

MmWave 네트워크 환경에서 측위 오차의 CRLB

조훈기, 정방철, 고흥호, 김효원
충남대학교 전자공학과

e-mail: chhk7562@o.cnu.ac.kr, {bcjung, hhko, hyowon.kim}@cnu.ac.kr

Cramér–Rao Lower Bound of UE Position Estimates for mmWave Networks

Hungi Cho, Bang Chul Jung, Hyongho Ko, and Hyowon Kim
Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract

Integrated sensing and communication (ISAC) is a key enabler for beyond fifth-generation (B5G) systems, where spatial information is highly correlated to the channel environment consisting of different types of multi-target. In this paper, we first compute the Fisher information matrix (FIM) of the channel parameters, and derive the position error bounds (PEBs). We evaluate the performance of the PEBs with the different orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) channel parameters.

I. 서론

5G 이후의 통신세대에서 사용자 어플리케이션 및 서비스 제공을 위해 밀리미터파(mmWave: millimeter wave) 이상의 고주파 대역을 활용한 센싱 및 통신 결합(ISAC: integrated sensing and communication)이 주요 연구 주제로 주목받고 있다. 이는 사용자 단말(UE: user equipment)의 공간정보를 정확하게 파악하는 것이 중요한 핵심 요건이다[1], [2]. 이에 본 논문에서는 밀리미터파 대역의 직교 주파수 분할 다중화(OFDM: orthogonal frequency division multiplexing) 신호를 수신하는 단말의 위치추정 오차 한계(PEB: position error bound)를 유도한다. 채널 매개변수에 따른 FIM(Fisher information matrix) 계산을 통해 PEB를 유도하고, 성능을 평가한다.

II. 본론

1개의 기지국(BS: base station)과 1개의 사용자 단말이 있다. 이 때 전역축에서 기지국과 사용자 단말의 위치와 n 번째 안테나 성분의 위치는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{x}_{\text{BS}} = [x_{\text{BS}}, y_{\text{BS}}, z_{\text{BS}}]^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{\text{UE}} = [x_{\text{UE}}, y_{\text{UE}}, z_{\text{UE}}]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_{\text{BS}}^n = [x_{\text{BS}}^n, y_{\text{BS}}^n, z_{\text{BS}}^n]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_{\text{UE}}^n = [x_{\text{UE}}^n, y_{\text{UE}}^n, z_{\text{UE}}^n]^T, \quad (4)$$

이를 이용해 지역축에서 안테나 중심과 각 안테나 성분 사이의 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\star}^n = \mathbf{O}_{\star}^T (\mathbf{x}_{\star} - \mathbf{x}_{\star}^n), \quad (5)$$

$\mathbf{O}_{\star} = [\mathbf{O}_{\star,1}, \mathbf{O}_{\star,2}, \mathbf{O}_{\star,3}]$ 는 지역축에서 전역축으로 회전행렬이고, 각 벡터는 $\mathbf{O}_{\star,1} = [\cos\alpha_{\star}, \sin\alpha_{\star}, 0]^T$, $\mathbf{O}_{\star,2} = [-\sin\alpha_{\star}, \cos\alpha_{\star}, 0]^T$, $\mathbf{O}_{\star,3} = [0, 0, 1]^T$, α_{\star} 는 안테나의 방향을 의미한다. \star 는 안테나가 설치된 디바이스 종류(즉, \star 은 기지국 또는 사용자 단말)를 의미하며, 모든 안테나 성분 위치행렬은 다음과 같이 나타낸다.

$$\tilde{\mathbf{X}}_{\star} = [\tilde{\mathbf{x}}_{\star}^1, \dots, \tilde{\mathbf{x}}_{\star}^{N_{\star}}], \quad (6)$$

여기서 N_{\star} 는 디바이스의 안테나 성분 개수이다.

기지국은 T 개의 OFDM 파일럿 심볼을 N_{SC} 개의

부반송파(subcarrier)에 실어서 신호를 송신하고, 단말은 신호를 수신한다. 단말에서 t 번째 파일럿 심볼과 s 번째 부반송파에 대응하는 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_{t,s} = \sqrt{E_s} \beta \mathbf{w}_t^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}(\phi) \mathbf{f}_t e^{-j2\pi \Delta_f (s-1)\tau} + n_{t,s}, \quad (7)$$

위 수식에서 E_s 는 각 심볼이 가지는 에너지, β 는 복소 채널 이득, $\mathbf{w}_t \in \mathbb{C}^{N_{UE} \times 1}$, $\mathbf{f}_t \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times 1}$ 는 각각 단말에서의 아날로그 합산벡터, 기지국에서의 프리코딩 벡터, $\mathbf{a}(\theta)$, $\mathbf{a}(\phi)$ 는 각각 사용자 단말에서 신호의 도착각과 기지국의 출발각에 의한 배열 응답 벡터를 의미한다. 도착각과 출발각은 각각 $\theta = [\theta^{az}, \theta^{el}]^T$, $\phi = [\phi^{az}, \phi^{el}]^T$, 각 열은 방위각(azimuth)과 고도각(elevation)이고, Δ_f 는 부반송파 주파수간격, τ 는 전파 지연시간이다. 각 디바이스의 배열 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{a}_\star(\boldsymbol{\varphi}) = \exp(j\check{\mathbf{X}}_\star^T \mathbf{g}(\boldsymbol{\varphi})), \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{g}(\boldsymbol{\varphi})$ 는 파장 벡터로, 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\varphi}) = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos(\varphi^{az})\sin(\varphi^{el}), \sin(\varphi^{az})\sin(\varphi^{el}), \cos(\varphi^{el})]^T,$$

