

# FDOA 정보 기반 멀티스테틱 PCL 시스템 위치추정 성능 분석

## Localization Performance Analysis of Multistatic PCL System Based on FDOA

정인환 · 김산해 · 곽현규 · 송규하 · 이병남

Inhwan Jeong · Sanhae Kim · Hyungyu Kwak · Kyuha Song · Byeongnam Lee

### 요 약

멀티스테틱 PCL(Passive Coherent Location) 시스템은 FM 라디오 또는 통신신호와 같은 다수의 제 3의 송신원을 이용하여 기준신호와 표적반사신호로부터 추정된 TDOA(Time Difference of Arrival) 및 FDOA(Frequency Difference of Arrival) 정보를 기반으로 표적의 위치를 탐지하는 수동형 레이더이다. FM 라디오 신호는 송신원의 높은 출력으로 넓은 탐지 범위를 제공하기 때문에 PCL 시스템에 주로 사용된다. 기존 FM 라디오 기반 멀티스테틱 PCL 시스템은 TDOA 정보만을 이용하여 표적의 위치를 추정하고 있으나, FM 신호의 좁은 대역폭 특성으로 인해 거리해상도가 매우 커서 정밀 TDOA 추정에 그 한계가 존재한다. 반면에 FDOA 정보의 해상도는 신호의 수집시간에 반비례하여, 신호수집 시간을 증가시킬 수록 보다 정확한 FDOA 정보 추정이 가능하다. 본 논문에서는 FM 라디오 기반 멀티스테틱 PCL 시스템에서 FDOA 기반 위치추정 성능을 다양한 모의실험 환경에서 기존의 TDOA 기반 위치추정 성능과 비교·분석하였다. 모의실험 결과, 상대적으로 근거리에 위치한 표적인 경우에는 FDOA 기반 위치추정의 성능이, 그리고 원거리 표적인 경우에 대해서는 TDOA 기반 위치추정 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 따라서 운용환경에 따라 TDOA 및 FDOA 정보를 선택적으로 사용함으로써 위치추정 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### Abstract

A multistatic PCL system, known as a passive radar, uses widely available transmitters of opportunity, such as FM radio and mobile communication, to detect a target and localize its position based on TDOA and FDOA between the reference signals and the target echoes. The FM radio signal is mainly used in the multistatic PCL system because of its wide coverage detection capability caused by the high transmitted power of the transmitters. A multistatic system based on the FM radio signal estimates the target's position based on the TDOA information, but it is limited to precise TDOA estimation because of the narrow bandwidth characteristics of the FM radio signal, which results in very poor range resolution. However, the FDOA estimation can be improved by extending the integration time because the FDOA resolution is inversely proportional to the integration time. In this study, we compare and analyze the localization performance of the multistatic PCL system based on FDOA with the conventional TDOA-based localization performance under various simulation conditions. The simulation results show that the FDOA-based localization performance is excellent when the target is relatively close to the PCL system, whereas in the case of a relatively remote target, the TDOA-based localization performance is good. Hence, using TDOA and FDOA information selectively depending on the operation environment can improve the localization performance of the multistatic PCL system.

Key words: Multistatic PCL System, FDOA, TDOA, Localization

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received November 12, 2019 ; Revised December 10, 2019 ; Accepted January 6 2020. (ID No. 20191112-004S)

· Corresponding Author: Sanhae Kim (e-mail: ksh808@add.re.kr)

