

## 고정 신호원의 위치 추정을 위한 직접 위치 결정 기법의 정확도 향상 방법

### Direct Position Determination Method with Improved Accuracy for Estimating Static Source Position

임재혁 · 이승진 · 송종인\* · 정원주 · 이재훈

Jaehyuk Lim · Seungjin Lee · Jong-In Song\* · Wonzoo Chung · Jaehoon Lee

#### 요 약

본 논문에서는 신호원의 수신 신호 정보를 이용하여 직접 신호원 위치를 추정하는 DPD(Direct Position Determination) 기법을 기반으로 향상된 고정신호원 위치 추정 기법을 제안한다. 기존의 DPD 기법을 이용하여 위치 추정을 할 때, 기준 수신기와 다중 이동 수신기 쌍의 선택 방법에 따라 위치 추정 정확도 및 추정오차의 경향이 다르게 나타난다. 이러한 사실을 바탕으로, 각 수신기 쌍에서의 공분산행렬을 이용하여 신호원 위치 추정의 가중치를 얻었으며, DPD 기법에 적용하였다. 마지막으로 제안된 DPD 기법을 이용하여 신호원 위치를 추정하였으며, 기존 DPD 기법과 비교하여 추정 정확도가 향상됨을 확인하였다.

#### Abstract

In this paper, an improved method of estimating static source location is proposed based on the direct position determination(DPD) method, which estimates a source position directly using received signals. When the source position is estimated using the conventional DPD method, the estimation accuracy and error depend on a pair of receivers: a reference receiver and one of the multiple moving receivers. Based on this, the weighting values of the estimating source location were obtained using the covariance matrix for the pair of receivers( $S_1$ ,  $S_2$ ) and applied to the DPD algorithm. Finally, the source position was estimated using the proposed DPD algorithm, and it was verified that the estimation accuracy improved, compared to the conventional DPD algorithm.

Key words: TDOA, FDOA, DPD Algorithm, Source Position Estimation

#### I. 서 론

최근 전자전에서는 기술의 발달에 따른 전장의 광역화로, 보다 정확한 신호원의 위치 추정이 요구되고 있다<sup>[1]</sup>.

수신기에 수신된 신호로부터 알려지지 않은 신호원의 위치를 보다 정확하게 추정하기 위해서 신호 도착시간 차이인 TDOA(Time Difference of Arrival)와 도플러 주파수 차이인 FDOA(Frequency Difference of Arrival) 정보를 이

「The authors gratefully acknowledge the support from Electronic Warfare Research Center at Gwangju Institute of Science and Technology(GIST), originally funded by Defense Acquisition Program Administration(DAPA) and Agency for Defense Development(ADD).」

고려대학교 컴퓨터전파통신공학과(Department of Computer and Communication Engineering, Korea University)

\*광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부(School of Electronic Engineering and Computer Science, Gwangju Institute of Science and Technology)

· Manuscript received September 17, 2018 ; Revised October 2, 2018 ; Accepted November 8, 2018. (ID No. 20180917-098)

· Corresponding Author: Jae-Hoon Lee (e-mail: ejhoon@korea.ac.kr)

용한 위치 추정 방법이 많이 이용되었다<sup>[2]</sup>. 이는 TDOA/FDOA 정보를 이용한 신호원 위치 추정 시 TDOA 혹은 FDOA를 단독으로 이용하는 경우보다 위치 추정에 이용할 수 있는 정보량이 증가하여 보다 정확한 위치 추정이 가능하기 때문이다. 그러나 TDOA/FDOA 정보를 이용한 신호원 위치 추정기법은 신호원의 위치를 추정하기 위해 중간에 수신된 신호를 이용하여 최대공산(maximum likelihood) 기법을 이용해 시간 차이와 도플러주파수 차이를 우선적으로 추정하며, 이러한 우회적 위치 추정 방법은 반복계산에 따른 알고리즘의 복잡도 증가로 연산량 증가 및 위치 추정 정확도 감소 문제를 유발한다. 특히 수신 신호의 중심 주파수가 시간에 따라 변하는 경우, 위치 추정 시 정확도가 더욱 떨어지며, 이를 해결하기 위해, TDOA/FDOA 정보 간 상관관계를 계산하고 이를 위치 추정에 반영하였다<sup>[3]</sup>. 또한 TDOA/FDOA 정보를 이용한 위치 추정 시 반복계산에 따른 연산량 증가를 막기 위해 최소자승법을 적용한 비반복적 위치 추정 방법이 소개되었고<sup>[4]</sup>, 위치 추정 시 정확도가 상대적으로 감소하는 문제를 개선하기 위해, 비선형 최적해를 반복 계산하는 Gauss-Newton 기법을 적용한 위치 추정 방법이 소개되었다<sup>[5]</sup>.

