

다중 경로 채널 환경에서 군집화 알고리즘을 활용한 OFDM 기반 통합 센싱 및 통신 시스템

이하은, 이영석, 정방철

충남대학교

haeunlee@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

OFDM-based Integrated Sensing and Communication System Using Clustering Algorithm in Multipath Channel Environments

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

Chungnam National University

요약

본 논문에서는 다중 경로가 존재하는 무선 채널 환경에서 동일한 무선 자원 및 신호 파형을 이용하여 기지국이 단말의 위치 정보와 통신 데이터를 동시에 추정할 수 있는 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 통합 센싱 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템을 제안한다. 구체적으로, 제안하는 기술은 [5]와 같이 직교 시퀀스를 활용하여 시퀀스 인덱스 변조를 통해 통신 성능을 지원함과 동시에 시퀀스의 자기 상관 특성과 배열안테나 기반 방향탐지를 활용하여 단말의 위치를 추정한다. 이때, 본 논문에서는 가시선(line-of-sight: LoS) 성분이 존재하지 않는 국부 산란 채널 환경에서도 단말의 위치를 추정할 수 있도록 군집화(clustering) 알고리즘을 도입한 실제적인 OFDM-ISAC 시스템을 제안한다.

I. 서론

차세대 이동통신 시스템의 핵심 기술로써 동일한 자원을 사용해 단말의 위치 정보와 통신 데이터를 동시에 추정할 수 있는 통합 센싱 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템이 최근 주목받고 있다 [1]. 이와 관련하여, ISAC 시스템은 주로 동일한 주파수 대역과 하드웨어에서 통신 신호를 활용하여 목표물 탐지, 거리 및 각도 추정 등의 레이다 기능을 수행하거나 레이더 신호에 통신 데이터 변조를 적용하는 등의 방식으로 연구되고 있다 [2]. 그러나, 이러한 ISAC 연구는 이중 서비스 간 성능 트레이드-오프(trade-off) 등의 문제로 인해 각 서비스별 시간 및 주파수를 분리하거나 추가적인 수신 하드웨어를 도입해 전통적인 통신 시스템과의 호환성 문제에 직면할 수 있다.

한편, 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기법은 높은 데이터 전송률을 지원하며 다중 경로 페이딩에 강인해 차세대 통신 시스템에서도 핵심 기술이 될 것으로 기대되고 있다 [3]. 이로 인해, OFDM 신호 웨이브폼에 기반한 ISAC 시스템 연구도 학계 및 산업계에서 크게 주목받고 있다 [4, 5]. 구체적으로, [4]에서는 송수신기 간 가시선(line-of-sight: LoS) 경로가 확보되지 않고, 대부분의 다중 경로 성분이 송신기 근처 산란체에 의해 지배된다고 가정한 국부 산란(local scattering) 채널 환경에서 단말이 전송한 직교 시퀀스를 통해 무선 채널과 도래각을 추정할 수 있는 OFDM-ISAC 시스템을 제안하였다. 그러나, 기존 연구에서는 직교 시퀀스를 센싱 서비스를 위해서만 사용하였으며, 이는 전통적인 OFDM 통신 시스템에 센싱 기능을 추가로 도입한 것과 같다. [5]에서는 단말이 전송한 단일 신호 웨이브폼을 통해 센싱과 통신을 동시에 수행할 수 있는 직교 시퀀스 기반 OFDM-ISAC 시스템을 제안하였다. 그러나, [5]에서는 LoS 경로가 항상 확보되었다고 가정하였으며 실제 통신 환경에서 해당 가정은 유효하지 않을 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 [5]에서 제안한 직교 시퀀스 기반 OFDM-ISAC 시스템을 LoS 경로 성분이 존재하지 않는 다중 경로 채널 환경에서도 동작하도록 확장한다. 구체적으로, 제안하는 기법은 통신과 측위 기능을 [5]와 같이 시퀀스 인덱스 변조와 자기 상관 특성을 이용해 수행될 수 있으나, 본 논문에서는 [5]와 달리 LoS 경로 성분이 항상 존재하지 않고, 실제적인 무선 채널 환경을 고려하기 위해 국부 산란 채널 환경을 고려한다. 이로 인해, 본 논문에서는 단말의 거리와 방향을 보다 정밀하게 추정하기 위해 군집화(clustering) 알고리즘을 추가로 도입해 기존 OFDM-ISAC 시스템을 확장하고자 한다.