## I. 서 론

멀티스테틱 PCL 시스템 운용을 위한 최적의 신호원 특성은 높은 송신 출력, 넓은 유효 수신 범위, 광대역 특성, 지속적 신호방출이다<sup>[1]</sup>. 이 조건과 유사한 신호는 FM 라디오 신호, 지상파 방송신호 및 이동통신 기지국 신호 등이 있으며, 이 중에 FM 라디오 신호는 저주파 특성 및 높은 송신 출력 등으로 인해 넓은 유효 수신 범위를 가지고 있어 PCL 시스템의 송신원으로 널리 이용되고 있다<sup>[2]</sup>. 하지만 국내의 FM 라디오 신호 한 채널의 최대 유효대역폭은 150 kHz로 최소 거리해상도가 약 1 km이며, 라디오 신호에 포함되는 메시지인 음원 및 음성의 특성에 따른 유효대역폭의 변화로 거리해상도가 크게 가변되어 TDOA 추정오차가 증가하는 단점을 갖고 있다. 반면에 FDOA 해상도는 신호수집 시간에 반비례하므로 운용환경에 따라 수집 주기를 적절히 설정하면 FDOA 추정정확도를 높일 수 있다. 이러한 FDOA 정보의 특성을 이용하여 GSM(Global System for Mobile Communications) 및 LTE(Long Term Evolution)의 통신신호 기반 멀티스테틱 PCL 시스템에서 FDOA를 이용한 위치탐지 관련 연구가 진행되었으나<sup>[3]</sup>, 송신원 개수 및 탐지거리 측면에서 FM 라디오 신호 기반 PCL 시스템의 원거리 표적에 대한 성능 예측이 어려우며, 표적의 이동에 따른 추적 성능만이 비교되어 특정 위치에서의 순시 위치추정 성능의 경향 파악이 어렵다.

본 논문에서는 송신원으로 널리 이용되는 FM 라디오 신호 기반의 멀티스테틱 PCL 시스템에서 FDOA 정보 기반의 순시 위치추정의 성능을 다양한 모의실험 환경에서 기존의 TDOA 정보 기반의 순시 위치추정의 성능과 비교·분석하고자 하며, 운용환경에 따라 TDOA 및 FDOA 정보를 선택적으로 사용함으로써 FM 기반 멀티스테틱 PCL 시스템의 위치추정 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성을 다음과 같다. 2장에서는 멀티스테틱 PCL 시스템에 대해 설명하고, 3장에서는 TDOA와 FDOA 정보 기반의 위치추정기법에 대해 설명한다. 4장에서는 모의실험 결과를 제시하고, 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 멀티스테틱 PCL 시스템

일반적으로 멀티스테틱 PCL 시스템은 그림 1과 같이 다수의 FM 라디오 송신원에서 방사한 라디오 신호가 PCL 시스템에 직접 도착하는 기준신호와 표적에 반사되어 수신되는 표적반사신호의 도래시간차인 TDOA 정보와 표적의 이동에 의한 도플러 효과에 기인한 도래주파수 차인 FDOA 정보를 이용하여 표적의 위치를 추정할 수 있다.

이를 위해 멀티스테틱 PCL 시스템은 다음과 같은 절차를 통해 TDOA 및 FDOA 정보를 추정한다. 먼저, PCL 시스템의 수신기에서 FM 라디오 신호의 주파수 별로 기준신호와 표적반사신호를 분리하여 수신하거나, 디지털빔포밍 등을 통해 두 신호를 분리한다. 이후, 적응적 필터링(Adaptive Filtering) 등을 수행하여 표적반사신호에 포함된 간섭 성분을 제거하고, 기준신호와 표적반사신호 간 교차상관관계(Cross-correlation) 및 CFAR (Constant False Alarm Rate) 검출을 수행하여 검출된 표적에 대한 바이스테틱 거리(Bistatic range)와 바이스테틱 속도(Bistatic velocity)를 추정한다. 검출된 표적에 대한 바이스테틱 거리와 바이스테틱 속도가 추정되면 다음의 식 (1)과 식 (2)을 통해 TDOA 및 FDOA 정보를 각각 도출할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{R_b}{c} \quad (1)$$

$$\Delta F = V_b \cdot \left( \frac{f_0}{c} \right) \quad (2)$$

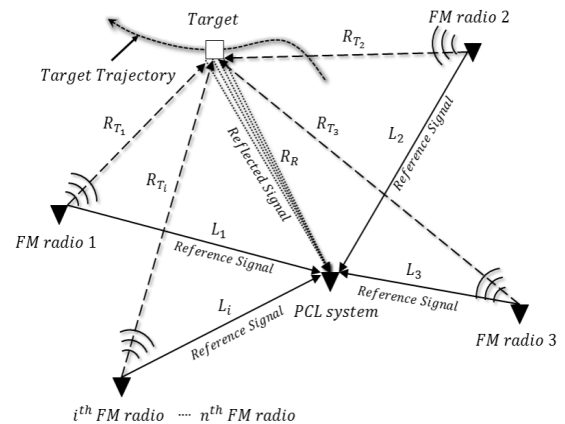


그림 1. 멀티스테틱 PCL 시스템 개념도  
Fig. 1. Concept of multistatic PCL system.

