

다중경로 무선 채널 환경에서 군집화 알고리즘을 통한 OFDM-ISAC 시스템의 성능 향상

이하은, 이영석, 정방철
충남대학교 전자공학과

e-mail : haeunlee@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Improvement of OFDM-ISAC Systems Using Clustering Algorithm in Multipath Wireless Channel Environment

Ha-Eun Lee, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract

In this paper, we propose an orthogonal frequency division multiplexing-based integrated sensing and communication (OFDM-ISAC) system that can simultaneously process localization of user equipment (UE) and communication in multipath channel environments. Specifically, the proposed system considers index modulation, where the UE maps data to orthogonal sequence indices. Then, the base station (BS) exploits the autocorrelation of the received signal and the array antenna to estimate not only the UE's data but also its location at the same time. Additionally, we introduce a clustering algorithm for precise localization in multipath channel environments. Through extensive simulations, we verify that the proposed OFDM-ISAC system can perform data estimation and precise localization of the UE even if there is no line-of-sight (LoS) path.

I. 서론

동일한 무선 자원과 신호 웨이브폼을 이용해 단말의 위치 정보와 통신 데이터를 동시에 추정할 수 있는 통합 센싱 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템이 차세대 이동통신 시스템을 위한 유망 기술로 주목받고 있다 [1]. 그러나, 이중 서비스 간 성능 트레이드-오프(trade-off) 등의 문제로 추가적인 수신 하드웨어를 도입해 전통적인 통신 시스템과의 호환성 문제에 직면할 수 있다. 한편, 다중 경로 페이딩에 강인한 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기법은 차세대 통신 시스템에서도 핵심 기술로 활용될 것으로 예상된다 [2]. 이로 인해, OFDM 기반 ISAC 시스템 연구가 학계 및 산업계에서 주목받고 있다 [3], [4]. 구체적으로, [3]에서는 송수신기 간 가시선(line-of-sight: LoS) 경로가 확보되지 않은 국부 산란(local scattering) 채널 환경에서 시퀀스 기반 OFDM-ISAC 시스템을 제안하였으나 직교 시퀀스는 오직 센싱 서비스를 위해서만 사용되었다. [4]에서는 LoS 경로가 항상 확보되었을 때 단말이 전송한 단일 직교 시퀀스를 통해 센싱과 통신 서비스를 동시에 수행할 수 있는 OFDM-ISAC 시스템을 제안하였다.

따라서, 본 논문에서는 LoS 경로가 항상 확보될 수 없는 실제적인 통신 환경을 고려하여 [5]에서 제안한 직교 시퀀스

스 기반 OFDM-ISAC 시스템을 국부 산란 채널 환경으로 확장하여 LoS 경로가 없어도 단말의 위치를 정밀하게 추정할 수 있는 군집화(clustering) 알고리즘 기반 OFDM-ISAC 시스템을 제안한다. 또한, 모의실험을 통해 제안하는 기법이 실제적인 통신 환경에서도 정밀한 측위 및 통신 성능을 가질 수 있음을 검증한다.

II. 제안하는 OFDM-ISAC 시스템

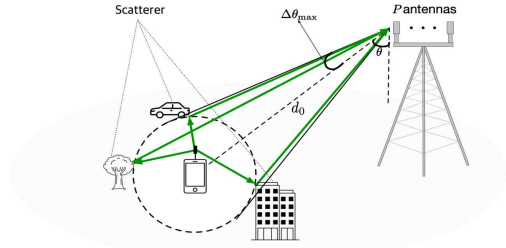


그림 1. 국부 산란 채널 환경 OFDM-ISAC 시스템 모델.

본 논문에서는 그림 1과 같이 P 개의 원소를 갖는 균일 선형 배열안테나(uniform linear array antenna: ULA)가 탑재된 기지국과 단일 안테나를 구비한 단말로 구성된 상향링크 OFDM-ISAC 시스템을 고려한다. 이때, 기지국은 $x-y$ 평면상 $(0,0)$ 에 존재하고, 단말은 $(x,y) = (d_0 \cos \theta, d_0 \sin \theta)$ 좌표에 고정되어 있다고 가정하였다. 여기서 d_0 는 기지국과 단말 간 직선거리를 나타내고, $\theta (\in [-\pi/2, \pi/2])$ 는 기지국 기준 단말 위치에 대한 방향을 나타낸다. 본 논문에서는 [3]과 같이 국부 산란 채널 모델을 가정해 기지국과 단말 간 LoS 경로는 확보되지 않았고, L 개의 비가시선(non-LoS: NLoS) 경로를 통해 신호를 수신한다고 가정한다. 또한, 본 논문에서는 기지국과 단말 간 완벽한 시간 동기를 가정한다 [4].

