

# 다중 송신기-다중 수신기 PCL 시스템에서 수신기 배치에 따른 표적의 위치 추정에 대한 CEP 기반의 성능 분석

김호재, 허규민, 김동규, 박근호, 김형남<sup>Ⓞ</sup>  
부산대학교

hnkim@pusan.ac.kr<sup>Ⓞ</sup>

## CEP-Based Performance Analysis of Target Location Estimation by Receiver Placement in the Multitransmitter-Multireceiver PCL Systems

Ho Jae Kim, Gyumin Heo, Dong-Gyu Kim, Geun-Ho Park, Hyoung-Nam Kim<sup>Ⓞ</sup>  
Pusan National Univ.

### 요약

본 논문은 다중 송신기-다중 수신기 환경에서 passive coherent location (PCL) 시스템의 위치 추정에 대한 CEP (circular error probable)를 유도하고 수신기 배치에 따른 표적의 위치 추정 성능을 분석한다. PCL 시스템의 가장 큰 특징은 송신기와 수신기가 이격된 레이더를 사용하며, 수신기는 이동 가능하기 때문에 수신기 배치에 따라 특정 지역에서 표적의 위치 추정 성능에 영향을 미친다. 이러한 점을 고려하여 다중 송신기-다중 수신기 환경에서 수신기 배치에 따라 표적의 위치 추정 성능 분석이 필요하며, CRLB (Cramer-Rao lower bound)를 통하여 유도되는 CEP 를 이용하여 수신기 배치에 따라 특정 위치에서 표적의 위치 추정 성능을 분석한다.

### I. 서론

PCL (passive coherent location) 시스템은 상용 방송 신호 (FM, DVB, DMB 등)를 이용하는 바이스태틱 레이더(bistatic radar) 구조를 기반으로 표적을 탐지하고 위치를 추정하는 응용분야이다. 바이스태틱 레이더 구조를 이용하여 표적의 위치를 탐지하는 방식은 송신신호의 직진 신호와 표적 반사신호의 시간차를 이용하여 표적의 위치를 추정한다. 이 때 두 신호의 시간차를 이용하여 획득한 정보를 바이스태틱 거리 정보라고 하며, 바이스태틱 거리 정보를 이용하면 그림 1 과 같이 표적의 위치를 송신기와 수신기를 초점으로 하는 타원으로 나타낼 수 있다[1]. 다수의 바이스태틱 레이더 쌍을 이용하여 다수의 타원들이 교차하는 부분을 표적의 위치로 추정할 수 있다. 최근에는 표적 탐지 성능을 향상시키기 위해 다중 송신기-다중 수신기 환경에서 표적의 위치 추정에 대한 연구들이 진행되고 있다[2].

PCL 시스템의 가장 큰 특징은 수신기가 이동 가능하도록 설계되는 것이다[3]. 이로 인하여 상용 방송 신호를 이용하는 지역은 수신기의 배치를 통하여 표적의 위치 추정이 가능하다. 수신기가 이동 가능하므로, 수신기 배치에 따른 표적의 위치 추정 성능에 대해 분석할 필요가 있다[3]. 이에 본 논문은 CRLB (Cramer-Rao lower bound)를 통하여 유도되는 CEP (circular error probable)를 이용하여 수신기 배치에 따른 표적의 위치 추정 성능 변화를 분석한다.

### II. 다중 송신기-다중 수신기 상황의 Cramer-Rao Lower Bound

신호모형과 오차요인의 확률특성에 의해 관측모형의 확률밀도함수(probability density function, PDF)가 주어질 경우, CRLB 를 이용하여 추정치에 대한 분산의 이론적인 하한을 구할 수 있다[4]. 다중 송신기-다중 수신기 상황에서 CRLB 를 유도하기 위해 먼저  $M$  대의 송신기와  $N$  대의 수신기를 통해 수집된 바이스태틱 거리 정보와 공분산 정보가 필요하다.  $k$  번째 송신기와  $l$  번째