여기서  $\Delta T$ 는 TDOA 정보,  $\Delta F$ 는 FDOA 정보,  $R_b$ 는 바이스테틱 거리,  $V_b$ 는 바이스테틱 속도를 나타내며,  $c$ 는 빛의 속도,  $f_0$ 는 송신주파수이다.

바이스테틱 거리의 해상도는 식 (3)과 같이 신호의 유효대역폭 및 표적을 기준으로 FM 라디오 송신원과 PCL 시스템 간의 내각인 바이스테틱 각도(Bistatic Angle)에 의해 결정되며<sup>[4]</sup>, 바이스테틱 각도가 0인 모노스테틱(Monostatic) 환경인 경우에 그 값이 최소가 된다. 따라서 TDOA 정보의 최소 시간해상도는  $1/(2B)$ 가 되며, 라디오 신호에 포함된 음원 및 음성의 특성에 따라 유효대역폭이 줄어들면 TDOA 해상도가 커져서 TDOA 추정오차가 증가하게 된다.

$$\Delta R_b = \frac{c}{2B \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (3)$$

여기서  $\Delta R_b$ 는 바이스테틱 거리의 해상도,  $B$ 는 신호의 유효대역폭,  $\beta$ 는 바이스테틱 각도를 나타낸다.

한편, FDOA 정보의 해상도는 신호수집 시간( $T$ )에 반비례하여 신호수집 시간이 길수록 FDOA 추정정확도가 높아진다.

### III. PCL 기반 위치추정기법

#### 3-1 TDOA 정보를 이용한 위치추정기법

멀티스테틱 PCL 기반 위치추정은  $i$ 번째 FM 라디오 송신원에서 방사한 라디오 신호가 PCL 시스템에 직접 도착하는 기준신호의 도착 시간과 표적에 반사되어 수신되는 표적반사신호의 도착 시간의 차이인 TDOA 정보에 빛의 속도인  $c$ 를 곱하여 거리로 환산한 값을 사용한다. 즉, 표적은 FM 라디오 송신원에서 방사된 신호가 표적에 반사되어 PCL 시스템에 수신된 경로의 거리( $R_{T_i} + R_R$ )와 PCL 시스템에 직접 수신된 경로의 거리( $L_i$ )와의 차이가 항상 일정한 좌표에 위치한다는 특성을 이용한다. 이는 그림 2와 같이 FM 라디오 송신원과 PCL 시스템을 초점으로 하고, 신호가 표적에 반사되어 수신된 경로의 거리( $R_{T_i} + R_R$ )가 항상 일정한 타원 위에 표적이 위치한다는

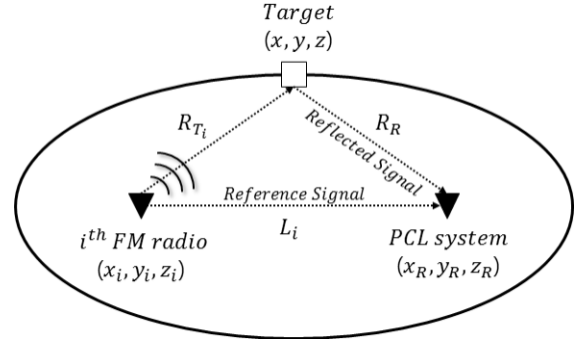


그림 2.  $i$ 번째 FM 라디오 송신원에 대한 PCL 시스템 개념도

Fig. 2. Concept of PCL system for  $i$ -th FM radio illuminators.

