다중 송신기-다중 수신기 PCL 시스템에서 바이스태틱 레이더의 위치 추정 성능 분석

김호재, 김동규, 박근호, 박진오*, 이원진*, 고재헌*, 김형남©
부산대학교, *LIG Nex1

hnkim@pusan.ac.kr©

Analysis on the Position Estimation Performance of a Bistatic Radar in Multitransmitter-Multireceiver PCL Systems

Ho Jae Kim, Dong-Gyu Kim, Geun-Ho Park, Jin-Oh Park*, Won-Jin Lee*,
Jae Heon Ko*, Hyoung-Nam Kim©
Pusan National Univ., *LIG Nex1

요 약

본 논문은 다중 송신기-다중 수신기 환경에서 Passive Coherent Location (PCL) 시스템의 위치추정에 대한 CRLB (Cramer-Rao lower bound)를 유도하고 바이스태틱 거리 오차에 따른 추정 성능을 분석한다. 기존의 다중 송신기-단일 수신기를 사용한 위치추정 연구들이 진행되었지만, 특정 지역의 가용 송신기 수는 한정되어 있으며, 송신기의 탐지영역을 벗어날 경우 위치 추정이 어려운 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 다중 송신기-다중 수신기 환경의 위치추정이 필요하다. 이에 따라 다중 송신기-다중 수신기 상황에서 CRLB 를 통하여 특정 위치에서 이론적인 위치추정 성능을 분석하고, 이를 통해 요구되는 위치 추정 성능을 얻기 위한 최대 바이스태틱 거리 오차를 도출한다.

Ⅰ. 서 론

PCL (Passive Coherent Location) 시스템은 상용 방송 신호 (FM, DVB, DMB 등)를 이용하는 바이스태틱 레이더(Bistatic Radar)를 사용하여 표적을 탐지하고 위치를 추정하는 응용분야이다. 바이스태틱 레이더는 송신신호의 직진 신호와 표적 반사신호의 시간차에 대응하는 바이스태틱 거리 정보를 이용하여 표적의 위치를 추정한다. 바이스태틱 거리 정보는 기하학적으로 그림 1 과 같이 송신기와 수신기를 초점으로 하는 타원에 대응되며, 그림 2 와 같이 여러 쌍의 바이스태틱 레이더를 이용한 다수의 타원들의 교점으로부터 표적의 위치를 추정한다. 기존의 단일 수신기로 여러 쌍의 바이스태틱 거리 정보를 획득하기 위해서는 다수의 송신기가 필수적이다[1]. 그러나 특정 지역의 가용 송신기 수는 한정되어 있고, 송신기의 탐지영역을 벗어날 경우 위치 추정이 어려운 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 최근 다중 송신기-다중 수신기를 사용한 연구들이 진행되고 있다[2].

본 논문에서는 2 차원의 다중 송신기-다중 수신기 상황에서 바이스태틱 레이더의 이론적인 추정 성능 분석을 위해 CRLB(Cramer-Rao lower bound) 를 유도하고, CRLB 를 통하여 이론적인 하한을 분석한다.

Ⅱ. 바이스태틱 거리

그림 3 은 바이스태틱 레이더의 송신기, 수신기 및 표적의 위치에 따라 발생하는 기하구조를 나타낸다[3]. 바이스태틱 기하 구조에서 바이스태틱 거리는 송신된 신호가 표적에 반사되어 수신기까지 신호원이 도달한 거리를 나타낸다. 바이스태틱 거리를 이용하여 표적의 위치 추정이 가능하며, i번째 송신기의 위치 $\mathbf{x}_{Ti}=[x_{Ti} \quad y_{Ti}]^T$, j번째 수신기의 위치 $\mathbf{x}_{Rj}=[x_{Rj} \quad y_{Rj}]^T$, 표적의 위치 $\mathbf{x}_t=[x_t \quad y_t]^T$ 일 경우 바이스태틱 거리 $R_{Ti,Rj}$ 는 식 (1)과 같다.

$$R_{Ti,Rj}=\sqrt{(x_{Ti}-x_t)^2+(y_{Ti}-y_t)^2}+\sqrt{(x_t-x_{Rj})^2+(y_t-y_{Rj})^2} \qquad (1)$$

