

논문 2014-51-9-18

# 2개의 이동하는 수신기를 이용한 측정 정보별 고정 신호원의 위치 추정 성능 분석

( Analysis of Two Moving Platform Passive Emitter Location with  
Continuously Measurable Parameters )

박진오\*, 이문석\*, 박영미\*\*

( Jin-Oh Park<sup>Ⓒ</sup>, Moon Seok Lee, and Young-Mi Park )

## 요약

전자전 환경에서 위협 신호원의 순시 위치추정 성능은 위협과 다수의 수신기들의 기하학적 배치 및 측정 가능한 정보에 따라 가변되며, 상황에 맞는 복합적 정보의 선택 및 활용은 단일 제원을 이용한 경우보다 높은 위치추정 정확도를 가지는 것으로 알려져 있다. 현대의 전자전 지원(electronic warfare support) 분야에서는 전략적 운용의 효율성을 위해 적은 수의 수신기를 이용하여 원거리 위협의 정밀한 위치추정을 지향한다. 본 논문에서는 제한된 환경의 2개의 이동하는 수신기를 이용하여 고정 위협의 위치추정을 위해 측정 가능한 정보별 이론적 위치추정 성능을 도출 및 분석하고, 이를 기반으로 위치추정에 적합한 정보조합을 제시한다. 또한, 정보들의 변화에 따른 위치추정 성능을 분석 및 제시한다.

## Abstract

The accuracy of instantaneous passive emitter localization varies with sensing platforms and measurable parameters. Appropriate combination of instantaneous measurable parameters have more accurate localization performance than a single parameter based localization in general. 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. For this reason, we compare CRLB (Cramer-Rao lower bound) of two moving platform with various measurable parameters to search a appropriate choice of parameters for the better localization performance through the x-y axis CEP (circular error probable) derived form CLRb. In addition, we present the relation of the localization performance and accuracy of measurable parameters.

**Keywords:** Passive emitter location, TDOA, FDOA, DOA, CRLB

## I. 서론

\* 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: 2014년5월21일, 수정일자: 2014년7월24일  
수정완료: 2014년8월27일

전자전 지원 분야 (electronic warfare support)의 중요한 목표는 위협 신호원의 정보를 획득하는 것이다<sup>[1]</sup>. 특히, 신호원의 방향이나 위치는 회피, 타격 그리고 재밍(jamming)과 같은 전술적 행동을 취할 수 있는 중요한 정보로 활용한다<sup>[2-3]</sup>.

기존의 아날로그기반의 전자전시스템에서는 DPD

(Digital Phase Discriminator), DFD(Digital Frequency Discriminator), SDLVA(Successive Detection Log Video Amplifier) 와 같은 모듈을 활용하여 신호의 위상 및 신호세기 등을 추정하고 신호의 방향을 탐지하는(Direction Finding, DF) 시스템이 주를 이루었다<sup>[4~5]</sup>. 그리고 위협 신호원의 위치는 시간의 흐름에 따라 변화하는 수신기의 위치와 DOA(direction of arrival) 정보들을 이용하여 추정하였다<sup>[6]</sup>.

현재 전자전시스템은 디지털 변환기술 및 신호처리 기술이 발전함에 따라 원거리 이격된 수신기간 시각동기화를 기반으로 한 신호 도착시간 차(Time Difference of Arrival, TDOA), 혹은 신호 도착 주파수 차(Frequency Difference of Arrival, FDOA) 인자를 측정하여 위치를 추정하는 시스템으로 발전하고 있다<sup>[7]</sup>. TDOA 혹은 FDOA와 같은 신호 인자를 이용한 위치추정이 DOA 정보를 활용한 위치추정의 경우보다 높은 위치추정 성능을 가지는 것으로 알려져 있기 때문이다<sup>[1, 7]</sup>.