것을 의미하며, 이를 방정식으로 표현하면 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} c \cdot \Delta T_i &= R_{T_i} + R_R - L_i \\ &= \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \\ &\quad + \sqrt{(x_R - x)^2 + (y_R - y)^2 + (z_R - z)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x_i - x_R)^2 + (y_i - y_R)^2 + (z_i - z_R)^2} \\ (i &= 1, \dots, N) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\Delta T_i$ 는  $i$ 번째 FM 라디오 송신원에 대한 TDOA 정보이며,  $R_{T_i}$ 는  $i$ 번째 FM 라디오 송신원과 표적 간 거리,  $R_R$ 은 PCL 시스템과 표적 간 거리를 나타낸다.  $(x_i, y_i, z_i)$ 는  $i$ 번째 FM 라디오 송신원 위치,  $(x_R, y_R, z_R)$ 은 PCL 시스템 위치,  $(x, y, z)$ 는 표적 위치,  $N$ 은 FM 라디오 송신원의 개수를 나타낸다.

표적의 위치는 식 (4)의  $N$ 개 타원의 방정식들의 교차점을 비선형방정식 풀이를 통해 추정할 수 있다.

#### 3-2 FDOA 정보를 이용한 위치추정기법

멀티스테틱 PCL 시스템에서 FDOA 정보를 이용하여 표적의 위치를 추정하기 위해서는 FDOA 정보에 신호의

파장,  $\lambda = (c/f_0)$  곱하여 바이스태틱 속도로 환산하여 다음 식 (5)와 같이 표적의 속도 벡터와 표적의 위치,  $i$  번째 FM 라디오 송신원의 위치 및 PCL 시스템의 위치로 표현할 수 있다<sup>[3]~[5]</sup>.

$$\begin{aligned} \left(\frac{c}{f_0}\right) \cdot \Delta F_i = & \left(\frac{x_i - x}{R_{T_i}} + \frac{x}{R_R}\right) \cdot v_x \\ & + \left(\frac{y_i - y}{R_{T_i}} + \frac{y}{R_R}\right) \cdot v_y \\ & + \left(\frac{z_i - z}{R_{T_i}} + \frac{z}{R_R}\right) \cdot v_z \end{aligned} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (5)$$

여기서  $\Delta F_i$ 는  $i$  번째 FM 라디오 송신원에 대한 FDOA 정보이며,  $(v_x, v_y, v_z)$ 는 표적의 속도벡터이다.

FDOA 정보를 이용한 표적의 위치추정을 수행하기 위해서는 표적의 위치  $(x, y, z)$ 와 속도벡터  $(v_x, v_y, v_z)$ 를 미지수로 설정하고, 식 (5)의  $N$ 개 방정식을 비선형방정식 풀이를 통해 추정하여야 한다.

## IV. 모의실험

### 4.1 모의실험 환경

본 논문에서 고려하는 주요 모의실험 환경은 다음의 표 1과 같다. 모의실험을 위한 FM 라디오 송신원 배치 환경은 PCL 시스템의 위치를 원점  $(0, 0, 0)$ 으로 설정하고, FM 라디오 송신원을 진북기준  $\pm 45^\circ, \pm 135^\circ$  방향에 원점 기준  $R$  km 간격마다 FM 라디오 송신원을 배치하여 총  $N$ 개의 송신원을 X형으로 설정하였다. 표적의 종류는 민간 항공기로 설정하였으며, 표적의 위치는 PCL 시스템의 진북방향으로 2~50 km까지 2 km 간격으로 고려하였으며, 순시 위치추정의 성능을 도출하기 위해, 표적이 설정된 위치에서 특정 속도로 이동되고 있는 순간에 대해 위치추정정확도(circular error probable: CEP)를 도출하였다. 한편, 두 기법간의 위치추정 성능비교에 중점을 두기 위해 FM 라디오 송신원의 위치오차는 없다고 가정하였고, FM 라디오 송신원, PCL 시스템 및 표적 간의 NLOS(Non-Line

표 1. 주요 모의실험 환경

Table 1. Main parameters for simulation.