II. 국부 산란 채널 모델을 가정한 OFDM-ISAC 시스템 모델

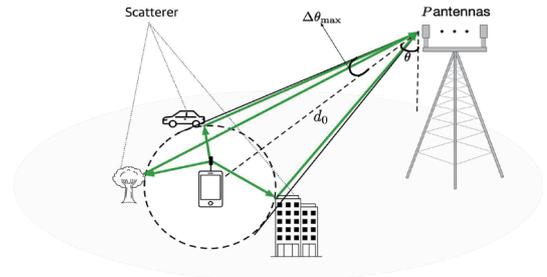


그림 1. 국부 산란 채널 모델을 가정한 OFDM-ISAC 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 P 개의 원소를 갖는 균일 선형 배열안테나(uniform linear array antenna: ULA)가 탑재된 기지국과 단일 안테나를 갖는 단말로 구성된 상향링크 OFDM-ISAC 시스템을 고려한다. 이때, 기지국은 $x-y$ 평면상 $(0,0)$ 에 위치하고 있고, 단말은 $(x,y) = (d_0 \cos\theta, d_0 \sin\theta)$ 좌표에 고정되어 있다고 가정하였다. 여기서 d_0 는 기지국과 단말 간 직선 거리를 나타내고 $\theta (\in [-\pi/2, \pi/2])$ 는 기지국 기준 단말 위치에 대한 방향을 나타낸다. 본 논문에서는 [4]와 같이 국부 산란 채널 모델을 고려함으로써 기지국과 단말 간 LoS 경로 성분이 존재하지 않고, 기지국은 L 개의 비가시선(non-LoS: NLoS) 경로로 인한 다중 경로 신호를 수신한다고 가정하였다. 또한, 본 논문에서는 기지국과 단말 사이에 시간 동기화가 완벽한 상황을 가정하였다 [5].

본 논문에서는 [5]와 같이 단말이 인덱스 변조를 도입한 직교 시퀀스를 기지국으로 전송하고, 기지국은 수신한 직교 시퀀스를 이용하여 d_0 와 θ 를 추정함과 동시에 통신 데이터를 검파할 수 있는 OFDM-ISAC 프로토콜을 가정한다. 구체적으로, N_s 길이의 직교 시퀀스인 \mathbf{s}_0 를 고려하면 $\lfloor \log_2 N_s \rfloor$ 비트가 각 시퀀스 인덱스에 매핑될 수 있으나, 전파 지연 및 지연 확산을 고려하기 위하여 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.

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

설명된 용이성을 위해, 본 논문에서는 단말이 기지국으로 $i (\in \{1, \dots, M\})$ 째 후보 시퀀스인 $\mathbf{s}_{(i-1)N_{CS}}$ 를 송신하는 상황을 고려한

다. 이후, [5]와 같은 OFDM 절차를 통해 기지국의 $p(\in\{1, \dots, P\})$ 짝 안테나에서 $n(\in\{0, \dots, N_s - 1\})$ 짝 시간 수신 신호는 다음과 같이 근사될 수 있다.

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

여기서, N_{FFT} 와 τ_p 는 각각 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform: FFT)의 크기와 단말로부터 기지국의 p 짝 안테나까지의 전파 지연을 의미한다. 또한, $\tilde{h}_p(n)$ 는 단말과 기지국의 p 짝 안테나 간 $l(\in\{0, \dots, L\})$ 짝 다중 경로에 해당하는 무선 채널인 $\sqrt{d_l}^\alpha h_p(l)$ 를 N_{FFT} 크기의 FFT를 수행한 후 N_s 크기의 역 이산 푸리에 변환(inverse discrete FT: IDFT)를 수행한 n 짝 시간 채널 성분을 의미한다. 여기서, d_l 과 α 는 각각 l 짝 전파 경로 거리와 경로 감쇄를 나타낸다. 본 논문에서는 국부 산란 채널 모델을 따르는 다중 경로를 고려하기 때문에, ULA에 수신될 때 l 짝 다중 경로 신호의 도래각은 $\theta + \Delta\theta_l$ 과 같으며, $\Delta\theta_l(\in[-\Delta\theta_{\max}, \Delta\theta_{\max}])$ 은 l 짝 다중 경로 구성 요소의 각도 편차를 나타낸다 [4]. 따라서, ULA를 가정할 때, 단말과 기지국의 p 짝 안테나 간 l 짝 무선 채널은

$h_p(l) = \beta_l e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(p-1)r\cos(\theta + \Delta\theta_l)}$ 으로 나타낼 수 있고, 이때 λ 는 파장, r 은 안테나 이격거리, β_l 은 복소 채널 이득을 나타낸다. 마지막으로, $w_p(n)$ 은 시간 영역 부가 잡음을 의미한다.

본 논문에서는 단말이 전송한 비트를 검출하고 단말의 위치를 추정하기 위해 기지국의 p 짝 안테나의 수신 신호와 직교 시퀀스 \mathbf{s}_0 사이의 상관값을 $x(\in\{0, \dots, N_s - 1\})$ 에 대해 다음과 같이 계산한다.

$$R_p(x) = \sum_{n=0}^{N_s-1} y_p(n) s_0^*(x+n).$$

상관값이 최대가 되는 인덱스를 κ_p 라고 할 때, 송신 후보 시퀀스 간 N_{CS} 의 순환 이동을 고려하였으므로 전송 시퀀스 인덱스는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{i}_p = \left\lfloor \frac{\kappa_p}{N_{CS}} \right\rfloor.$$

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 있으며, 기지국의 p 짝 안테나와 단말 간 거리는 다음과 같이 추정할 수 있다.

