PS-LTE 네트워크를 위한 OFDM 기반 통합 탐지 및 통신 시스템

이 하 은', 이 영 석^{*}, 이 인 기[°], 정 방 철^{°°}

OFDM-Based Integrated Sensing and Communication Systems for **PS-LTE** Networks

Ha-Eun Lee^{*}, Young-Seok Lee^{*}, InKi Lee, Bang Chul Jung

요 약

본 논문에서는 공공 재난안전망(public-safety long term evolution networks: PS-LTE)을 위한 직교 주파 수 분할 다중화 기반 통합 탐지 및 통신(orthogonal frequency division multiplexing-based integrated sensing and communication: OFDM-ISAC) 시스템을 제안한다. 구체적으로, 제안하는 기법은 PS-LTE망 내 구조 대원과 PS-LTE 이동 기지국 간 통신 과정에서 동일한 무선 자원과 신호 웨이브폼을 이용해 구조 대 원의 송신 데이터와 위치 정보를 동시에 추정한다. 모의실험을 통해 제안하는 OFDM-ISAC 시스템의 통 신 및 측위 성능을 각각 비트 오류율(bit-error rate: BER) 및 제곱근 평균 제곱 오차(root mean squared error: RMSE) 관점에서 평가하고 분석한다.

Key Words : Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), Integrated sensing and communication (ISAC), Public-safety long term evolution (PS-LTE)

ABSTRACT

In this paper, we propose an orthogonal frequency division multiplexing-based integrated sensing and communication (OFDM-ISAC) systems for public-safety long term evolution networks (PS-LTE). Specifically, our proposed technique can simultaneously estimate the first responder's transmission data and location by using the same wireless resources and signal waveform. Through extensive simulations, we verify the communication and localization performance of the proposed OFDM-ISAC systems in terms of bit-error rate (BER) and root mean squared error (RMSE), respectively.

I.서 론

현재 국내에서는 재난 또는 재해 발생 시 효율적인 구조 활동과 구조 대원의 안전을 위해 공공 재난안전망 (public-safety long term evolution: PS-LTE)이 운용되 고 있다. 건물 붕괴나 화재 등의 재난 환경에서는 구조 대원의 안전을 위해 실시간 위치 정보가 필요할 수 있다 ^[1]. 그러나, 현재 상용되고 있는 PS-LTE 망은 전용 단말 기와 이동 기지국 간 긴급 통신 서비스만을 지원하고 있어 구조 대원의 위치나 주변 지형지물 탐지 등의 센싱 기능은 지원하지 않고 있다.

한편, 차세대 이동통신 시스템에서는 동일한 주파수 및 하드웨어를 통해 통신과 탐지의 기능을 동시에 수행 하는 통합 탐지 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템이 각광받고 있다^[2]. 또한, 다 중 경로 페이딩에 강인하며 높은 데이터 전송률에 적합 한 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 통신 시스템이 차세대 이동통신에서도 활용될 전망이며 이와 관련한 OFDM-ISAC 연구가 활발히 진행되고 있다^[3,4]. 그러 나, 대부분의 OFDM-ISAC 시스템은 높은 탐지 및 통 신 성능을 위해 고주파수 대역을 가정하여, PS-LTE망

논문번호: 202412-320-B-LU, Received December 14, 2024; Revised January 4, 2025; Accepted January 4, 2025

[※] 본 연구는 행정안전부 지능형 상황관리 기술개발 사업의 지원(계약번호: 2022-MOIS37-005) 및 과학기술정보통신부의 지원(과제번 호: RS-2024-00396992)을 받아 수행된 연구임.

[•] First Author: (0009-0005-2402-2591) Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University, haeunlee@ajou.ac.kr, 학생(석사), 학생회원

Corresponding Author : Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), popularity1@etri.re.kr, 책임연구원, 정회원

^{°°} Corresponding Author: (0000-0002-4485-9592) Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, bcjung@ajou.ac.kr, 정교수, 종신회원

^{* (0000-0002-8552-1731)} Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University, youngseoklee@ajou.ac.kr, 학생 (박사)

대역(700MHz대)을 고려할 경우 우수한 통신 및 탐지 성능을 보장하기 어렵다.