Parameters	Values
Number of FM radio transmitters ( $N$ )	8, 16
Distance between FM radio transmitters ( $R$ )	5 km, 10 km, 20 km
Transmitted frequency of FM radio ( $f_0$ )	100 MHz
Effective bandwidth ( $B$ )	100 Hz
Signal acquisition time ( $T$ )	1 sec, 2 sec
Velocity vector of target ( $\mathbf{v}$ )	(180, 0, 0) m/s
TDOA estimation error (rms)	0.125 $\mu$ s
FDOA estimation error (rms)	0.25 Hz @ $T=1$
	0.125 Hz @ $T=2$

Of Sight) 신호 성분이 완벽하게 제거된 환경을 고려하였으며, TDOA 및 FDOA 오차는 각 해상도의 25 %에 해당하는 값을 rms로 설정하여 가우시안(Gaussian) 분포로 모의하였다.

TDOA 기반 및 FDOA 기반의 위치추정을 위한 비선형 방정식 풀이 알고리즘은 Levenberg-Marquardt 기법<sup>[6]</sup>을 사용하였으며, 모의실험을 위해 Matlab의 lsqnonlin 함수를 이용하였다.

### 4.2 모의실험 결과

그림 3과 그림 4는 신호수집 시간  $T$ 가 1초인 환경에서 사용되는 FM 라디오 송신원의 수  $N$ 이 각각 8개와 16개인 경우에 표적과의 거리  $R_R$ 에 따른 기법별 위치추정정확도를 CEP로 도시하고 있다. 결과를 보면, 두 결과 모두 표적과 PCL 시스템과의 거리  $R_R$ 이 가까울수록 FDOA 기반 위치추정의 성능이 우수하나, 표적의 위치가 PCL 시스템과 멀어질수록 FDOA 기반 위치추정의 성능이 상대적으로 빠르게 저하되어 TDOA 기반의 위치추정 성능이 우수해지는 것을 확인할 수 있다. 또한, FM 라디오 송신원의 배치 간격  $R$ 이 멀어질수록 두 기법의 위치추정 성능이 역전되는 표적과의 거리가 점차 증가하는 것을 알 수 있다.

한편, 사용되는 FM 라디오 송신원의 개수  $N$ 이 8개에서 16개로 증가하면, 두 기법의 성능이 역전되는 표적과

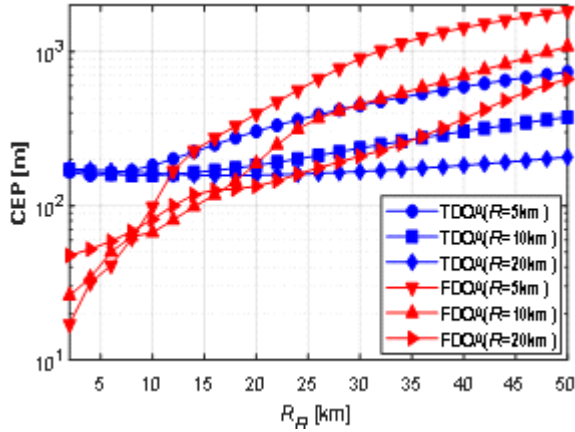


그림 3. 위치추정정확도 성능 비교( $N=8$ ,  $T=1$ )  
Fig. 3. Positioning performance comparison( $N=8$ ,  $T=1$ ).

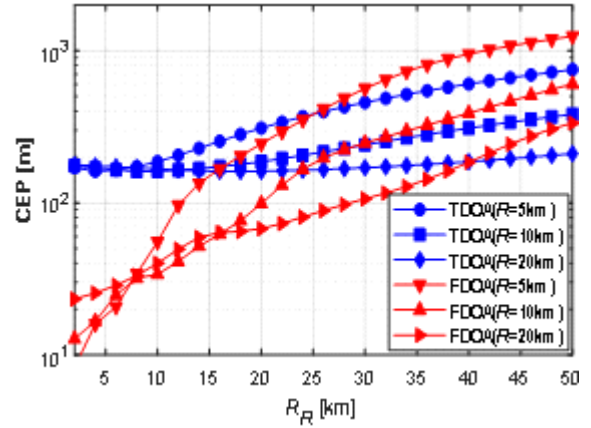


그림 5. 위치추정정확도 성능 비교( $N=8$ ,  $T=2$ )  
Fig. 5. Positioning performance comparison( $N=8$ ,  $T=2$ ).

