

의도적 간섭에 강인한 다중 사용자 OFDM 기반 통합 센싱 및 통신 기법

이하은, 이영석, 이호원, 정방철

아주대학교

haeunlee@ajou.ac.kr, youngseoklee@ajou.ac.kr, howon@ajou.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

Robust Multi-User OFDM-based Integrated Sensing and Communication Technique Under Intentional Interference

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

Ajou University

요약

본 논문에서는 의도적 간섭원이 존재하는 환경에서 다중 단말을 지원하는 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 통합 탐지 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 시퀀스 인덱스 변조 기반 송수신 기법을 통해 다중 단말의 통신 비트 복원과 위치 추정을 동시에 수행하며, 군집화 알고리즘을 활용하여 비가시선(non-line-of-sight: NLoS) 채널 및 간섭원 환경에서도 위치 추정 성능을 안정적으로 유지할 수 있음을 모의실험을 통해 확인한다.

I. 서론

차세대 이동통신에서는 동일한 무선 자원으로 통신과 센싱을 동시에 수행하는 통합 센싱 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 기술이 핵심 서비스로 주목받고 있다 [1]. 기존 통신 프로토콜과의 호환성을 확보하기 위해 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 ISAC 기술이 활발히 연구되고 있다. [2]에서는 직교 시퀀스 인덱스 변조를 활용하여 단일 단말의 통신 비트 복원과 위치 추정을 동시에 수행하는 OFDM-ISAC 시스템이 제안되었다. 그러나 해당 기법은 단일 단말 환경을 대상으로 하며, 비가시선(non-line-of-sight: NLoS) 채널 및 의도적 간섭원이 존재하는 환경에서는 허위 관측점으로 인해 위치 추정 성능이 저하될 수 있다. 이에 본 논문에서는 [2]의 기법을 다중 단말 환경으로 확장하고, NLoS 및 의도적 간섭 환경에서 발생하는 허위 관측점을 완화하기 위해 밀도 기반 공간 군집화(density-based spatial clustering of applications with noise: DBSCAN) 알고리즘을 활용한 다중 단말 OFDM-ISAC 기법을 제안한다.

II. 제안하는 의도적 간섭 환경 OFDM-ISAC 시스템 모델

본 논문에서는 가시선 경로가 확보되지 않은 국부 산란(local scattering) 채널 환경에 J 개의 원소를 갖는 균일 선형 배열안테나(uniform linear array antenna: ULA)가 탑재된 기지국과 N 개의 단말로 구성된 상향링크 ISAC 시스템을 고려한다. 또한, 셀 내에는 단말보다 높은 전력으로 동일한 시퀀스 구조의 신호를 전송하는 의도적 간섭원이 존재한다고 가정한다. 모든 단말은 [2]와 같이 전송하고자 하는 데이터를 일정한 이격을 통해 생성된 직교 시퀀스 집합 인덱스에 매핑하여 기지국으로 해당 시퀀스를 전송한다. 이때, 시간 영역에서 기지국이 수신하는 신호 $\mathbf{y}(t) (\in \mathbb{C}^P)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=0}^{L_n-1} \sqrt{P_n d_{n,l}^\alpha} \mathbf{h}_{n,l} x_n(t - \tau_{n,l}) + \sum_{l'=0}^{L_I-1} \sqrt{P_I d_{I,l'}^\alpha} \mathbf{h}_{I,l'} x_I(t - \tau_{I,l'}) + \mathbf{z}(t),$$

여기서 P , L , d , α , x , τ 는 각각 송신 전력, 다중 경로의 수, 거리, 경로 감쇄 지수, 송신 신호, 전송 지연을 나타내며, $\mathbf{h} (\in \mathbb{C}^P)$ 는 무선 채널 벡터를 의미하고, $\mathbf{z} (\in \mathbb{C}^P)$ 는 부가 열잡음을 나타낸다. 각 단말에는 서로 배타적인 시퀀스 집합이 할당되며, 기지국은 집합별 상관(correlation) 처리를 통해 단말 간 시퀀스 충돌 없이 각 단말의 통신 비트 복원과 위치 추정을 동시에 수행한다 [2].