$n_{t,s} \sim CN(0, \sigma_N^2)$ 는 수신 신호 잡음이다. 수식 (7)에서 잡음을 제외한 수신 신호 $\bar{y}_{t,s}$ 의 모든 부반송파를 포함하는 수신 신호 벡터 $\bar{\mathbf{y}}_t = [\bar{y}_{t,1}, \dots, \bar{y}_{t,N_{SC}}]^T$ 의 채널 매개변수 벡터 $\boldsymbol{\eta} = [\tau, \theta^{az}, \theta^{el}, \phi^{az}, \phi^{el}, \beta_{Re}, \beta_{Im}]^T$ 에 대한 FIM을 다음과 같이 유도할 수 있다[3].

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \frac{2}{\sigma_N^2} \sum_{t=0}^T \text{Re} \left\{ \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{y}}_t}{\partial \boldsymbol{\eta}} \right)^H \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{y}}_t}{\partial \boldsymbol{\eta}} \right) \right\}, \quad (9)$$

유도한 FIM을 블록 행렬의 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})_{11} & \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})_{12} \\ \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})_{21} & \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})_{22} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

유도한 FIM을 통해 채널 이득의 영향을 제외시킨 EFIM(equivalent Fisher information matrix)을 다음의 수식과 같이 계산한다[4], [5].

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}_0) = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})_{11} - \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})_{12} \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})_{22}^{-1} \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})_{21}, \quad (11)$$

주어진 EFIM을 통해 사용자 단말 상태벡터에 관한 FIM을 다음과 같이 유도할 수 있다[5].

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}_{UE}) = \mathbf{T}^T \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}_0) \mathbf{T}, \quad (12)$$

여기서 \mathbf{T} 는 자코비안(Jacobian) 변환행렬이며 채널 매개변수와 자코비안 행렬은 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{T} = \frac{\partial \boldsymbol{\eta}_0}{\partial \mathbf{x}_{UE}}, \quad (13)$$

마지막으로 사용자 단말 상태벡터의 FIM을 통해 PEB를 다음 수식과 같이 계산한다[5].

$$\text{PEB} = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_{UE}))_{1:3,1:3}}. \quad (14)$$

III. 성능평가

본 논문의 시뮬레이션에 사용된 환경은 1개의 기지국과 1개의 사용자 단말이 마주 보고 있다. 따라서, 기지국의 전연축과 지역축은 일치한다. 즉, α_{BS} 는 0, α_{UE} 는 π 이다. 단말과 기지국의 위치는 각각 $\mathbf{x}_{UE} = [0, 0, 0]^T$, $\mathbf{x}_{BS} = [300, 500, 0]^T$ 이고, $f_c = 30\text{GHz}$, $B = 200\text{MHz}$, $\Delta_f = B/N_{SC}$, $E_s = P/B$, P 는 기지국의 송신 전력, 신호잡음의 분산 σ_N^2 는 -168 dBm/Hz 이다. 복소 채널 이득은 $\beta = |\beta|e^{-j2\pi f_c \tau} = \beta_{Re} + j\beta_{Im}$ 으로, 크기는 $|\beta| = \lambda^2 / (16\pi^2 \|\mathbf{x}_{UE} - \mathbf{x}_{BS}\|)$ [5], $\lambda = c/f_c$ 는 파장, c 는 광속, N_{BS} 는 $25 \times 25 = 625$, N_{UE} 는 $5 \times 5 = 25$, 기지국과 단말의 안테나 성분 사이의 거리는 $\lambda/2$ 이다[6]. OFDM 신호 송신을 위한 매개변수 $P = 20\text{dBm}$, $T = 10$, $N_{SC} = 400$ 로 설정하였고, P , T , N_{SC} 중 하나의 매개변수 값의 변화에 따른 채널 매개변수 벡터 $\boldsymbol{\eta}$ 의 FIM 및 단말의 위치추정 오차 한계를 계산한다. 수식 (7)의 채널 매개변수는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = \frac{\|\mathbf{x}_{UE} - \mathbf{x}_{BS}\|}{c}, \quad (15)$$

$$\theta^{az} = \text{atan2}(\check{y}_{BU}, \check{x}_{BU}), \quad (16)$$

$$\theta^{el} = \text{acos}\left(\frac{\check{z}_{BU}}{\|\mathbf{x}_{BU}\|}\right), \quad (17)$$

$$\phi^{az} = \text{atan2}(\check{y}_{UB}, \check{x}_{UB}), \quad (18)$$

$$\phi^{el} = \text{acos}\left(\frac{\check{z}_{UB}}{\|\mathbf{x}_{UB}\|}\right), \quad (19)$$