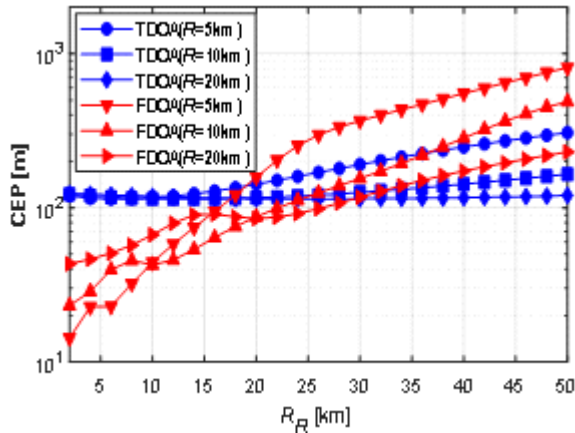


그림 4. 위치추정정확도 성능 비교( $N=16$ ,  $T=1$ )  
Fig. 4. Positioning performance comparison( $N=16$ ,  $T=1$ ).

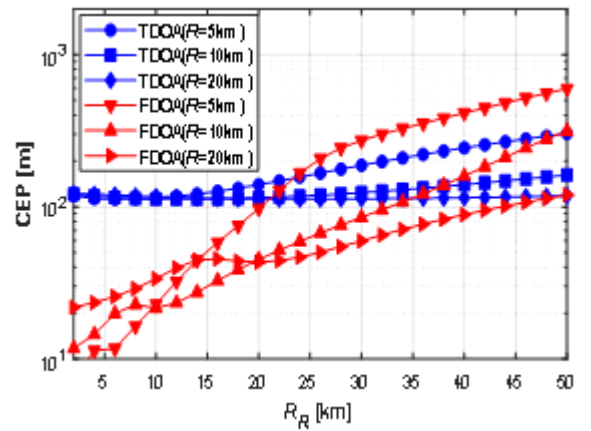


그림 6. 위치추정정확도 성능 비교( $N=16$ ,  $T=2$ )  
Fig. 6. Positioning performance comparison( $N=16$ ,  $T=2$ ).

의 거리가  $R$ 이 5 km, 10 km, 20 km인 경우에 약 14 km, 20 km, 25 km에서 약 19 km, 26 km, 30 km로 증가되어 TDOA 기반 위치추정에 비해 FDOA 기반 위치추정의 성능이 우수한 영역이 확장됨을 확인할 수 있다. 이는 사용되는 FM 라디오 송신원의 개수가 증가할수록 FDOA 기반 위치추정 성능 향상 정도가 TDOA 기반 위치추정보다 상대적으로 커짐을 의미한다.

그림 5와 그림 6은 신호수집 시간  $T$ 가 2초인 환경에서 사용되는 FM 라디오 송신원의 수  $N$ 이 각각 8개와 16개인 경우에 표적과의 거리  $R_R$ 에 따른 기법별 위치추정정

확도를 도시하고 있다. 전체적인 위치추정 성능의 경향은 앞선 결과와 유사하지만, 신호수집 시간이 길어짐에 따라 FDOA 추정오차가 낮아져 FDOA 기반 위치추정의 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 결과를 보면, 사용되는 FM 라디오 송신원의 개수  $N$ 이 8개인 경우에 신호수집 시간  $T$ 를 1초에서 2초를 증가시키면, 두 기법의 성능이 역전되는 표적과의 거리가  $R$ 이 5 km, 10 km, 20 km인 경우에 약 14 km, 20 km, 25 km에서 약 25 km, 30 km, 40 km로 증가함을 확인할 수 있다.