본 논문에서는 [4]와 같이 단말이 전송하고자 하는 데이터를 직교 시퀀스 인덱스에 매핑하여 해당 시퀀스를 전송하는 OFDM-ISAC 시스템을 고려한다. 이때, 기지국은 수신한 직교 시퀀스를 통해 단말이 전송한 데이터 뿐만 아니라 시퀀스의 자기 상관성과 배열안테나를 이용해 d_0 와 θ 를 추정하여 단말의 위치를 동시에 추정하고자 한다. 구체적으로, 단말은 N_s 길이의 직교 시퀀스인 $\mathbf{s}_0$ 에 간격 N_{CS} 의 순환 이동을 통해 생성된 $M = \lfloor N_s / N_{CS} \rfloor$ 개의 시퀀스에 전송하고자 하는 비트열을 매핑한다. 따라서

$\lfloor \log_2 M \rfloor$ 비트 정보는 다음과 같은 송신 후보 시퀀스 인덱스에 매핑되어 전송될 수 있다.

$$S = \{\mathbf{s}_0, \mathbf{s}_{N_{CS}}, \dots, \mathbf{s}_{(M-1)N_{CS}}\}.$$

설명의 용이성을 위해, 본 논문에서는 단말이 기지국으로 $i (\in \{1, \dots, M\})$ 째 후보 시퀀스인 $\mathbf{s}_{(i-1)N_{CS}}$ 를 송신하는 상황을 고려한다. 이후, [4]와 같은 OFDM 절차를 통해 기지국의 $p (\in \{1, \dots, P\})$ 째 안테나에서 $n (\in \{0, \dots, N_s - 1\})$ 째 시간 수신 신호는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$y_p(n) \approx \tilde{h}_p(n) \otimes s_{(i-1)N_{CS}} \left(n - \left\lfloor \frac{N_{\text{over}}}{N_{\text{FFT}}} \tau_p \right\rfloor \right) + w_p(n).$$

여기서, N_{FFT} , τ_p , $w_p(n)$ 는 각각 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform: FFT)의 크기, 단말로부터 기지국의 p 째 안테나까지의 전파 지연, 시간 영역 부가 잡음을 의미한다. 또한, $\tilde{h}_p(n)$ 는 단말과 기지국의 p 째 안테나 간 $l (\in \{0, \dots, L\})$ 째 다중 경로에 해당하는 무선 채널인 $\sqrt{d_l}^\alpha h_p(l)$ 를 N_{FFT} 크기의 FFT를 수행한 후 N_s 의 정수 배인 N_{over} 크기의 역 이산 푸리에 변환(inverse discrete FT: IDFT)을 통해 오버샘플링을 수행한 n 째 시간 채널 성분을 의미한다. 이때, d_l 과 α 는 각각 l 째 전파 경로 거리와 경로 감쇄를 나타낸다. 국부 산란 채널 모델의 특성으로 ULA에 수신될 때 l 째 다중 경로 신호의 도래각은 $\theta + \Delta\theta_l$ 과 같으며, $\Delta\theta_l (\in [-\Delta\theta_{\text{max}}, \Delta\theta_{\text{max}}])$ 은 l 째 다중 경로 구성 요소의 각도 편차를 나타낸다 [4]. 단말과 기지국의 p 째 안테나 간 l 째 무선 채널은

$$h_p(l) = \beta e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (p-1)r \cos(\theta + \Delta\theta_l)} \quad \text{로 표현되며, 이때 } \lambda \text{는 파장, } r \text{은 안테나 이격거리, } \beta_l \text{은 복소 채널 이득을 나타낸다.}$$

본 논문에서는 기지국의 p 째 안테나의 수신 신호와 직교 시퀀스 $\mathbf{s}_0$ 간 상관값이 최대가 되는 인덱스 κ_p 를 통해 시퀀스 인덱스를 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{i}_p = \left\lfloor \frac{\kappa_p}{N_{\text{CSover}}} \right\rfloor, N_{\text{CS,over}} = \left\lfloor \frac{N_{\text{CS}} \cdot N_{\text{over}}}{N_s} \right\rfloor.$$

최종적으로, 기지국은 P 개의 안테나에서 검출한 인덱스 중 최빈값을 단말이 송신한 시퀀스 인덱스로 복조해 송신 비트를 검출한다. 한편, κ_p 와 $\hat{i}_p$ 의 차이는 전파 지연과 잡음에 의한 지연으로 해석될 수 있어, 기지국의 p 째 안테나와 단말 간 거리는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{d}_{\kappa_p} = c \cdot T_s \cdot \frac{N_{\text{FFT}}}{N_{\text{over}}} \cdot (\kappa_p - \hat{i}_p).$$

