

# 모노스태틱 센싱을 위한 기지국-물체의 시간지연 추정

한규웅, 김효원

충남대학교 전자공학과

gyuwoong.han@o.cnu.ac.kr, hyowon.kim@cnu.ac.kr

## Time Delay Estimation Between Base Station-Target for Monostatic Sensing

Gyuwoong Han and Hyowon Kim

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

### 요약

본 논문은 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 기반 모노스태틱 ISAC(integrated sensing and communication) 시스템에서 기지국과 표적 물체 간의 거리 정보를 내포하는 시간 지연(time delay) 추정 성능을 다룬다. 기지국은 수신 신호를 바탕으로, DFT(discrete Fourier transform) 기반 추정 알고리즘을 수행, 시간 지연을 산출한다. 시뮬레이션을 반복하여 각 기지국에서의 시간 지연 RMSE(root mean square error)를 도출한 후 CRLB(Cramér-Rao lower bound)와 비교하여 성능을 확인한다.

### I. 서론

6G 이동통신의 핵심 기술인 ISAC(integrated sensing and communication)은 통신과 센싱 시스템을 통합하여 자원 효율을 극대화한다[1]. 특히 mmWave 광대역 신호를 활용한 ISAC은 정밀한 거리 해상도를 제공하여, 자율주행 차량과 같은 미래형 운송수단 구현의 기술적 토대가 된다[2]. OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)은 기존 통신용 신호를 센싱에 재사용할 수 있어 ISAC 파형의 유력한 후보지만[3], mmWave 대역의 높은 신호 감쇄 환경에서 신뢰성을 보장하기 위해서는 성능 평가가 선행되어야 한다.

본 논문은 mmWave 대역의 모노스태틱 ISAC 시스템에서 OFDM 수신 신호 모델을 설정한다. 이후 채널 파라미터 속 거리 정보를 내포하는 시간 지연을 DFT(discrete Fourier transform) 기반 알고리즘을 통해 추정한다. 이에 대한 성능을 여러 기지국에서의 RMSE(root mean square error)와 CRLB(Cramér-Rao lower bound)의 비교를 통해 평가한다.

### II. 본론

본 시스템은 모노스태틱 기지국의 표적 물체 센싱 시나리오를 가정한다. 총 기지국의 수는  $M = 12$  개이고  $T_{\text{pilot}}$  개의 OFDM 파일럿 심볼과  $K$  개의 부반송파(subcarrier)로 신호를 생성한다. 기지국과 물체 간의 거리는  $r$ , 빛의 속도는  $c$ 라 할 때, 왕복 시간 지연은  $\tau = 2r/c$ 로 정의한다. 기지국이 송신한 신호가 물체에 반사되어 되돌아온 수신 신호 벡터  $\mathbf{y}$ 는 다음과 같이 모델링 한다.

$$\mathbf{y}_m = \sqrt{E_s} \alpha_m \mathbf{d}(\tau_m) + \omega_m, \quad m = 1, \dots, M \quad (1)$$

여기서  $E_s$ 는 각각의 파일럿 심볼 에너지, 잡음  $\omega_m$ 은 신호 잡음 분산이  $\sigma_\omega^2$ 라고 하였을 때  $\omega_m \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_\omega^2 \mathbf{I})$ 이다.  $\alpha_m$ 은 복소 경로 이득으로, 이득의 크기  $|\alpha_m|$ 는 레이더 방정식에 따라 안테나 이득  $G$ , 파장  $\lambda$ 와 물체의 RCS(radar cross section)  $\sigma_{\text{RCS}}$ 에

의해  $|\alpha_m| = \sqrt{G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{RCS}} / ((4\pi)^3 r_m^4)}$ 로 나타내고, 그 위상은 반송파 주파수  $f_c$ 와 시간 지연  $\tau$ 에 의한 회전 성분과 랜덤 위상 오프셋  $\phi$ 를 포함하여  $\alpha = |\alpha_m| e^{-j(2\pi f_c \tau + \phi)}$ 와 같이 표현한다. 부반송파 간격을  $\Delta f$ 라고 하였을 때, 조향벡터  $\mathbf{d}(\tau_m)$ 의  $k$ 번째 원소는 다음과 같다.