또한, 사용되는 FM 라디오 송신원의 개수  $N$ 이 16개인

경우에 신호수집 시간  $T$ 를 1초에서 2초를 증가시키면, 두 기법의 성능이 역전되는 표적과의 거리가  $R$ 이 5 km, 10 km, 20 km인 경우에 약 19 km, 26 km, 30 km에서 약 23 km, 38 km, 50 km로 증가되어 FDOA 기반 위치추정 기법의 성능이 TDOA 기반 위치추정 기법의 성능보다 우수한 영역이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 신호수집 시간  $T$ 를 증가시킴으로써 FDOA 기반 위치추정의 성능이 우수한 영역을 확장시킬 수 있음을 의미한다.

## V. 결 론

본 논문에서는 FM 라디오 기반의 멀티스테틱 PCL 시스템에서 TDOA와 FDOA를 이용한 위치추정 기법을 설명하였고, 다양한 모의실험 환경에서 두 가지 기법에 대한 위치추정 성능을 비교하였다. 모의실험 결과, 표적의 위치가 PCL 시스템 기준으로 상대적으로 근거리에서는 FDOA 기반의 위치추정의 성능이, 상대적으로 원거리에서는 TDOA 기반의 위치추정의 성능이 상대적으로 우수함을 확인하였으나, 사용되는 FM 라디오 송신원의 개수, 신호수집 시간, FM 라디오 송신원과 PCL 시스템 간 거리가 증가할수록 FDOA 기반 위치추정 성능이 더 개선되어 TDOA 기반 위치추정에 비해 성능이 우수한 영역이 증가함을 확인하였다. 본 논문의 결과를 바탕으로 운용환경에 따라 TDOA와 FDOA 기반 위치추정기법을 선택적으로 사용함으로써 FM 라디오 기반 멀티스테틱 PCL 시스템의 위치추정 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

정 인 환 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0114-6381>



2013년 8월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)  
2015년 8월: 한국항공대학교 전파공학과 (공학석사)  
2015년 9월~현재: 국방과학연구소(ADD) [주 관심분야] 전자전, RF, 신호처리, 위치탐지 등

## References

- [1] K. Kulpa, M. P. Malanowski, P. J. Samczynski, P. Krysik, S. Rzewuski, and E. Sliwa, "Application of communication signals for remote sensing," *Procedia Technology*, vol. 17, pp. 99-106, 2014.
- [2] M. Malanowski, K. Kulpa, J. Kulpa, P. Samczynski, and J. Misiurewicz, "Analysis of detection range of FM-based passive radar," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 8, no. 2, pp. 153-159, Feb. 2014.
- [3] P. Krysik, M. Wielgo, J. Misiurewicz, and A. Kurowska, "Doppler-only tracking in GSM-based passive radar," in *17th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, Salamanca, 2014, pp. 1-7.
- [4] H. D. Griffiths, C. J. Baker, *An Introduction to Passive Radar*, Boston, Artech House, 2017.
- [5] I. H. Jeong, S. H. Kim, J. K. Kim, K. H. Song, and B. N. Lee, "Localization performance comparison for multistatic PCL system based on Doppler effect," in *2019 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (KIEES) Summer Conference*, Aug. 2019, vol. 7, p. 384.
- [6] K. Madsen, H. B. Nielsen, and O. Tingleff, *Methods for Non-linear Least Squares Problems*, 2nd ed, Lyngby, IMM, 2004.

김 산 해 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1092-0877>



2000년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)  
2002년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)  
2010년 8월: 숭실대학교 전자공학과 (공학박사)  
2011년 1월~현재: 국방과학연구소(ADD) [주 관심분야] 전자전, 신호처리, 위치탐지 등

곽 현 규 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7972-3038>



2007년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2009년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
2009년 5월~현재: 국방과학연구소(ADD)  
[주 관심분야] 전자전, 통신, 신호처리, 위치탐지 등

이 병 남 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2750-9654>



1987년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
1989년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)  
2009년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)  
1989년 2월~현재: 국방과학연구소(ADD)

[주 관심분야] 전자전, RF, 신호처리 등

송 규 하 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9800-2116>



1996년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
1998년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
2019년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
1998년 2월~현재: 국방과학연구소(ADD)

[주 관심분야] 전자전, 신호처리, 위치탐지, 인공지능 등