각 다중경로 성분은 단말 주변 산란 클러스터로부터 발생하므로, 기지국은 상관 처리 결과로부터 각 단말에 대한 거리, 도래각(angle of arrival: AoA), 전력 정보를 추출한다. 이후 추출된 거리-AoA-전력 데이터에 DBSCAN 알고리즘을 적용하여 단말별 유효 군집을 형성하고, 해당 군집 내에서 가장 작은 거리 추정값과 평균 AoA를 각각 단말-기지국 간 거리와

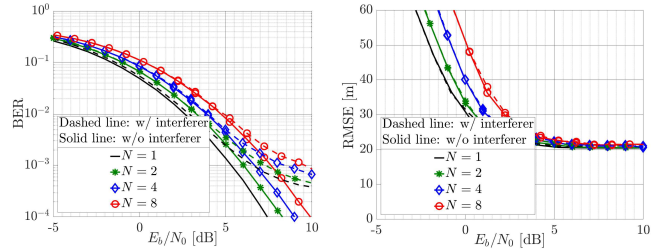


그림 1. 제안하는 OFDM-ISAC 시스템의 통신 및 측위 성능

단말 방향으로 추정한다. 이때 간섭원으로 인한 허위 관측점은 단말의 유효 관측점과 공간적으로 분리되므로, 군집화 과정에서 배제될 수 있다.

III. 모의실험 결과 및 결론

본 논문에서는 839 길이의 Zadoff-Chu 시퀀스를 사용하며 $J=16$, $N=1, 2, 4, 8$ 인 환경을 가정한다. 그림 1은 제안하는 OFDM-ISAC 시스템의 통신 및 위치 추정 성능을 각각 수신 비트 당 에너지(E_b/N_0) 대비 비트 오류율(bit-error rate: BER)과 위치 추정 제곱근 평균 제곱 오차(root mean squared error: RMSE)로 도시한 결과이다. 본 논문에서는 1번 단말과 기지국 간 거리 및 방향을 각각 30m와 45°로 고정하고, 나머지 단말의 거리와 방향은 각각 $U(20, 30)$ m 및 $U(-90^\circ, 90^\circ)$ 범위에서 랜덤하게 설정하였다. 간섭원은 매 전송 구간마다 전체 가용 루트 인덱스 집합에서 독립적으로 임의의 루트 인덱스를 선택하여 송신하며, 간섭원의 송신 전력은 단말보다 1.5배 더 크다고 가정하였다. 이외의 모든 모의실험 환경은 [2]와 동일하다. 낮은 E_b/N_0 영역에서는 잡음 영향이 지배적이므로 간섭 유무에 따른 BER 차이가 거의 나타나지 않는다. 반면, 높은 E_b/N_0 영역에서는 간섭원과 단말 간 루트 인덱스 충돌로 인해 낮은 BER 하한이 발생하며, 단말 수가 증가할수록 충돌 확률 증가로 하한이 소폭 상승한다. 또한, DBSCAN 기반 군집화를 통해 간섭원에 의한 허위 관측점을 배제함으로써, 간섭 환경에서도 간섭 부재 시와 유사한 위치 추정 RMSE를 달성하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. RS-2025-02303435, No. RS-2026-25489627)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] J. Wu *et al.*, "Low-complexity minimum BER precoder design for ISAC systems: A delay-doppler perspective," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 2, pp. 1526-1540, Feb. 2025.
- [2] 이하은, 이영석, 이인기, 정방철, "PS-LTE 네트워크를 위한 OFDM 기반 통합 탐지 및 통신 시스템," *한국통신학회 논문지*, vol. 50, no. 6, pp. 937-940, Jun. 2025.