위에서 소개된 방법들과는 다르게, 수신된 신호를 기반으로 TDOA/FDOA 정보를 추출하지 않고 직접 위치를 추정하는 DPD(Direct Position Determination) 기법에 관한 연구가 소개되었다<sup>[6]</sup>. DPD 방식에서는 수신된 신호 및 수신기의 위치, 속도 및 임의의 위치에서의 시간지연과 주파수 도플러 정보를 이용하여 CAF(Cross Ambiguity Function)를 구하게 되며, CAF 값이 최대인 위치를 이용하여

위치 추정을 하게 된다. 하지만 신호원 및 수신기의 위치가 변함에 따라, 위치추정 시 정확도가 일정하게 유지되지 않으며, 이는 다중 수신기를 이용한 위치 추정 시 오차를 유발할 수 있다.

본 논문에서는 기존의 DPD 기법에서 수신기 및 신호원의 추정한 위치에 따른 정확도 가중치를 신뢰도 타원을 이용하여 계산하며, 이를 CAF에 도입함으로써, 위치 추정 시 정확도를 향상시키는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 제안된 방법을 기반으로 한 모의실험을 통해, 기존 DPD 기법과 비교하여 위치 추정 정확도가 향상됨을 확인하고자 한다.

## II. DPD 기법을 이용한 위치 추정

그림 1은 고정신호원으로부터 전파되는 신호를 여러 개의 수신기에서 수신되는 경우를 보여준다. 수신기는 각각 기준 수신기  $S_1$ , 이동 수신기  $S_{2i}(i=1, 2, 3, \dots, N)$ 이며, 고정신호원 및 수신기의 위치 벡터는 각각  $\vec{x}$ ,  $\vec{x}_1$ ,  $\vec{x}_{2i}(i=1, 2, 3, \dots, N)$ 이다. 이 때, 수신기에 수신된 신호  $r_1(t)$ ,  $r_{2i}(t)$  ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ )는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$x(t) = Ae^{j(\omega_0 + \delta \cdot t)t} \quad (1)$$

$$r_1(t) = x(t) + n_1(t), \quad (2)$$

$$r_{2i}(t) = \alpha e^{j(\phi + \nu_i)} x(t - \tau_i) + n_{2i}(t). \quad (3)$$

$x(t)$ 는 첫 번째 수신기에 도달하는 원신호이며,  $A$ 는 신호의 진폭,  $\omega_0$ 는 신호의 중심주파수이고,  $\delta$ 는 시간에 따라 주파수가 변하는 정도를 나타내며,  $n_1(t)$ ,  $n_{2i}(t)$  ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ )는 각 수신기에서의 잡음이다. 2개의 수신기  $S_1$ ,  $S_{2i}$  간 수신된 신호 사이의 신호 지연(TDOA)을  $\tau_i$ , 도플러 주파수 차이(FDOA)를  $\nu_i$ 라 할 때,  $\tau_i$ 와  $\nu_i$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tau_i = \frac{\|\vec{x}_{2i} - \vec{x}\| - \|\vec{x}_1 - \vec{x}\|}{c}, \quad (4)$$

$$\nu_i = \frac{f_c}{c} \left( \vec{v}_{2i} \cdot \frac{\vec{x}_{2i} - \vec{x}}{\|\vec{x}_{2i} - \vec{x}\|} - \vec{v}_1 \cdot \frac{\vec{x}_1 - \vec{x}}{\|\vec{x}_1 - \vec{x}\|} \right). \quad (5)$$