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

여기서, c 와 T_s 는 각각 빛의 속도와 샘플링 시간을 의미한다. 이후, 상관기반의 방향탐지 기법을 활용해 κ_p 에 해당하는 경로의 도착각을 $\hat{\theta}_p$ 으로 추정할 수 있다.

그러나, 본 논문에서 가정한 채널 모델은 LoS 경로가 확보되지 않았기 때문에 추정된 \hat{d}_{κ_p} 과 $\hat{\theta}_p$ 는 각각 실제 거리와 방향과 다소 오차가 있을 수 있다. 따라서, 본 논문에서는, $\hat{i}_c \in \{\hat{i}_p, \dots, \hat{i}_p + N_{CS} - 1\}$ 짝 인덱스를 활용해 거리와 방향을 모두 추정된 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, N_{CS} 개의 추정 거리 및 방향 데이터 중 반경 ϵ 내에 ζ 개의 데이터가 있을 때 하나의 군집으로 분류한다. 이후, 군집으로 분류된 추정 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 1. 모의실험 환경.

Parameter	Value	Parameter	Value
단말과 기지국 간 직선거리(d_0)	70 m	단말의 도래각(θ)	45 °
FFT 크기(N_{FFT})	2048	최대 각도 편차($\Delta\theta_{\max}$)	10 °
CP 크기(N_{CP})	256	중심 주파수(f_c)	1.8 GHz
기지국 안테나 수 (P)	16	다중 경로 수 (L)	10
표준 정규화 전력 임계치 (η)	1	경로 감쇄 지수(α)	2

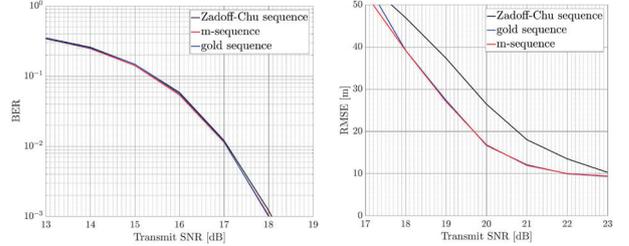


그림 2. 제안하는 OFDM-ISAC 시스템의 통신 및 측위 성능

그림 2는 제안하는 군집화 알고리즘 기반 OFDM-ISAC 시스템의 송신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR) 대비 통신 및 탐지 성능을 각각 비트당 오류율(bit-error rate: BER)과 단말 위치 추정치에 대한 제곱근 평균 제곱 오차(root mean squared error: RMSE)의 관점에서 도시한 결과이다. 본 논문에서는 직교 시퀀스로써 Zadoff-Chu (ZC) 시퀀스와 m-시퀀스 그리고 골드 시퀀스를 고려하였으며, 6비트 전송을 위해 ZC 시퀀스에 대해선 $N_s = 839$, $N_{CS} = 13$ 로 설정하고, m-시퀀스와 골드 시퀀스는 $N_s = 1023$, $N_{CS} = 15$ 로 설정하였다. 또한, 시퀀스 인덱스와 비트열 간 256 위상 편이 변조(phase shift keying: PSK) 방식의 그레이 매핑을 도입하였다. DBSCAN 군집화 알고리즘을 위한 파라미터로써 ϵ 과 ζ 는 각각 0.2와 2로 설정하였고, 부반송파 간격은 30kHz로 설정하였다. 이외의 모의실험 환경은 표 1과 같다. 그림 2를 통해, LoS 경로 성분이 존재하지 않더라도, 시퀀스 인덱스 변조를 통해 우수한 BER 성능을 가질 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 다중 경로 채널 환경을 가정하더라도, 송신 SNR이 23dB일 때 위치 RMSE가 대략 9미터로 준수한 측위 성능을 가질 수 있음을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터 사업의 지원(No. IITP-2024-RS-2024-00436406) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2022R111A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [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] H. Hua, J. Xu, and T. X. Han, "Optimal transmit beamforming for integrated sensing and communication," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8, pp. 10588-10603, Aug. 2023.
- [3] M. S. J. Solajja, S. E. Zegrar, 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.
- [4] K. Xu, X. Xia, C. Li, C. Wei, W. Xie, and Y. Shi, "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.
- [5] 이하은, 이영석, 이인기, 정방철, "5G NR 프레임블을 활용한 OFDM 기반 통합 탐지 및 통신 시스템," *한국통신학회 추계종합학술발표회*, pp. 474-475, Jun. 2024.