위 수식에서 사용된 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_{BU} = \mathbf{x}_{BS} - \mathbf{x}_{UE} = [x_{BU}, y_{BU}, z_{BU}]^T, \quad (20)$$

$$\mathbf{x}_{UB} = \mathbf{x}_{UE} - \mathbf{x}_{BS} = [x_{UB}, y_{UB}, z_{UB}]^T, \quad (21)$$

$$\check{\mathbf{x}}_{BU} = [\check{x}_{BU}, \check{y}_{BU}, \check{z}_{BU}]^T = \mathbf{O}_{UE}^T \mathbf{x}_{BU}, \quad (22)$$

$$\check{\mathbf{x}}_{UB} = [\check{x}_{UB}, \check{y}_{UB}, \check{z}_{UB}]^T = \mathbf{O}_{BS}^T \mathbf{x}_{UB}, \quad (23)$$

성능평가 결과는 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션 샘플 100회를 평균하여 산출하였다. 그림 1-3은 각각 신호의 송신 전력, 부반송파 개수, 송신 심볼 개수의 변화에 따른 사용자 단말 위치 추정 오차범위를 나타낸 결과이다.

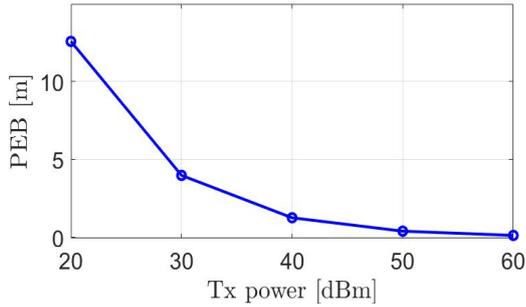


그림 1 송신 전력 변화에 따른 PEB

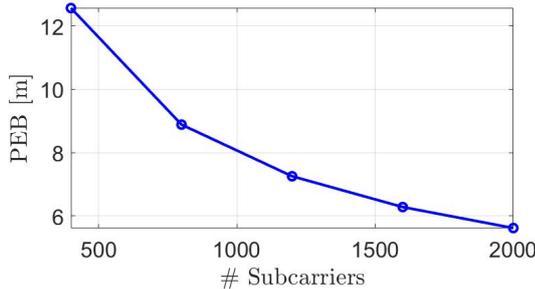


그림 2 부반송파 개수에 따른 PEB

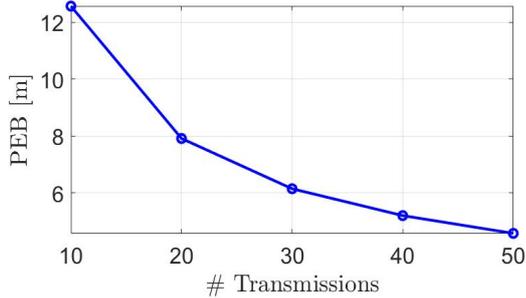


그림 3 송신 심볼 개수에 따른 PEB

위 시뮬레이션 결과를 통해 위치추정 오차 한계는 신호의 송신 전력, 부반송파 개수, 송신 심볼의 개수가 증가함에 따라 오차 한계가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 본 시뮬레이션 결과를 통해 고주파 대역에서 OFDM 신호를 사용하는 통신환경의 경우, 같은 주파수대역을 사용할 때 채널 매개변수 송신 전력, 부반송파 개수, 송신 심볼 개수 값과 사용자 단말 위치 추정 오차 한계는 상관관계가 있는 것을 확인하였다.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 mmWave 주파수대역에서 OFDM 신호를 사용한 기지국-사용자 단말간의 통신에서 채널 매개변수의 변화에 따른 사용자 단말 위치 오차범위를 계산하였다. 위 시뮬레이션에서는 사용자 단말의

이동성이 없는 경우에 대한 결과를 확인하였지만, 이동성이 추가되는 경우 도플러효과의 인접 주파수 간섭에 의한 위치 오차 하한에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 (No.2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 그리고 사단정찰 무인기(RQ-102k)용 통합 대기 자료 센서(IADP) 과제(C230021)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] L. Fan *et al.*, "Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1728-1767, Jun. 2022.
- [2] S. Li *et al.*, "A novel ISAC transmission framework based on spatially-spread orthogonal time frequency space modulation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1854-1872, Jun. 2022.
- [3] S. Kay, *Fundamental of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. Prentice Hall Signal Processing Series, 1993.
- [4] K. B. Petersen and M. S. Pedersen, *The Matrix Cookbook*. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 2006.
- [5] Z. Abu-Shaban *et al.*, "Error bounds for uplink and downlink 3D localization in 5G millimeter wave systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 8, pp. 4939-4954, Aug. 2018.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015.