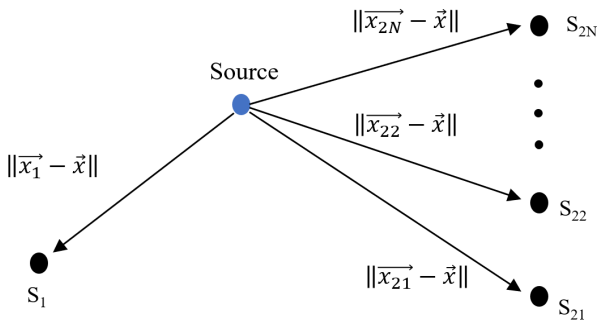


그림 1. 고정신호원 및 수신기  $S_1$ ,  $S_{2i}$ 의 배치도

Fig. 1. The geometry of static source and receivers  $S_1$ ,  $S_{2i}$ .

여기서  $\|\vec{x}_1 - \vec{x}\|$  는 신호원과 기준 수신기 간 거리를,  $\|\vec{x}_{2i} - \vec{x}\|$  는 신호원과 이동 수신기 간 거리를 의미한다. 식 (1)~식 (5)를 이용하여 CAF를 식 (6)과 같이 얻을 수 있으며, CAF 함수의 최대값을 위치벡터를 찾음으로써, 수신기  $S_1, S_{2i}$ 로부터 추정된 고정신호원의 위치벡터  $\hat{x}$ 를 얻을 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$CAF = \int r_1^*(t) r_{2i}(t + \tau_i) e^{j\nu_i t} dt \quad (6)$$

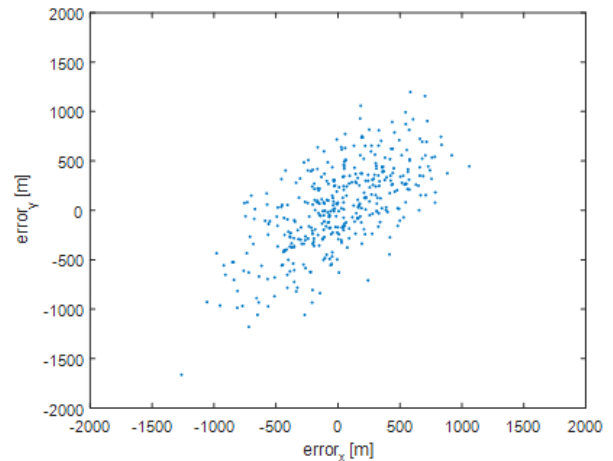
$$\hat{x} = \arg \max_x \int r_1^*(t) r_{2i}(t + \tau_i) e^{j\nu_i t} dt \quad (7)$$

수신기의 위치에 따른 위치 추정 정확도를 확인하기 위해, 식 (4)~식 (7)을 이용하여, 각 수신기 쌍( $S_1, S_{21}$ ), ( $S_1, S_{22}$ )에 대해 기존의 DPD 기법을 이용한 고정신호원 위치 추정을 진행하였다. 고정신호원 위치 및 수신기단  $S_1, S_{2i}(i=1, 2)$ 에서의 위치 및 속도는 각각 표 1과 같으며, 독립실행 횟수는 400회, 고정신호원의 SNR(Signal to Noise Ratio)은 30 dB로 설정하였으며, 해당 결과는 그림 2에 나타나 있다. 수신기쌍( $S_1, S_{2i}$ )에 따른 위치 추정의 경우, 신호원의 위치  $x$ 에 대한 FDOA 변화량과 신호원의 위치  $y$ 에 대한 TDOA 변화량이 매우 적다. 즉, 신호원이 원점에 있는 경우, 신호원의 위치  $y$ 가 변화하여도 TDOA는 일정하며, 신호원의  $x$ 가 변화하여도 FDOA는 일정하다. 따라서, 수신기의 위치가 신호원과 일직선 상에 놓이게 되면,  $x, y$ 에 대한 오차가 커짐을 알 수 있다. 반면, 수신기쌍( $S_1, S_{22}$ )의 경우, 신호원의 위치  $x, y$ 에 대한 TDOA, FDOA 변화량이 대체적으로 증가하여  $x, y$ 에 대한 오차가 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 위치 추정 시  $x, y$ 에 대한 오차를 줄이기 위해  $x, y$ 에 대한 TDOA, FDOA 변화량이 크