$$\mathbf{d}(\tau_m)_k = e^{-j2\pi k \Delta f \tau_m}, \quad k = -\frac{K-1}{2}, \dots, \frac{K-1}{2} \quad (2)$$

수신 신호의  $\tau$ 를 추정하기 위해  $N_{\text{DFT}}$ -point DFT를 수행한다. DFT 샘플 인덱스를  $p = 0, \dots, N_{\text{DFT}} - 1$ 라 할 때, DFT 연산 결과  $\mathbf{Y}_m[p]$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y}_m[p] = \sum_{k=-(K-1)/2}^{(K-1)/2} y_{m,k} e^{j2\pi kp / N_{\text{DFT}}}, \quad (3)$$

위 식의 크기를 최대화하는 DFT 샘플 인덱스  $\hat{p}_m = \underset{p}{\text{argmax}} |\mathbf{Y}_m[p]|$ 를 찾고 샘플링 주기  $T_s = 1/(N_{\text{DFT}} \Delta f)$ 에 적용하여 시간 지연 추정값  $\hat{\tau}_m = \hat{p}_m T_s$ 를 구한다.

표 1. 성능 평가에 사용된 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
반송파 주파수	$f_c = 28 \text{ GHz}$
대역폭	$B = 40 \text{ MHz}$
파장	$\lambda = 0.0107 \text{ m}$
부반송파 간격	$\Delta f = 30 \text{ kHz}$
부반송파 개수	$K = 1272$
DFT 크기	$N_{\text{DFT}} = 262,144$
송신 전력	$P_{\text{tx}} = 10 \text{ dBm}$
안테나 이득	$G = 0 \text{ dBi}$
신호 잡음 분산	$\sigma_\omega^2 = -166 \text{ dBm/Hz}$
표적 물체 위치	$[0, 0, 0]^T \text{ m}$
표적 물체 RCS	$\sigma_{\text{RCS}} = 20 \text{ m}^2$

표 2. 기지국들의 좌표 및 물체와의 거리

기지국	X 축[m]	Y 축[m]	Z 축[m]	거리[m]
1	16	16	16	27.7
2	-24	-28	26	45.1
3	25	-25	-25	43.3
4	-15	15	-15	26.0
5	45	5	0	45.3
6	5	27	12	30.0
7	0	0	24	24.0
8	-35	10	-10	37.8
9	10	-42	10	44.3
10	-20	-20	-20	34.6
11	13	34	-6	36.9
12	22	-22	22	38.1

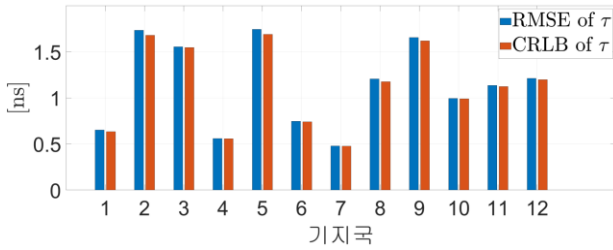


그림 1. 기지국 별 시간 지연 추정 RMSE 및 CRLB

추정 성능 검증을 위해 이론적 한계인 CRLB를 산출한다. 우선  $m$  번째 기지국 수신 신호의 잡음을 제외한 신호 벡터를  $\bar{\mathbf{y}}_m$ , 채널 파라미터 벡터를  $\bar{\boldsymbol{\eta}}_m = [\tau_m, \text{Re}\{\alpha_m\}, \text{Im}\{\alpha_m\}]^T$  라고 하였을 때 FIM(Fisher information matrix)은 다음과 같다.

$$\mathbf{F}(\bar{\boldsymbol{\eta}}_m) = \frac{2}{\sigma_\omega^2} \sum_{t=0}^{T_{\text{pilot}}-1} \text{Re} \left\{ \left( \frac{\partial \bar{\mathbf{y}}_{m,t}}{\partial \bar{\boldsymbol{\eta}}_m} \right)^H \left( \frac{\partial \bar{\mathbf{y}}_{m,t}}{\partial \bar{\boldsymbol{\eta}}_m} \right) \right\}, \quad (4)$$