TDOA 혹은 FDOA를 이용한 위치추정 방법은 수신기의 운용 환경 및 요구되는 위치추정정확도에 따라 다양화 된다<sup>[7~10]</sup>. 위협 신호원이 모든 수신기들에 수신된다는 가정 하에서, 독립적인 위치에 수신기가 4개 이상 존재하여 3차원의 신호원의 위치를 추정이 가능한 경우에는 수집한 TDOA나 FDOA를 이용하여 2단계 최소자승법(2-stage least squares)을 이용한 위치추정 방법을 주로 활용한다<sup>[11]</sup>. 하지만, 수신기의 수가 3개 이하이거나 높은 위치 정확도가 요구 될 경우에는 시간이 지남에 따라 지속적으로 TDOA나 FDOA를 측정하여 시계열 데이터를 확보하고, 반복적으로 신호원의 위치를 업데이트하는 방식의 위치추정 방법을 활용한다<sup>[9]</sup>. 반복적으로 위치를 추정하는 방법으로는 비선형적인 신호의 비유함수를 선형화하거나 차분정보들을 활용하는 최적화 기법을 적용하지만<sup>[12]</sup>, 반복적으로 위치를 추정하는 방법은 잘못된 국소적 위치추정(local minimum)의 문제 혹은 위치 추정 불가(divergence)의 문제점을 가질 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 각종 신호원의 정보들을 융합하여 위치를 추정하기도 한다<sup>[13~15]</sup>.

TDOA 및 FDOA는 기하학적으로 수신기간 이격이 있을 때 존재하는 정보이고 위협신호의 수신이 가능하다면 이격간격이 클수록 위치추정에 유리하지만, 위협신호원의 도달범위가 협소하다면 신호가 수신되지 않아

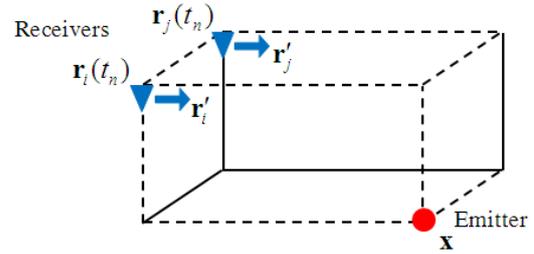


그림 1. 이동 수신기와 고정 신호원의 배치.  
Fig. 1. The geometry of receivers and emitter.

위치추정이 불가능하게 되는 문제점을 가지고 있다.

이에 따라 본 논문에서는 위협신호의 수신 확률을 높이고 정밀한 위치추정을 위해서 2개의 이동하는 수신기 기반으로 측정 가능한 정보인 TDOA, FDOA, DOA를 단독 혹은 복합적으로 이용하여 이론적으로 달성 가능한 위치추정 오차와 추정불가 영역의 비율을 제시한다. 위치추정 정확도는 CRLB(Cramer-Rao lower bound)를 x-y축으로 투영한 CEP를 이용하여 분석하며, 정해진 탐지거리 내에서의 위협간 거리대비 위치추정 오차의 비율과 탐지영역대비 추정불가 영역의 비율을 이용하여 분석하도록 한다.

본 논문의 구성은 II장에서 이동하는 수신기 기반의 3차원 시계열 TDOA, FDOA, DOA 정보모델을 설명하고, III장에서는 CRLB를 이용하여 단독/복합 정보모델별 x-y축에 대한 위치추정 성능 하한을 이용한 평가방법을 설명한다. IV장에서는 특정 운용환경을 설정하여 단독/복합 정보모델별 위치추정성능 하한을 분석하고, 위치추정 성능이 우수한 정보모델을 선별하여 해당 정보정확도에 따른 위치추정의 영향성을 비교/분석한다. 끝으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. T/FDOA 및 DOA 정보모델

본 장에서는 이동하는 2개의 수신기에서 측정된 TDOA, FDOA 그리고 DOA와 신호원과의 관계를 설명한다. 그림 1과 같이 2개의 수신기에서 한 순간에 1쌍의 TDOA, FDOA 그리고 DOA가 측정 가능하지만, 3차원 위치 추정을 하기에는 부족 결정(under-determined case)상황이기 때문에 TDOA, FDOA, DOA 시계열 정보를 활용토록 하며, 각 정보모델들을 설명한다.

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 등속으로 이동한다고 가정하며 시간에 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 시간,  $\mathbf{r}_i(t_0)$ 는 최초 수신기의 위치이며,  $n, t_\Delta$ 은 각각 정보의 수집 순번, 정보의 수집시간 간격이다.