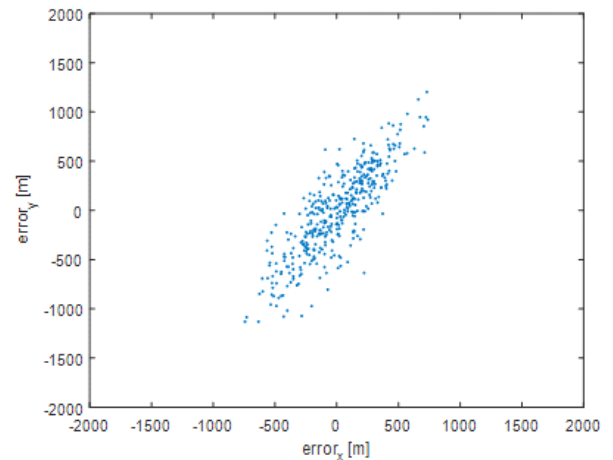
표 1. 고정 신호원 및 수신기단의 위치 및 속도

Table 1. Positions and velocities of static source and receivers.

	Position (m, m)	Velocity (m/s, m/s)
Source	(0, 0)	(0, 0)
$S_1$	(-10,000, 0)	(0, 0)
$S_{21}$	(10,000, 0)	(-70, 70)
$S_{22}$	(5,800, 4,200)	(-70, 70)



(a) ( $S_1, S_{21}$ )



(b) ( $S_1, S_{22}$ )

그림 2. DPD 기법을 이용한 수신기쌍( $S_1, S_{2i}$ )에 따른 고정신호원 위치 추정 결과

Fig. 2. Estimated results for static source position using DPD algorithm with respect to ( $S_1, S_{2i}$ ).

게 되는 수신기쌍의 위치를 찾아야 한다.

### III. 정확도 가중치를 이용한 DPD 기법

앞에서 언급했다시피 일반적인 DPD 기법을 이용하여 위치 추정을 할 경우, 수신기 쌍 ( $S_1, S_{2i}$ )에 따라 위치 추정 정확도 및 추정오차의 경향이 다르게 나타난다. 따라서 각 수신기 쌍에 대한 추정오차를 가중치로 이용하여 보다 높은 위치 추정 정확도를 얻을 수 있다.

CRB(Cramer-Rao Bound)를 이용한 TDOA / FDOA 위치 추정 방법에서는 시간에 따라 주파수가 변하는 신호원에서 수신기와 신호원의 추정된 위치에 따른 공분산행렬 (covariance matrix),  $C_{\tau\nu}$ 를 구할 수 있다<sup>[3]</sup>. 또한 계산한  $C_{\tau\nu}$ 를 기반으로 다음 식을 얻을 수 있다.

$$h(\hat{x}_{0i}) = \begin{bmatrix} \tau_i(\hat{x}_{0i}) \\ \nu_i(\hat{x}_{0i}) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$H(\hat{x}_{0i}) = \frac{\partial h(\hat{x}_{0i})}{\partial \hat{x}_{0i}}, \quad (9)$$

식 (8) 및 식 (9)를 이용하여 공분산행렬  $C_{xy}$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$C_{xy} = [H^T(\hat{x}_{0i})C_{\tau\nu}^{-1}H(\hat{x}_{0i})]^{-1}. \quad (10)$$