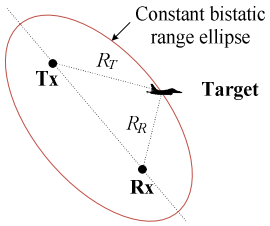

그림 1. 바이스태틱 거리 타원

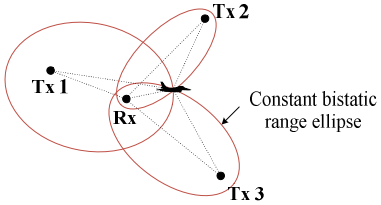

그림 2. 여러 개의 바이스태틱 거리 타원

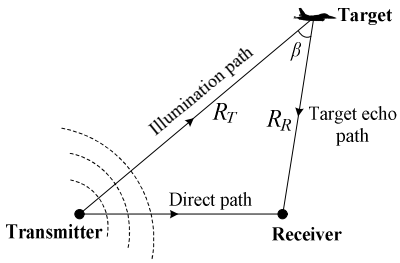

그림 3. 바이스태틱 기하 구조

이렇게 구한 바이스태틱 거리 정보들은 바이스태틱 거리 타원간의 교점을 이용하여 표적의 위치를 추정 가능하다.

Ⅲ. Cramer-Rao Lower Bound

신호모형과 오차요인의 확률특성에 의해 관측모형의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)가

주어진 경우, CRLB 를 이용하여 추정치에 대한 분산의 이론적인 하한을 구할 수 있다[4].

CRLB를 유도하기 위한 신호 모델은 ***M***대의 송신기와 ***N***대의 수신기를 통해 수집된 바이스태틱 거리 정보들로 나타내며 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{T1,R1} & \cdots & R_{T1,RN} & R_{T2,R1} & \cdots & R_{TM,RN} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

이때 측정된 측정 값을 $\mathbf{R}_m$ 으로 정의하면 측정 값은 바이스태틱 거리 벡터 **R** 과 잡음 **n** 이 더해진 형태로 측정된다. 이 때 잡음 **n** 은 평균이 0 이며 공분산 **C** 를 가지는 정규분포라고 가정하며, 공분산 **C** 는 식 (3)과 같다.

$$\mathbf{C} = \mathrm{diag}(\begin{bmatrix} \sigma^2_{T1,R1} & \cdots & \sigma^2_{T1,RN} & \sigma^2_{T2,R1} & \cdots & \sigma^2_{TM,RN} \end{bmatrix}) \quad (3)$$

CRLB 는 FIM(Fisher Information Matrix)의 역행렬로 나타내며, 이때 FIM 은 확률분포를 가지는 추정 파라미터에 대해 유추할 수 있는 정보량을 의미한다[5]. 다중 송신기-다중 수신기 상황에서 FIM 은 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}_t) = \mathbf{H}^T\mathbf{C}^{-1}\mathbf{H} \quad (4)$$

여기서 **H** 는 자코비안 행렬을 나타내며 식 (5)와 같다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_{T1,R1}}{\partial x_t} & \cdots & \frac{\partial R_{T1,RN}}{\partial x_t} & \frac{\partial R_{T2,R1}}{\partial x_t} & \cdots & \frac{\partial R_{TM,RN}}{\partial x_t} \\ \frac{\partial R_{T1,R1}}{\partial y_t} & \cdots & \frac{\partial R_{T1,RN}}{\partial y_t} & \frac{\partial R_{T2,R1}}{\partial y_t} & \cdots & \frac{\partial R_{TM,RN}}{\partial y_t} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

식 (4)에서 구한 FIM 의 역행렬이 CRLB 로 정의되므로, 최종 CRLB 행렬은 식 (6)과 같다.

$$\mathbf{C}_{CRLB}(\mathbf{x}_t) = \left[\mathbf{I}(\mathbf{x}_t)\right]^{-1} = (\mathbf{H}^T\mathbf{C}^{-1}\mathbf{H})^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{x,CRLB} & \sigma_{xy,CRLB} \\ \sigma_{xy,CRLB} & \sigma^2_{y,CRLB} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ⅳ. 모의실험