### 1. TDOA

위협의 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,  $d_i$ 와  $d_j$ 는 각각 위협과  $r_i$ 의 간격, 위협과  $r_j$ 의 간격이다. 두 수신기간의 TDOA는 식 (3)과 같으며 위협의 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

이동하는 수신기  $\mathbf{r}_i$ 와  $\mathbf{r}_j$ 에서 수신하는 위협  $\mathbf{x}$ 의 각 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 위협의 속도,  $f_0$ 는 신호의 반송주파수이다. 두 수신기간  $FDOA_{ji}$ 는 식 (5)와 같으며, 위협과 수신기의 위치와 속도, 그리고 송신주파수에 영향을 받음을 확인할 수 있다. 우리는 위협은 고정되어 있으며 주파수의 사전정보가 있다고 가정한다.

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

### 3. DOA

위협과 수신기간의 DOA 관계는 tangent가 180도의 범위에 유효하므로 360도의 범위까지 유효한 tangent half-angle공식을 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 위치추정 성능

본 장에서는 2개의 이동하는 수신기에서 측정가능한 정보인 TDOA, FDOA 그리고 DOA를 단독 혹은 복합적으로 이용하여 임의의 운용조건을 기준으로 불편 추정기(unbiased estimator)의 이론적으로 달성할 수 있는 최소의 분산을 의미하는 CRLB(Cramer-Rao lower bound)를 이용하여 위치추정 한계 성능을 비교한다. 구체적으로 CRLB를 x-y축으로 투영한 원형 공산 오차(circular error probable, CEP)를 수신기와 위협간 간격 대비 RMSE(root mean square error)의 비율인 RMSE %로 표현하며, 이는 위협의 거리에 대한 상대적인 오차 관계를 확인하고자 사용한다.

CRLB는 추정 파라미터의 총 정보량을 의미하는 FIM(Fisher information matrix)와 역행렬 관계를 가지며, FIM은 식 (7)과 같이 정의한다<sup>[16]</sup>.

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

여기서  $\mathbf{H}$ 는 위협의 위치  $\mathbf{x}$ 에 대한 자코비안 행렬(Jacobian matrix)로서 각 정보별 자코비안 행렬은 식 (8)~(13)과 같이 정의하며,  $N$ 은 총 정보수집 개수이다. 그리고  $\boldsymbol{\Sigma}$ 는 각 정보별 공분산 행렬로 독립적이고, 가우시안(Gaussian) 분포를 가진다고 가정하며 식 (14)~(19)와 같이 정의한다.

$$\mathbf{H}_{TDOA} = \frac{\delta \mathbf{TDOA}}{\delta \mathbf{x}} \quad (8)$$

$$\mathbf{TDOA} = [\mathbf{TDOA}_{ji}(t_0), \mathbf{TDOA}_{ji}(t_1), \dots, \mathbf{TDOA}_{ji}(t_{N-1})]^T$$

$$\mathbf{H}_{TDOA,DOA} = \begin{bmatrix} \frac{\delta \mathbf{TDOA}}{\delta \mathbf{x}} \\ \frac{\delta \mathbf{DOA}}{\delta \mathbf{x}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{DOA} = [\mathbf{DOA}(t_0), \mathbf{DOA}(t_1), \dots, \mathbf{DOA}(t_N)]^T$$

$$\mathbf{H}_{FDOA} = \frac{\delta \mathbf{FDOA}}{\delta \mathbf{x}}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

$$\mathbf{FDOA} = [\mathbf{FDOA}_{ji}(t_0), \mathbf{FDOA}_{ji}(t_1), \dots, \mathbf{FDOA}_{ji}(t_{N-1})]^T$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

이론적으로 달성할 수 있는 위치추정 오차의 분산 하한을 나타내는 CRLB를 x-y축으로 2차원 투영하기 위

해 식 (20)을 이용하고<sup>[17]</sup>, 이는 2차원 모델로 오차의 분산 하한을 나타내는 단편(slice)과 구분되며 그림 2와 같다<sup>[18]</sup>.

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

여기서 P는 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 위협의 임의의 위치에 대한 위치추정 오차를 나타내는  $CEP_{xy}$ 는 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[12]</sup>.