식 (8)~식 (10)을 이용하여 각 수신기 쌍( $S_1, S_2$ )( $i=1, 2, 3, \dots, N$ )에 대한  $C_{xy}$ 를 얻을 수 있다. 이를 기반으로 추정된 신호원의 위치( $\hat{x}_{0i}, \hat{y}_{0i}$ )에서의  $P_e$  % 신뢰도 타원을 얻을 수 있으며, 이는 그림 3과 같다. 해당 타원의 넓이는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Area(\hat{x}_{0i}) = \pi a_i b_i \quad (11)$$

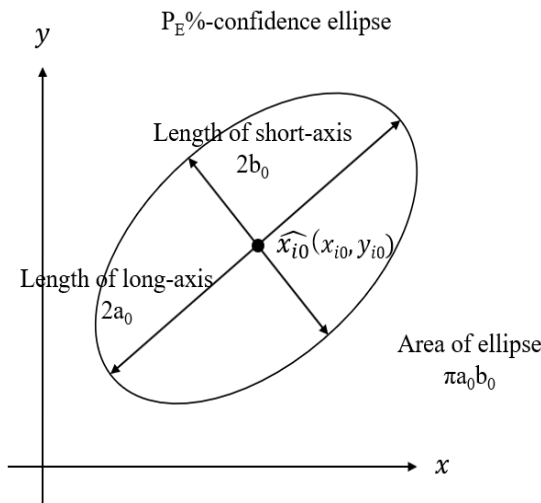


그림 3. 추정된 신호원의 위치 ( $\hat{x}_{0i}, \hat{y}_{0i}$ )에 따른 공분산행렬  $C_{xy}$  기반으로 한  $P_e$  % 신뢰도 타원

Fig. 3. The  $P_e$  %-confidence ellipse based on covariance matrix,  $C_{xy}$ , for estimated source's position ( $\hat{x}_{0i}, \hat{y}_{0i}$ ).

$C_{xy}$ 의  $P_e$  % 신뢰도 타원은 각 수신기 쌍( $S_1, S_2$ )( $i=1, 2, 3, \dots, N$ )에 따라 변하며, 타원의 넓이를 DPD 기법의 가중치로 활용하여, 수신기의 위치에 따른 정확도 차이를 반영하고자 한다. 식 (7), 식 (11) 및  $P_e$  % 신뢰도 타원의 넓이를 이용한 가중치로부터 수신기 쌍( $S_1, S_2$ )( $i=1, 2, 3, \dots, N$ )에 따른  $CAF_i$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$CAF_i = \frac{1}{Area(\hat{x}_{i0})} \int r_1^*(t)r_{2i}(t+\tau_i)e^{j\nu_i t} dt. \quad (12)$$

기준 수신기와 다중 이동 수신기 쌍에서 구한  $CAF_i$ 를 모두 더하여 신호원의 위치를 추정한다.

$$\hat{x} = \underset{\vec{x}}{\operatorname{argmax}} \sum_{i=1}^N \frac{1}{Area(\hat{x}_{i0})} \int r_1^*(t)r_{2i}(t+\tau_i)e^{j\nu_i t} dt. \quad (13)$$

즉, 신호원의 위치  $\vec{x}$ 를 변화하면서,  $CAF_i$  합이 최대가 되는 곳으로 신호원의 위치를 추정하게 된다. 또한, 위치 추정 성능을 향상시키기 위해, 추정된 위치를 이용하여 식 (10)을 갱신하여 반복을 통해 최종 위치를 추정할 수 있으며, 이를 포함한 제안한 DPD 기법을 이용한 신호원 위치 추정 알고리즘 순서도는 그림 4와 같다.