따라서, 본 논문에서는 기존 OFDM 시스템 호환에 용이하면서 구조 대원의 통신 신호와 위치를 동시에 추 정할 수 있는 PS-LTE 망용 OFDM-ISAC 시스템을 제 안한다. 구체적으로, 본 논문에서는 단일 신호 웨이브폼 을 이용해 통신과 측위 기능을 동시에 수행할 수 있도록 직교 시퀀스를 사용한 OFDM-ISAC 시스템을 설계하 며, 이때 하드웨어 효율성과 탐지 성능을 유지하면서도 통신의 기능을 수행하기에 적합하도록 인덱스 변조 기 법을 도입한다. 구조 대원의 위치 추정은 수신한 시퀀스 의 자기상관 특성을 이용하여 다중안테나 기반 방향탐 지와 거리 분해능 향상을 위한 수신단 오버샘플링을 통 해 수행된다. 최종적으로 모의실험을 통해 본 논문에서 제안하는 PS-LTE 망용 OFDM-ISAC 시스템의 통신 및 측위 성능을 각각 평가하고 분석한다.

Ⅱ. PS-LTE망용 OFDM-ISAC 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 a-b 평면상 원점 위 J개의 원소를 갖는 군일 선형 배열안테나(uniform linear array antenna: ULA)를 탑재한 이동 기지국과 $(a,b) = (d_0 \cos\theta, d_0 \sin\theta)$ 좌표 위 단일 안테나의 PS-LTE 전용 단말기를 지닌 구조 대원이 존재하는 환 경을 고려한다. 여기서 d_0 와 θ 는 각각 기지국으로부터 단말기 간 거리와 단말기가 위치하는 x 축 기준 방위각 정보를 나타낸다. 이동 기지국과 단말기 간 가시선 (line-of-sight: LoS) 경로가 확보되고^[5], L-1개의 다 중 경로 신호를 동시에 수신한다고 가정한다.

본 논문에서는 단말기와 기지국 간 통신을 위해 직교 하는 시퀀스에 대한 인덱스 변조를 고려한다. 구체적으 로, 길이 N_s 의 시퀀스는 전파 지연과 지연 확산을 고려 해 N_{CS} 이격을 두어 $M = \lfloor N_s / N_{CS} \rfloor$ 개의 송신 후보 시퀀스를 생성한다. 이후, 단말기는 *M*개의 시퀀스 중



l째 다중 경로에 대한 시간 영역 채널을 나타내며, $h_j(0) = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(j-1)r\cos\theta}$ 은 LoS 경로에 대한 무선 채널 을 나타낸다. 또한, \otimes 와 r은 각각 순환 컨볼루션 (convolution) 연산과 안테나 이격 거리를, $\tau_{l,j}$, a, $z_j(t)$ 는 각각 l째 다중 경로에 대한 단말기와 기지국의 j째 안테나 간 전파 지연 시간, 경로 감쇄 지수, 시간 영역 부가 잡음을 나타낸다. 이후, FFT를 수행함으로써 $w(\in\{0,...,N_{FFT}-1\})$ 째 부반송파에 해당하는 주파 수 영역의 수신 신호는 다음과 같다.

전송하고자 하는 $q(= |\log_2 M|)$ 비트에 대응되는 인

덱스의 시퀀스를 기지국으로 전송한다. 본 논문에서는

설명의 용이성을 위해 구조 대원이 $i \in \{0, \dots, M-1\}$

째 후보 시퀀스인 **S**_{iNre}를 기지국으로 전송한

Ⅲ. 제안하는 PS-LTE망용 OFDM-ISAC 기법

제안하는 OFDM-ISAC 시스템은 그림 2의 절차를

통해 수행될 수 있다. 이때, 시간 영역에서 정의되는

시퀀스 신호를 기존 OFDM 기반 통신 시스템을 통해

송수신하기 위해 추가적인 역 이산 푸리에 변환(inverse

discrete Fourier transform: IDFT)과 DFT 연산이 송수

OFDM-ISAC 시스템에 대해 서술한다.

$$X_{H,j}(w) = \begin{cases} H_j(w)X(w)e^{-j\frac{2\pi w}{N_{FFT}}\tau_j} + Z_j(w) &, 0 \le w < N_s - 1\\ \text{FFT}(h[l] \otimes x[t-\tau_j]) &, w \ge N_s \end{cases},$$
(2)





그림 1. 재난 환경 내 구조 대원과 이동 기지국에 대한 OFDM-ISAC 시스템 모델.

Fig. 1. OFDM-ISAC system model for first responder and mobile base station in emergency.

그림 2. 제안하는 OFDM-ISAC 시스템 절차. Fig. 2. A system process for the proposed

Fig. 2. A system process for the proposed OFDM-ISAC technique.

여기서, *H_i*는 무선 채널의 주파수 응답을 나타내며 *X* 는 시간 영역 송신 신호의 *N_{FFT} 크*기의 FFT 연산 결과 를 나타낸다.