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

여기서  $\text{trace}()$ 는 대각행렬의 합을 나타낸다.  $k$ 는 오차 타원 내부에 위치추정 값이 존재할 확률인  $P_e$ 와 상관관계를 가지는 오차타원의 크기를 나타내며, 식 (23)과 같은 관계를 갖는다<sup>[18]</sup>.

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

여기서,  $P_e$ 는 CEP의 정의에 따라 0.5로 설정한다. 위협과 수신기간 간격의 비율 오차인 RMSE (%)로 변환하기 위해 식 (24)와 같이  $CEP_{xy}$ 를 이용하여 나타낸다.

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

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

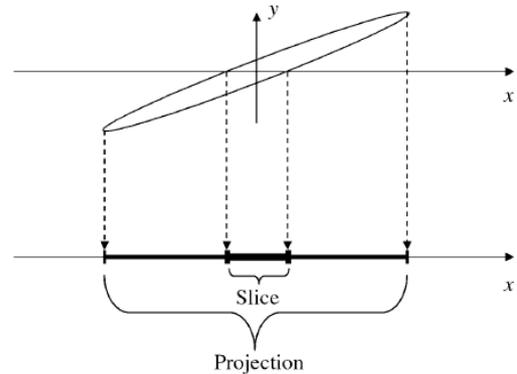


그림 2. 오차타원에서의 투영과 단편 비교.

Fig. 2. Comparison of projection and slice for 2D ellipsoid.

#### IV. 단독/복합 정보모델별 위치추정 성능

본 장에서는 이동하는 2개 수신기의 운용환경과 정보모델의 오차를 설정하여 (1) 단독/복합 정보모델에 대해 예측되는 위치추정 오차 및 탐지불가 구역에 대한 분석을 수행하고, (2) 임의 설정한 운용환경에서 위치추정 오차가 작은 정보모델을 선택하여, 정보의 정확도에 따른 위치추정오차와 탐지불가 구역에 대한 분석을 수행한다.

##### 1. 단독/복합 정보모델별 위치추정 성능

본 절에서는 III장에서 제시한 정보모델을 기반으로 표 1과 같은 전자전 운용환경에서의 6GHz의 고정 위협에 대한 위치추정 성능 및 불가구역을 산출한다. 여기서, 위치추정오차와 불가구역의 비율을 통칭하여 위치추정 성능으로 명명하도록 한다.

2개의 수신기는 3km 이격되어 170m/s의 속도로 같은 방향으로 이동하고, 정보 정확도는 각각 TDOA 7ns, FDOA 0.03Hz, DOA 1도로 가정한다. 또한 탐지거리는 수신기간 중점기준  $\pm 250\text{km}$ 의 범위를 가지며, 1초마다 동일 위협에 대한 정보를 수집하며 8개 수집 완료시에 위치추정을 수행하는 것으로 가정한다.

위치추정에 적용할 수 있는 정보인자들의 조합인 6가지 경우(TDOA, FDOA, TDOA/FDOA, TDOA/DOA, FDOA/DOA, TDOA/FDOA/DOA)에 대해 탐지거리 범위에서 RMSE (%)를 산출하고, RMSE 100% 이상의 위치추정오차를 나타내는 위협의 위치에 대해서는 위치추정 불가구역으로 정의하여 탐지영역 대비 불가구역의

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

구분	값
$r_i$	[ 0, 1.5, 2 ] km
$r_j$	[ 0, -1.5, 2 ] km
$r'_i$	170 m/s, x축 +방향
$r'_j$	170 m/s, x축 +방향
TDOA 정확도(표준편차)	7 ns
FDOA 정확도(표준편차)	0.03 Hz
DOA(DF) 정확도(표준편차)	1 도
탐지거리	$\pm 250\text{km}$ , 8km step
수집 샘플	8개, 1초 간격

비율로 표시하였다. 또한, 탐지불가구역을 제외한 탐지가능구역의 이론적 하한 RMSE (%)를 평균하여 정보인자들의 조합별 위치추정 성능을 그림 3과 같이 분석하였다.