#### IV. 모의실험 결과

본 장에서는 제안한  $C_{xy}$ 를 기반한  $P_e$  % 신뢰도 타원의 넓이를 가중치로 활용한 DPD 기법의 정확도 향상을 확인하기 위해 모의실험을 진행하였다. 고정신호원 위치 및 수신기  $S_1, S_2$  ( $i=1, 2, 3, \dots, N=7$ )의 위치 및 속도는 표 2와 같으며, 기존의 DPD<sup>[3]</sup> 및 가중치를 이용한 DPD 기법을 이용하여 독립시행 횟수 400회의 고정신호원 위치 추정을 진행하였다. 그림 5는 고정신호원 SNR이 15 및 30 dB인 상황에서  $N$ 개의 이동수신기  $S_2$ 에 따른 수신기 쌍( $S_1, S_2$ )( $i=1, 2, 3, \dots, N$ )을 이용하여 고정신호원 위치 추정 RMSE(Root Mean Square Error) 결과를 보여준다. 그림 5(a)에서는 고정신호원의 SNR이 15 dB일 때,  $N$ 개의 이동수신기  $S_2$ 에 따른 고정신호원 위치 추정 RMSE 값을 보여준다. 모든 이동수신기 개수에 대해서, 가중치를 이용한 DPD 기법의 RMSE 값이 기존의 DPD를 이용했을 때보다

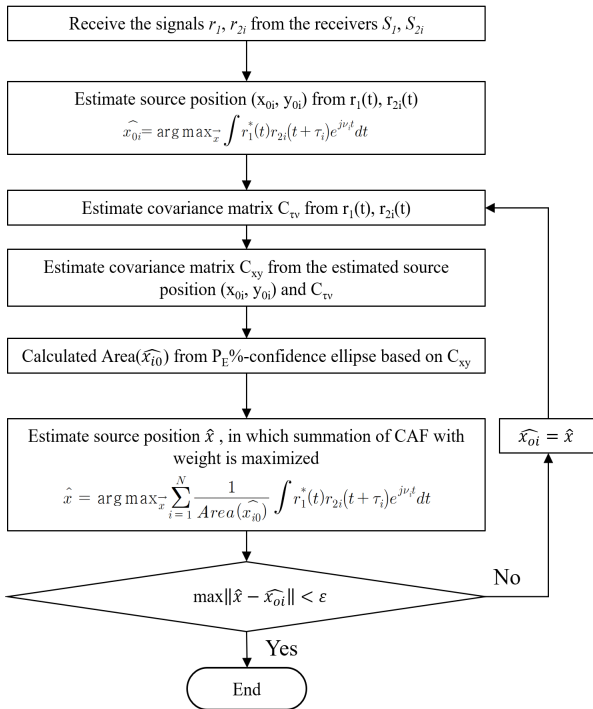


그림 4. 제안한 DPD 기법을 이용한 고정신호원 위치 추정 알고리즘 순서도

Fig. 4. Flowchart of the proposed DPD algorithm to estimate static source location.

표 2. 고정 신호원 및 수신기단의 위치 및 속도

Table 2. Positions and velocities of source and receivers.

	Position (m, m)	Velocity (m/s, m/s)
Source	(0, 0)	(0, 0)
$S_1$	(-10,000, 0)	(0, 0)
$S_{21}$	(10,000, 0)	(-70, 70)
$S_{22}$	(10,000, 70)	(-70, 70)
$S_{23}$	(9,930, 140)	(-70, 70)
$S_{24}$	(9,860, 210)	(-70, 70)
$S_{25}$	(9,790, 280)	(-70, 70)
$S_{26}$	(9,720, 350)	(-70, 70)
$S_{27}$	(9,650, 420)	(-70, 70)

작은 것을 볼 수 있다. 그림 5(b)에서는 고정신호원의 SNR이 30 dB 일 때,  $N$ 개의 이동수신기  $S_{2i}$ 에 따른 고정신호원 위치 추정 RMSE 값을 보여준다. 가중치를 이용한 DPD