본 추정에서는  $\tau_m$  만을 다루고 있으므로, 슈어 보수행렬(Schur complement)을 통해 시간 지연에 대한 EFIM(equivalent Fisher information matrix)을 계산해야 한다. 불필요 파라미터인  $\alpha_m$  이 사전에 알려져 있다고 가정했을 때  $\tau_m$  의 정보량을  $\mathbf{F}_{\tau_m \tau_m}$ ,  $\alpha_m$  에 대한 불확실성을  $\mathbf{F}_{\alpha_m \alpha_m}^{-1}$ , 그리고  $\tau_m$  과  $\alpha_m$  간의 교차 정보를  $\mathbf{F}_{\tau_m \alpha_m}$  라고 하였을 때 EFIM을 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\mathbf{F}_{\tau_m}^{\text{EFIM}} = \mathbf{F}_{\tau_m \tau_m} - \mathbf{F}_{\tau_m \alpha_m} \mathbf{F}_{\alpha_m \alpha_m}^{-1} \mathbf{F}_{\alpha_m \tau_m}^T, \quad (5)$$

최종적으로  $\mathbf{F}_{\tau}^{\text{EFIM}}$  에 역수 및 제곱근을 취하여  $\text{CRLB} = \sqrt{(\mathbf{F}_{\tau}^{\text{EFIM}})^{-1}}$ , CRLB를 도출한다.

### III. 시뮬레이션 및 성능 평가

DFT 기반 추정 기법의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행한다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 파라미터, 표 2는 기지국들의 좌표 및 거리이다. 추가적으로  $T_{\text{pilot}} = 10$  개이고  $T_s = 0.13$  ns 이며, 10,000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1과 같이 표적 물체는 원점에 위치하고, 표 2와 같이

12개의 기지국들은 물체로부터 약 20~50 m 거리 내에 임의로 배치된 시나리오를 가정한다. 각 기지국은 독립적으로 표적 물체와의 시간 지연을 추정하며, 그림 1은 이에 대한 RMSE를 이론적 한계인 CRLB와 비교한 결과이다.

그림 1을 분석하면, 거리에 따른 신호 감쇠 정도에 따라 RMSE의 차이가 발생하지만 모든 기지국에서의 RMSE가 CRLB에 가까운 결과를 보임으로써 12개의 기지국 모두 시간 지연을 준수하게 추정하였음을 확인할 수 있다.

### IV. 결론

본 논문에서는 mmWave 대역의 OFDM 기반 모노스테틱 ISAC 시스템에서 다양한 위치에 있는 기지국과 표적 물체 간의 시간 지연을 DFT를 통해 추정했다. 시뮬레이션 결과, 기지국 전체에서 RMSE가 CRLB에 근접한 수준을 나타냄에 따라 추정 방식의 유효성을 검증하였다. 본 연구결과는 6G 이동통신 환경에서 고해상도 센싱 구현을 위한 기초 자료로서의 의미를 갖는다. 향후 연구에서는 시간 지연 외에도 도플러 주파수 및 도래각과 같은 채널 파라미터들을 추가로 추정하는 방향으로 확장해 나갈 계획이다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 한국연구재단 기초연구사업(No. RS-2025-25415939), 한국연구재단 대학기초연구소지원사업(G-LAMP)(No. RS-2025-25442707), 그리고 한국연구재단(No. NRF-2023R1A2C3002890)의 지원을 받아 수행된 연구임.

### 참고 문헌

- [1] F. Dong *et al.*, "Sensing as a service in 6G perceptive networks: A unified framework for ISAC resource allocation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 5, pp. 3522-3536, May 2023.
- [2] J. Singh *et al.*, "Multi-beam object-localization for millimeter-wave ISAC-aided connected autonomous vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 74, no. 1, pp. 1725-1729, Jan. 2025.
- [3] J. Tan *et al.*, "Sensing integrated DFT-spread OFDM waveform and deep learning-powered receiver design for terahertz integrated sensing and communication systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 1, pp. 482-497, Jan. 2025.