표 1과 같은 시나리오로 2개의 수신기가 이동하며 위치추정을 수행할 경우에 그림 3과 같이 T/FDOA를 이용한 위치추정의 경우는 위치추정 불가구역이 전체 탐지영역 대비 약 13%를 차지하고, TDOA/FDOA/DOA를 이용하는 경우는 위치추정 불가구역이 0%를 차지했다. 이는 그림 4와 같이 탐지구역 내에서 위협을 모두 위치시켜, RMSE (%)를 개별 산출하여 이를 기반으로 분석한 결과이다. FDOA 및 수신기의 이동방향에 따라

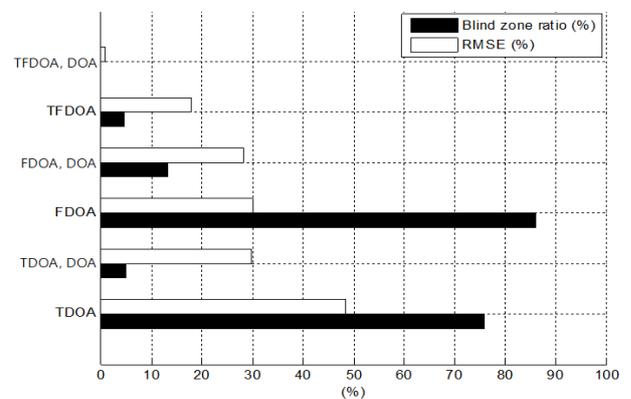


그림 3. 정보별 추정불가구역 비율 및 위치추정오차 비율.

Fig. 3. Comparison blind zone ratio and RMSE % according to measurable parameters.

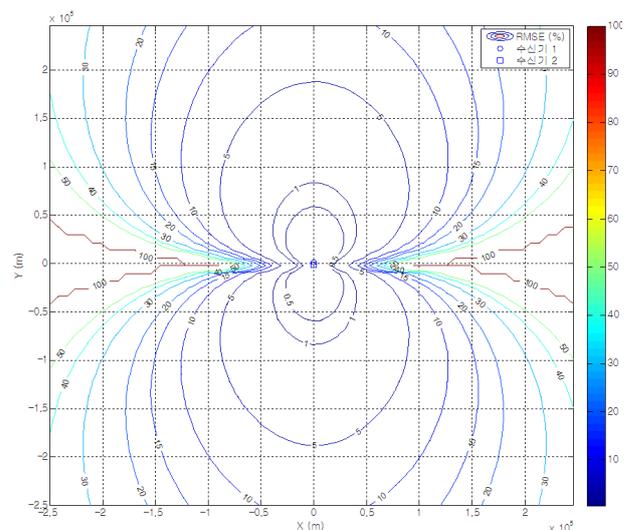


그림 4. T/FDOA를 이용한 위치추정 오차 하한 RMSE (%)

Fig. 4. T/FDOA RMSE(%) for simulation parameter #1.

변화하는 수신기의 위치의 효과로 y축 상에 위치추정 오차가 x축 상의 위치추정오차 보다 적은 것을 확인할 수 있다.

그림 3에서 위치추정 오차 RMSE (%)는 TDOA/FDOA를 이용한 경우에 위치추정 가능구역에서 평균 18%를 가지며, TDOA/FDOA/DOA를 이용한 경우에는 1%의 성능을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 주목할 사항은 DOA를 TDOA, FDOA 혹은 TDOA/FDOA에 복합적으로 이용할 경우에는 위치추정 불가구역의 비율이 현저히 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

2. 정보오차에 따른 위치추정 성능

본 절에서는 1절에서 분석한 정보모델 중 위치추정 오차가 작은 TDOA/FDOA와 TDOA/FDOA/DOA를 이용한 모델을 기반으로 각 정보인자별 정확도에 따른 위치추정오차 및 위치추정 불가구역의 비율을 분석한다.