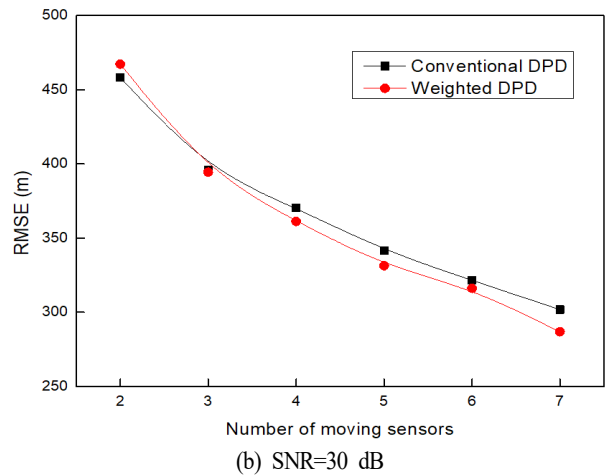
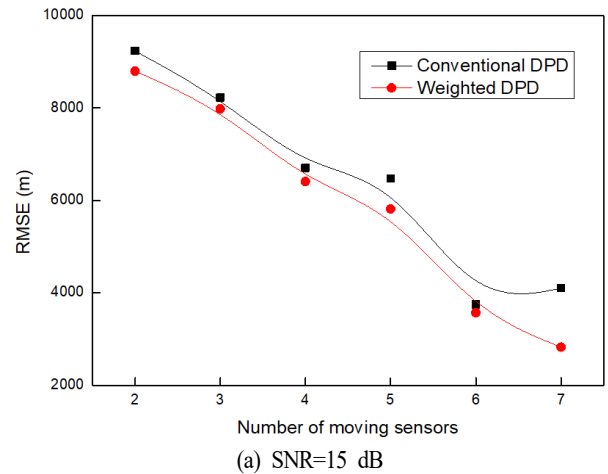


그림 5. 이동수신기 개수에 따른 기존 DPD 및 가중치를 이용한 DPD 기법을 이용한 고정신호원 위치 추정 RMSE 결과

Fig. 5. RMSE results of position estimation for static source location using conventional and weighted DPD with respect to the number of moving receiver.

기법의 RMSE 값이 기존의 DPD를 이용했을 때보다 향상됨을 확인하였다. 따라서, 고정신호원의 SNR이 15 및 30 dB인 경우에 대해서, 가중치를 이용한 DPD 기법이 기존의 DPD보다 정확도가 향상되었음을 확인할 수 있다. 또한 SNR이 30 dB보다 클 경우, 기존 및 가중치를 이용한 DPD 기법 간 위치 추정 성능 개선이 미미함을 확인하였다.

그림 6은 이동수신기  $S_{2i}$ 의 개수  $N$ 이 각각 3, 5, 7개인 상황에서 고정신호원 SNR 값에 따른 고정신호원 위치 추

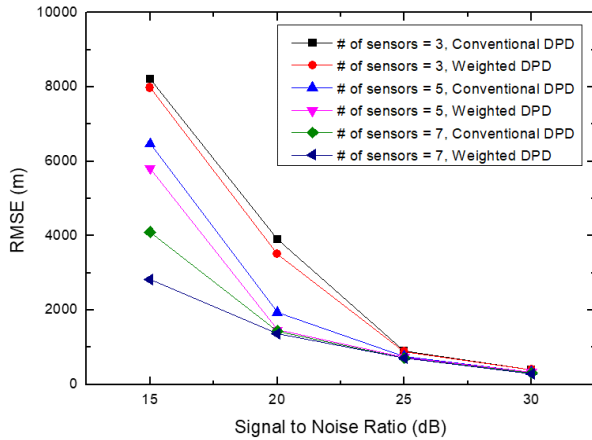


그림 6. SNR 값에 따른 기존 DPD 및 가중치를 이용한 DPD 기법을 이용한 고정신호원 위치 추정 RMSE 결과  
Fig. 6. RMSE results of position estimation for static source location using conventional and weighted DPD with respect to the value of SNR.

