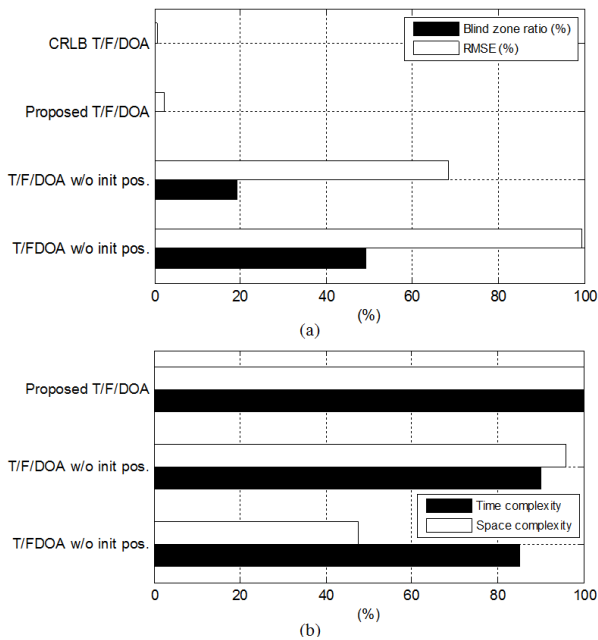


그림 11. CRLB 및 제안한 알고리즘의 초기값에 따른 비교

Fig. 11. Comparison RMSE % and complexity with proposed algorithm (proposed T/F/DOA), LM method without initial emitter position (T/F/DOA, T/FDOA): (a) RMSE %, (b) Complexity

시간/공간 복잡도가 각각 약 12% p, 4% p 높지만, 위치 추정 성능이 65% p 개선된 것을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 2개의 이동하는 수신기의 운용 환경에서 CRLB를 이용한 위치추정 성능 분석을 통해 고정 신호원의 위치추정 성능이 가장 좋은 TDOA, FDOA 그리고 DOA 정보를 이용하여 비선형 최소자승법 기반으로 신호원의 초기 위치를 입력하여 위치를 추정하는 방법을 제안하였으며, 이는 초기값을 원점으로 하는 방법에 비해 평균 위치추정 오차의 66% p의 향상과 위치추정 불가영역 19% p 향상을 보인다. 이는 계산량 증가에 비해 높은 위치추정 효율을 갖는 것을 의미한다. 부가적으로 본 논문은 실제 활용시 별도의 방향탐지 장비 없이 TDOA기반으로 DOA를 활용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

REFERENCES

- [1] Richard A. Poisel, *Electronic Warfare Target Location Methods*, Artech House, 2005.
- [2] David L. Adamy, *EW 102: A Second Course in Electronic Warfare*, Artech House, 2004.
- [3] P.W. East, "Design techniques and performance of digital IFM," *IEE Proc.-F Communications, Radar and Signal Processing*, vol. 129, no.3, pp 154-163, Jun. 1982.
- [4] P.R. Mahapatra, "Emitter Location Independent of Systematic Errors in Direction Finders," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, AES-16 (6) 851-855, Nov. 1980.
- [5] Andrea De Martino, *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, 2012.
- [6] J. Park, W. Lee, B. You, C. Kook, J. Chung, "Ground-Platform Sensor Position Optimization Based Hybrid Time Difference of Arrival Method for Airborne Emitter," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 13, no. 5, pp. 886~893, Oct. 2010.
- [7] Bezousek, P., Kubecek, V. "A 3D passive surveillance system VERA accuracy analysis," *Microwaves, Radar and Wireless Communications*, vol. 1, pp. 25-28, May. 2000.
- [8] Paul E. Howland, "Passive Tracking of Airborne Targets Using Only Doppler and DOA Information," *IEE Colloquium on Algorithms for Target Tracking*, London, UK, pp. 37-39, May, 1995.
- [9] Mark L. Folwer, "Analysis of Single-Platform Passive Emitter Location with Terrain Data," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no. 2, pp.495-507, Apr. 2001
- [10] Becker, K., "An Efficient Method of Passive Location," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 1091-1104, Oct. 1992.
- [11] Huai-Jing Du, "Simulation of Multi-Platform Geolocation using a Hybrid TDOA/AOA Method," *Defense R&D Canada-Ottawa, Technical Memorandum*, Ottawa, Canada, TM 2004-256, Dec. 2004.
- [12] K. C. Ho, "An Accurate Algebraic Solution for Moving Source Location Using TDOA and FDOA Measurements," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 52, no. 9, pp. 2453-2463, Sep. 2004.

- [13] J. Park, M. Lee, Y. Park, "Analysis of Two Moving Platform Passive Emitter Location with Continuous Measurable Parameters," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 51, no. 9, pp 2043~2050, Sep. 2014.
- [14] K. Madsen, H.B. Nielsen, O. Tingleff, "Methods for Non-linear Least Squares Problems," *Informatics and Mathematical Modeling Technical University of Denmark*, 2004.
- [15] Y. Kim, D. Kim, J. Han, K. Song, H. Kim, "Gauss-Newton Based Emitter Location Method Using Successive TDOA and FDOA Measurements," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 50, no 7, pp 1704~1712, Jul. 2013.

저 자 소 개



박진오(정회원)
2004년 명지대학교 전기정보 제어 공학과 학사 졸업.
2011년 한양대학교 전자컴퓨터 통신공학과 석사 졸업.
2004년~현재 LIG넥스원 전자전 연구센터 선임 연구원

<주관심분야 : 전자전 신호처리, 방향탐지>



이문석(정회원)
1997년 조선대학교 제어계측 공학과 학사 졸업.
2010년 아주대학교 전자공학과 석사 졸업.
1997년~2000년 LG정밀 연구원

2005년~현재 LIG넥스원 전자전연구센터 수석연구원

<주관심분야 : 전자전, 임베디드 소프트웨어, 신호처리>



박영미(정회원)
1991년 충남대학교 전산과 학사 졸업.
2005년 충남대학교 컴퓨터 공학과 석사 졸업.
1991년~현재 국방과학연구소 선임연구원

<주관심분야 : 위치탐지, 신호처리>