표 1의 수신기들의 위치 및 속도를 기반으로 TDOA,

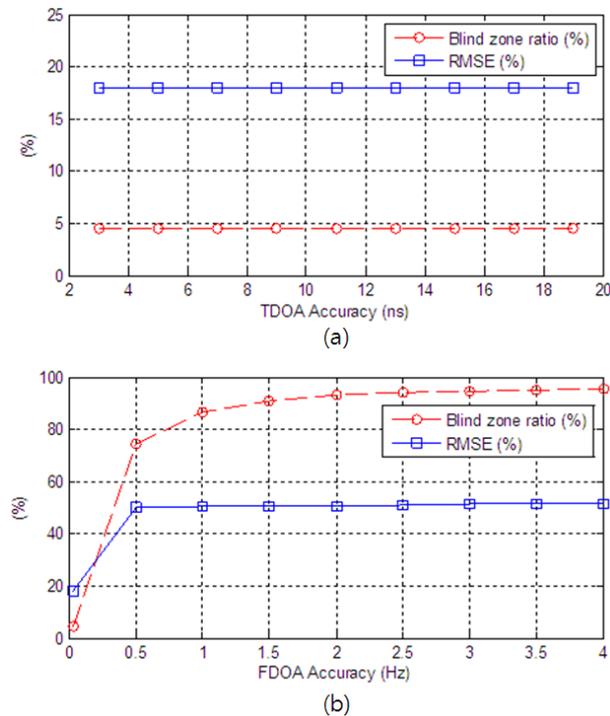


그림 5. TFDOA/FDOA를 이용한 위치추정 성능:  
(a) TDOA 정확도에 따른 위치추정 성능  
(b) FDOA 정확도에 따른 위치추정 성능

Fig. 5. Relative performance as function of TDOA/FDOA accuracy.  
(a) Performance according to TDOA accuracy  
(b) Performance according to FDOA accuracy

FDOA 그리고 DOA의 정확도를 가변하여 위치추정 오차 RMSE (%)와 위치추정 불가구역의 비율을 분석하면 그림 5, 6과 같다. 그림 5는 T/FDOA를 이용한 위치추정 성능을, 그림 6은 T/FDOA 및 DOA를 이용한 위치추정 성능을 나타낸다.

TDOA/FDOA를 이용한 위치추정의 경우, TDOA 정확도 가변시 그림 5-(a)와 같이 추정 불가구역의 비율

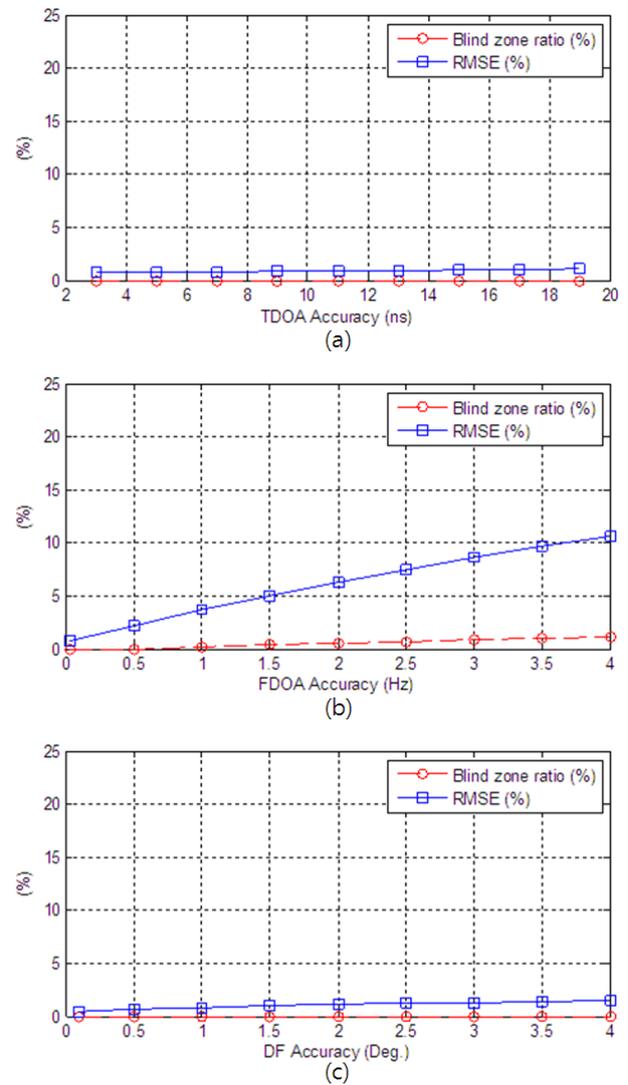


그림 6. TDOA/FDOA/DOA를 이용한 위치 추정 성능:  
(a) TDOA 정확도에 따른 위치추정 성능  
(b) FDOA 정확도에 따른 위치추정 성능  
(c) DOA 정확도에 따른 위치추정 성능

Fig. 6. Relative performance as function of TDOA/FDOA/DOA accuracy.  
(a) Performance according to TDOA accuracy  
(b) Performance according to FDOA accuracy  
(c) Performance according to DOA accuracy

및 RMSE (%)가 변화가 매우 적은 반면, FDOA의 변화에 대해서는 그림 5-(b)와 같이 추정 불가구역의 비율 및 RMSE (%)가 0.5Hz를 기점으로 급격히 변화되는 것을 확인할 수 있다.