정 RMSE 결과를 보여준다. 또한 기존 및 가중치를 이용한 DPD 기법 모두 SNR 값이 증가할수록 이동수신기 개수  $N$ 과 상관없이 RMSE 값이 감소하며, SNR 값이 30 dB에 가까워질수록 RMSE 값이 수렴하는 형태를 보이는 것을 확인하였다. 이는 고정신호원의 잡음에 의한 영향이 작아 질수록 적은 수신기만으로도 위치 추정이 가능할 뿐 아니라, 가중치를 결정하는  $C_{xy}$ 의 영향이 줄어들어 나타나는 것으로 보인다. 하지만 15 dB, 20 dB의 SNR 값에서는 가중치를 고려한 DPD 기법이 기존 DPD 기법과 비교하여 고정신호원 위치 추정 시 충분한 정확도를 향상시킬 수 있는 것을 확인하였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 일반적인 DPD 기법을 이용하여 고정신

호원의 위치를 추정을 할 경우, 수신기에 따라 위치 추정 정확도 및 추정오차의 경향이 모두 달라짐을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로, 각 수신기쌍에서의  $C_{xy}$ 를 기반한  $P_e$  % 신뢰도 타원의 넓이를 가중치로 이용하여 DPD 기법에 적용하였으며, 모의실험을 통해 15 dB, 20 dB의 SNR 값에서는 가중치를 고려한 DPD 기법이 기존 DPD 기법과 비교하여 고정신호원 위치 추정 시 충분한 정확도를 얻음을 확인하였다.

## References

- [1] A. E. Spezio, "Electronic warfare systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 633-644, Mar. 2002.
- [2] S. Stein, "Differential delay/Doppler ML estimation with unknown signals," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, no. 8, pp. 2717-2719, Aug. 1993.
- [3] A. Yeredor, E. Angel, "Joint TDOA and FDOA estimation: A conditional bound and its use for optimally weighted localization," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 4, pp. 1612-1623, Apr. 2011.
- [4] Y. T. Chan, K. C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, no. 8, pp. 1905-1915, 1994.
- [5] 김용희, 김동규, 한진우, 송규하, 김형남 "TDOA/FDOA 정보를 이용한 Gauss-Newton 기법 기반의 이동 신호원 위치 및 속도 추정 방법과 성능 분석, 전자공학회논문지, 50(6), pp. 62-71, 2013년 6월.
- [6] C. Steffes, M. Oispuu, "Direct position determination for TDOA-based single sensor localization," *Journal of Advances in Information Fusion*, vol. 11, no. 2, Dec. 2016.

임 재 혁 [고려대학교/박사과정]



결성 등

2014년 2월: 고려대학교 컴퓨터·통신공학부 (공학사)  
2016년 2월: 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 (공학석사)  
2016년 3월~현재: 고려대학교 전파통신공학과 박사과정  
[주 관심분야] 초고주파 필터설계, 신호 무

정 원 주 [고려대학교/교수]



2008년 3월: 고려대학교 컴퓨터학과 교수  
[주 관심분야] 신호처리, 통계신호학습 등

1989년 2월: 고려대학교 (공학사)  
1999년 5월: Cornell University Electrical Engineering (공학석사)  
2003년 5월: Cornell University Electrical Engineering (공학박사)  
2003년 8월: Dotcast Inc. Senior System Architect

이 승 진 [고려대학교/박사과정]



무결성 등

2014년 2월: 중앙대학교 전자전기공학과 (공학사)  
2016년 2월: 고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과 (공학석사)  
2016년 3월~현재: 고려대학교 전파통신공학과 박사과정  
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 신호

이 재 훈 [고려대학교/교수]



2008년 3월~현재: 고려대학교 컴퓨터학과 교수  
[주 관심분야] 멀티 센서, 초고주파 회로/시스템, 마이크로웨이브 포토닉스, 광통신 시스템

1997년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)  
1999년 2월: 한국과학기술원 전기공학과 (공학석사)  
2003년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)  
2003년 3월~2008년 2월: 삼성전자 통신

연구소

송 중 인 [광주과학기술원/교수]



1980년 2월: 서울대학교 전자과 (공학사)  
1982년 2월: 한국과학기술원 전자공학 (공학석사)  
1990년 10월: Columbia University Electrical Engineering (공학박사)  
1994년 6월~현재: 광주과학기술원 교수