여기서, c 와 T_s 는 각각 빛의 속도와 샘플링 시간을 의미한다. 이후, 상관 기반의 방향탐지 기법을 활용해 κ_p 에 해당하는 경로의 도착각을 $\hat{\theta}_p$ 으로 추정할 수 있다. LoS 경로가 확보되지 않아 추정한 $\hat{d}_{\kappa_p}$ 과 $\hat{\theta}_p$ 는 각각 실제 거리와 방향과 다소 오차가 있을 수 있다. 따라서, 본 논문에서는, $\hat{i}_c \in \{\hat{i}_p, \dots, \hat{i}_p + N_{\text{CS}} - 1\}$ 째 인덱스의 거리와 방향을 추정한 후 군집화 기법을 수행해 단말의 위치를 추정한다. 구체적으로 본 논문에서는 밀도 기반 공간 군집화(density-based spatial clustering of applications with noise: DBSCAN) 알고리즘을 도입하여, 데이터 반경 ϵ 내에 ζ 개의 데이터가 있을 때 하나의 군집으로 분류한다. 이후, 군집의 각도 데이터의 평균과 추정 거리 데이터의 최솟값을 각각 단말의 방향 $\hat{\theta}$ 과 거리 $\hat{d}_0$ 로 추정한다.

III. 모의실험 결과 및 결론

표 3. 모의실험 환경.

Parameter	Value	Parameter	Value
단말과 기지국 간 직선거리(d_0)	100 m	단말의 도래각(θ)	45°
FFT 크기(N_{FFT})	2048	최대 각도 편차($\Delta\theta_{\text{max}}$)	5°
CP 크기(N_{CP})	256	중심 주파수(f_c)	1.8 GHz
기지국 안테나 수 (P)	16	다중 경로 수 (L)	10

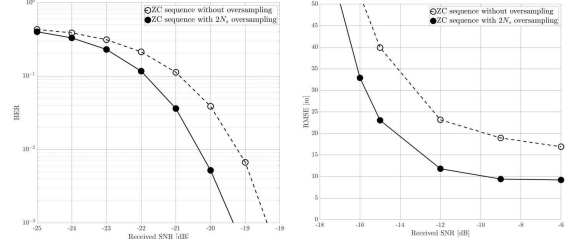


그림 2. 제안하는 OFDM-ISAC 시스템의 통신 및 측위 성능

그림 2는 제안하는 따른 군집화 알고리즘 기반 OFDM-ISAC 시스템의 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR) 대비 통신 및 측위 성능을 각각 비트 당 오류율(bit-error rate: BER)과 단말 위치 추정치에 대한 제공된 평균 제곱 오차(root mean squared error: RMSE) 결과이다. 본 논문에서는 직교 시퀀스로써 Zadoff-Chu 시퀀스를 고려하였으며, 6비트 전송을 위해 $N_s = 839$, $N_{\text{CS}} = 13$ 로 설정하였다. 또한, 시퀀스 인덱스와 비트열 간 64 위상 편이 변조 방식의 그레이 매핑을 도입하였다. DBSCAN 군집화 알고리즘을 위한 파라미터로써 ϵ 과 ζ 는 각각 0.2와 2로 설정하였고, 부반송파 간격은 15kHz로 설정하였다. 이외의 모의실험 환경은 표 1과 같다. 그림 2를 통해, 시퀀스 인덱스 변조를 통해 우수한 BER 성능을 가질 수 있음을 확인하였으며, LoS 경로가 없는 채널 환경에서도 수신 SNR이 -6dB일 때 대략 10미터의 측위 성능을 가질 수 있음을 검증하였다.

Acknowledge

이 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지원(No. IITP-2024-RS-2024-00436406) 및 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00396992)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] Z. Wei *et al.*, "Integrated sensing and communication signals toward 5G-A and 6G: A survey," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 13, pp. 11068-11092, Jul. 2023.
- [2] M. S. J. Solaija, S. E. Zeglar, and H. Arslan, "Orthogonal frequency division multiplexing: The way forward for 6G physical layer design?," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 19, no. 1, pp. 45-54, Jan. 2024.
- [3] K. Xu *et al.*, "Channel feature projection clustering based joint channel and DoA estimation for ISAC massive MIMO OFDM system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 3, pp. 3678-3689, Mar. 2024.
- [4] 이하은, 이영석, 이인기, 정방철, "5G NR 프리앰블을 활용한 OFDM 기반 통합 탐지 및 통신 시스템," *한국통신학회 하계종합학술발표회*, pp. 474-475, Jun. 2024.