이와 비교하여 TDOA/FDOA/DOA를 이용한 경우에는 TDOA/FDOA를 이용한 위치추정의 경우와 마찬가지로 TDOA 정확도 가변시에는 그림 6-(a)와 같이 추정 불가구역의 비율 및 RMSE (%)의 변화가 적은 반면, FDOA 정확도를 가변하는 경우에는 그림 6-(b)와 같으며, 이는 TDOA/FDOA를 이용한 그림 5-(b)와는 달리 그 변화의 폭이 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 또한, RMSE (%)의 경우에도 TDOA/FDOA를 이용한 경우보다 동일 오차에 대해 위치추정 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. 그림 6-(c)와 같이 DOA정확도를 가변하는 경우에는 오차의 증가에 따라 RMSE (%)가 증가하지만 그 영향의 정도가 FDOA의 증가의 따른 정도보다 작은 것을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 이동하는 2개의 수신기에서 위치추정에 활용 가능한 정보들을 단독/복합으로 활용하여 임의의 운용조건에서 고정 위협의 위치추정 성능을 제시 및 분석하였다. 시간에 따라 수집한 단일 정보인 TDOA, FDOA, DOA 혹은 복합 정보에 대해 CRLB를 이용하여 3차원 위치추정 오차를 x-y축 2차원으로 투영하여 이론적 위치추정 하한 오차를 산출하였으며, 이를 이용하여 정보들 간의 위치추정 오차의 하한을 비교/분석하였다.

위치추정 오차가 작은 TDOA/FDOA를 이용한 경우와 TDOA/FDOA/DOA를 경우에 한하여, 정보 정확도에 따른 위치추정 성능을 비교/분석하였으며, TDOA/FDOA/DOA를 이용한 경우는 TDOA/FDOA만을 이용한 경우보다 위치추정 오차가 작고, 정보정확도 오차에 강인한 위치추정 성능을 가지는 것을 확인하였다.

제안한 비교/분석 방법 및 결과는 전자전 지원 분야에서 높은 위치추정 성능과 더불어 위치 추정 불가구역을 최소화할 수 있는 알고리즘 연구/개발에 활용 가능할 것으로 기대한다.

## 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] Richard A. Poisel, *Target Acquisition in Communication Electronic Warfare Systems*, Artech House, 2004.
- [4] 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.
- [5] K. Burns, "Tracking trends in military IFMs and DFDs," *Microwaves & RF*, June 2009. (<http://mwrf.com/military/tracking-trends-military-frms-and-dfds>).
- [6] 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.
- [7] Andrea De Martino, *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, 2012.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Bezousek, P., Kubecek, V. "A 3D passive surveillance system VERA accuracy analysis," *Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Vol. 1, pp. 25-28, May. 2000.
- [11] Y. T. Chan and K. C. Ho, "A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location", *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 42, No. 8, pp. 1905~1915, Aug. 1994.
- [12] Y. Kim, D. Kim, J. Han, K. Song, H. Kim, "Gauss-Newton Based Estimation for Moving Emitter Location Using TDOA/FDOA Measurements and Its Analysis," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 50, no. 6, pp. 1378~1387, Jun. 2013.
- [13] 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.

[14] 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.

[15] W. H. Foy, “Position Location Solutions by Taylor Series Estimation,” *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-12, no. 2, pp. 187-194, Mar. 1976.

[16] Kay, Steven M., *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Prentice Hall, 1993.

[17] Becker, K., “An Efficient Method of Passive Location,” *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 28, no. 4, pp. 1091-1104, Oct. 1992.

[18] 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.

— 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 컴퓨터공학과 석사 졸업.  
 1991년~현재 국방과학연구소 선임연구원

<주관심분야 : 위치탐지, 신호처리>