그림 4 는 표적의 위치 $\mathbf{x}_t = [-20 \quad 20]^T \,\mathrm{km}$ 에서 CRLB 를 구하기 위해 송신기 3 대, 수신기 2 대를 배치하였다. 송신기의 위치 $\mathbf{x}_{T1} = [0 \quad 25]^T \,\mathrm{km}$, $\mathbf{x}_{T2} = [12.5\sqrt{3} \quad -12.5]^T \,\mathrm{km}$, $\mathbf{x}_{T3} = [12.5\sqrt{3} \quad -12.5]^T \,\mathrm{km}$, 수신기의 위치 $\mathbf{x}_{R1} = [-50 \quad 0]^T \,\mathrm{km}$, $\mathbf{x}_{R2} = [50 \quad 0]^T \,\mathrm{km}$ 에 배치하여 모의실험을 진행하였다.

그림 5 는 그림 4 의 송· 수신기 배치 및 표적의 위치에서 바이스태틱 거리 오차에 따른 x, y 값의 CRLB 를 구한 그림이다. 바이스태틱 거리 오차가 증가함에 따라 위치 추정의 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 바이스태틱 거리 오차가 500m 일 경우 x 축의 추정 오차의 하한은 약 180m, y 축의 추정 오차의 하한은 약 200m 이다. 현재 표적의 위치에서 x 축과 y 축의 위치 추정 오차가 100m 이내가 되도록 추정 성능을 설정해야 할 경우, 바이스태틱 거리 추정 오차를 약 250m 이내로 추정할 수 있도록 수신기를 배치 하고 운용해야 한다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 다중 송신기-다중 수신기 상황에서 바이스태틱 레이더를 이용한 이론적인 위치 추정 성능을 분석하기 위해 CRLB 를 유도하고, CRLB 를 이용하여 특정한 배치 상황에서 이론적인 위치 추정 성능을 분석하였다. 바이스태틱 거리 오차가 커질수록 표적의 위치 추정 성능이 저하되는 것을 확인하였다. 이를 통하여 원하는 표적의 위치 추정에 대한 목표 성능을 만족시키기 위하여 요구되는 최대 바이스태틱 거리의 허용오차를 도출할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 LIG Nex1 의 “PCL 위치탐지기술 연구 (계약번호 Y16-009)”에 대한 연구용역으로 수행하였음.

참 고 문 헌

[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] Rasim Akin Sevimli, “TARGET DETECTION AND IMAGING ON PASSIVE BISTATIC RADAR SYSTEMS,” M.S. thesis, department of electrical and electronics engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey, Sep. 2014

[4] S. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory, Prentice Hall, 1993.

[5] 김동규, 김용희, 한진우, 송규하, 김형남,“ TDOA/FDOA 융합 기반 신호원의 위치추정 및 성능 분석 ,” 한국통신학회논문지 , vol. 38C, no.9, pp. 746-756, 2013 년 9 월.

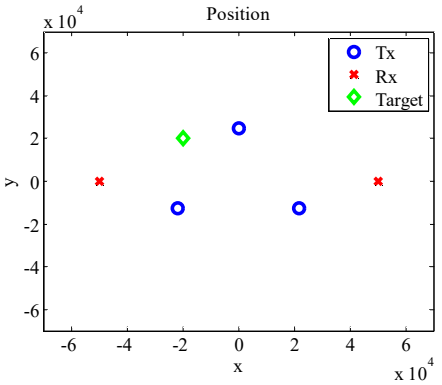

그림 4. 모의실험을 위한 송 · 수신기 배치

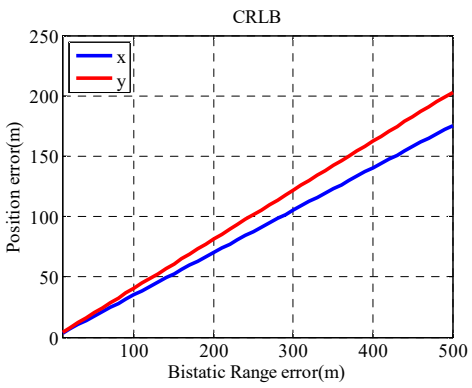

그림 5. 위치 추정 CRLB