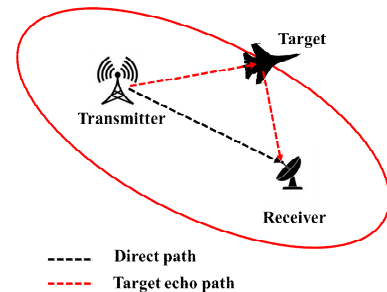


그림 1. 바이스태틱 거리 타원

수신기를 통하여 획득한 바이스태틱 거리 정보를  $R_{Tk,RI}$ , 바이스태틱 거리 정보 측정 값의 표준 편차를  $\sigma_{Tk,RI}$  이라 할 경우, 바이스태틱 거리 벡터  $\mathbf{R}$  과 오차 공분산  $\mathbf{C}$  를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R} = [R_{T1,R1} \cdots R_{T1,RN} \quad R_{T2,R1} \cdots R_{TM,RN}]^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{C} = \text{diag}[\sigma_{T1,R1}^2 \cdots \sigma_{T1,RN}^2 \quad \sigma_{T2,R1}^2 \cdots \sigma_{TM,RN}^2]. \quad (2)$$

CRLB 는 FIM (fisher information matrix)의 역행렬로 나타내며, 이 때 FIM 은 확률분포를 가지는 추정 파라미터에 대해 유추할 수 있는 정보량을 의미한다[5]. 다중 송신기-다중 수신기 상황에서 FIM 은 식 (3)과 같다.

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}_t) = \mathbf{H}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H}. \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{H}$  는 자코비안 행렬을 나타내며, 자코비안의 각 성분은 바이스태틱 거리 벡터  $\mathbf{R}$  을 표적의 위치에 대해서 미분한 항으로 식 (4)와 같다.

$$[\mathbf{H}]_{i1} = \frac{\partial [\mathbf{R}(\mathbf{x}_t)]_i}{\partial x_t}, \quad [\mathbf{H}]_{i2} = \frac{\partial [\mathbf{R}(\mathbf{x}_t)]_i}{\partial y_t}. \quad (4)$$

여기서  $x_t$  와  $y_t$  는 표적의 위치를 나타낸다. 식 (3)에서 구한 FIM 의 역행렬이 CRLB 로 정의되므로, 최종 CRLB

행렬은 식 (5)과 같다.

$$\mathbf{C}_{CRLB}(\mathbf{x}_t) = [\mathbf{I}(\mathbf{x}_t)]^{-1} = (\mathbf{H}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H})^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{x,CRLB}^2 & \sigma_{xy,CRLB} \\ \sigma_{xy,CRLB} & \sigma_{y,CRLB}^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

### III. Circular Error Probable

각 축에 대한 오차로 추정 성능이 표현되는 CRLB 와는 달리, 2 차원 평면상에서 추정 값의 공간적인 분포 특성을 타원의 궤적으로 표현할 수 있으며, 이 때 타원을 오차 타원 (error ellipse)이라고 한다[5]. 오차 타원을 구하기 위해서는 앞서 구한 CRLB 를 고유 값 분해를 통하여 고유 값을 구한다.

$$\mathbf{C}_{CRLB}(\mathbf{x}_t) = \mathbf{Q}\mathbf{A}\mathbf{Q}^T = [\mathbf{q}_1 \quad \mathbf{q}_2] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^T \\ \mathbf{q}_2^T \end{bmatrix}. \quad (6)$$

여기서 고유 값  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  는 다음과 같다.

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left[ \sigma_{x,CRLB}^2 + \sigma_{y,CRLB}^2 + \sqrt{(\sigma_{x,CRLB}^2 - \sigma_{y,CRLB}^2)^2 + 4\sigma_{xy,CRLB}^2} \right], \quad (7)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \left[ \sigma_{x,CRLB}^2 + \sigma_{y,CRLB}^2 - \sqrt{(\sigma_{x,CRLB}^2 - \sigma_{y,CRLB}^2)^2 + 4\sigma_{xy,CRLB}^2} \right]. \quad (8)$$

그러나 오차 타원을 사용하여 위치 추정 성능을 분석할 경우 특정한 위치에 대한 추정 성능만 분석할 수 있다. 따라서, 일정한 범위에 대한 위치 추정 성능 분석을 위하여 오차 타원을 통하여 유도되는 CEP 를 이용하여 표적의 위치 추정 성능을 분석한다. 오차 타원의 장축 및 단축의 길이는 고유 값으로 나타나며, 이를 CEP 로 근사할 경우 CEP 값은 다음과 같다.

$$\text{CEP} \cong 0.75 \sqrt{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (9)$$

최종 유도된 CEP 는 원의 반지름을 나타내며, 원의 반지름 정보를 사용하여 특정 위치뿐만 아니라 2 차원 전 영역에서 위치 추정 성능의 비교가 가능하다.

### IV. 모의실험

그림 2 와 그림 3 은 송신기 3 대, 수신기 2 대가 배치된 상황에서 x 축 및 y 축 -200 ~ 200 km 내에서의 CEP 를 도시한 것으로서, 송신기의 위치는  $\mathbf{x}_{r1} = [0 \quad 25]^T \text{ km}$ ,  $\mathbf{x}_{r2} = [12.5\sqrt{3} \quad -12.5]^T \text{ km}$ ,  $\mathbf{x}_{r3} = [12.5\sqrt{3} \quad -12.5]^T \text{ km}$  으로 고정하였고, 수신기의 위치는 그림 2 의 경우  $\mathbf{x}_{r1} = [-50 \quad 0]^T \text{ km}$ ,  $\mathbf{x}_{r2} = [50 \quad 0]^T \text{ km}$  에 배치하였다. 또한, 그림 3 의 경우  $\mathbf{x}_{r1} = [-50 \quad 0]^T \text{ km}$ ,  $\mathbf{x}_{r2} = [0 \quad 50]^T \text{ km}$  에 배치하여 모의실험을 진행하였다. 모든 위치에서 바이스태틱 거리 오차의 표준편차는 200m 로 고정하여 실험을 진행하였다.

그림 2 와 그림 3 의 모의 실험 결과를 통하여 수신기의 배치에 따라서 표적의 위치 추정 성능이 다른 것을 알 수 있다. 두 상황 모두 수신기의 연결선을 기준으로 수직인 방향으로 표적의 위치 추정 성능이 우수하다. CEP 값이 200 이하인 영역이 그림 2 의 경우 북쪽 방향으로 약 150 km 까지 분포되어 있으며, 그림 3 의 경우 북동쪽 방향으로 약 100 km 까지 분포되어 있음을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 다중 송신기-다중 수신기 상황에서 수신기 배치에 따른 표적의 위치 추정 성능을 분석하기 위해 CRLB 를 통하여 유도되는 CEP 를 이용하여 표적의

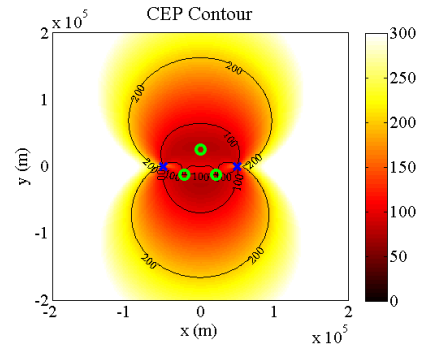


그림 2. 바이스태틱 거리 타원

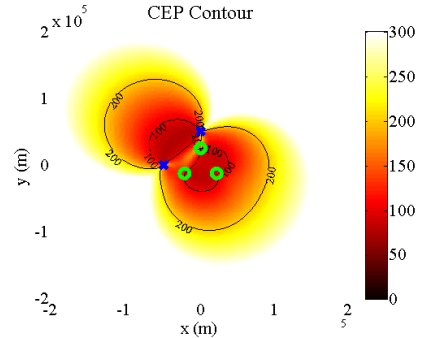


그림 3. 바이스태틱 거리 타원

위치 추정 성능을 분석하였다. 수신기 배치에 따라 표적의 위치 추정 성능의 분포가 달라지는 것을 CEP 를 이용하여 확인하였으며, 수신기의 연결선을 기준으로 수직인 방향으로 표적의 위치 추정 성능이 우수한 것을 확인하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

Put sponsor acknowledgments.

### 참고 문헌

- [1] M. Malanowski, "Algorithm for Target Tracking Using Passive Radar," *INTL Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 58, no. 4, pp. 345–350, 2012
- [2] A. Noroozi, M. A. Sebt, "Target Localization from Bistatic Range Measurements in Multi-Transmitter Multi-Receiver Passive Radar" *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 12, Dec. 2015
- [3] Nicholas J. Wills and Hugh D. Griffiths, *Advances in Bistatic Radar*, SciTech Inc, 2007.
- [4] S. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Prentice Hall, 1993.
- [5] D. Torrieri, "Statistical theory of passive location systems," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 20, no.2, pp.183–198, March, 1984