본 논문에서는 수신 시퀀스 추정 과정에서 거리 추정 분해능을 향상시키기 위해 시퀀스 길이 N_s 보다 큰 N_{over} 크기의 역 이산 푸리에 변환(inverse discrete FT: IDFT)을 도입해 신호처리 관점의 오버샘플링을 수행한 다. 따라서, $n_{ov} (\in \{0, \dots, N_{over} - 1\})$ 째 시간의 수신 시 퀸스 신호는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$y_{j}(n_{ov}) \approx \sqrt{d^{-a}} \left(\tilde{h}_{j}(n_{ov}) \otimes \tilde{x} \left[n_{ov} - \left\lfloor \frac{N_{over}}{N_{FFT}} \tau_{j} \right\rfloor \right] \right) + w_{ov,j}(n_{ov})$$
(3)

여기서 $\tilde{h_j}$ 와 \tilde{x} 는 각 H_j 와 $X = N_{over}$ 크기의 IDFT를 수행한 신호를 나타낸다. 이후, 수신기는 원 시퀀스 \mathbf{s}_0 를 DFT한 후 N_{over} 크기의 IDFT를 수행한 시간 영역 시퀀스 집합 $\tilde{\mathbf{s}}_0 = \kappa$ 만큼 순환 이동하면서 (3)과 상관 하게 되면 다음과 같은 상관값 $R_j(\kappa)$ 을 얻을 수 있다.

$$R_{j}(\kappa) = \sum_{n_{ov}=0}^{N_{over}-1} y_{j}(n_{ov}) \tilde{s}_{0}^{*}(\kappa + n_{ov}).$$
(4)

이때 R_j 가 최대가 되는 인덱스 κ_{\max} 에 해당되는 신호 는 LoS 경로를 통해 수신한 신호로 탐지될 수 있으며, κ_{\max} 로부터 음의 방향으로 가장 가까운 후보 시퀀스 \hat{i}_j 를 단말기가 전송한 시퀸스로 검파한다. 따라서, \hat{i}_j 와 κ_{\max} 간의 차를 통해 다음과 같이 단말기와 이동 기 지국 간 거리를 추정할 수 있다.

$$\hat{d}_{j} = \left(\kappa_{\max} - \hat{i}_{j}\right) \times \frac{N_{FFT}}{N_{over}} \times T_{s} \times c.$$
(5)

여기서, T_S와 c는 각각 샘플 시간과 빛의 속도를 의미 한다. 이후, 단말기와 기지국 간 거리는 모든 안테나에 서 추정한 거리의 평균으로 추정한다. 마지막으로, 최대 상관값에 해당되는 역확산 수신 신호에 대해 방향탐지 알고리즘을 수행해^[5] LoS 신호원의 도래각을 추정함으 로써 단말기 위치를 결정한다.

Ⅳ. 모의실험 결과

본 논문에서는 제안하는 기법의 시퀀스 종류별 성능

평가를 위해, 직교 시퀀스로 Zadoff-Chu (ZC) 시퀀스, m-시퀀스 및 골드 시퀀스를 활용한 OFDM-ISAC 시스 템의 성능을 각각 검증한다. 구체적으로, 6비트 전송에 대한 인텍스 변조를 가정하여, ZC 시퀀스는 $N_s = 839$ 와 $N_{CS} = 13$ 으로, m-시퀸스와 골드 시퀀스는 $N_s = 1023$ 과 $N_{CS} = 15$ 로 설정하였다. 모의실험 파라 미터는 표 1과 같으며, 시퀀스의 인텍스와 비트 간 64 위상 천이 변조 기법의 Gray 매핑 규칙을 적용하였다. 그림 3과 4는 PS-LTE 망용 OFDM-ISAC 시스템의 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR) 대비 측위 성능과 통신 성능을 각각 제곱근 평균 제곱 오차 (root mean squared error: RMSE)와 비트 오류율 (bit-error rate: BER) 관점에서 도시한 결과이다. 이때,

자기 상관 특성이 가장 우수한 ZC 시퀀스를 활용한 시 스템의 위치 추정 성능이 가장 우수하며, 수신기에서 ZC 시퀀스 길이 대비 2배 오버샘플링을 진행해 오버샘 플링을 진행하지 않은 경우보다 수신 SNR 16dB에서 약 5.8m의 위치 추정 RMSE 성능 향상을 얻었다. 한편,

표 1. 모의실험 환경. Table 1. Simulation environment.

Parameters	Values	Parameters	Values
$\mathbf{FFT} \ \exists \mathcal{I} (N_{FFT})$	2048	기지국 안테나 수 (<i>J</i>)	16
CP 크기(N _{CP})	256	다중 경로 수 (<i>L</i>)	10
부반송파 간격	15 kHz	경로 감쇄 지수(α)	2
중심 주파수 (f_c)	700 MHz	샘플 시간(T_s)	32.6ns
구조대원과 기지국 간 거리 (d)	200m	단말의 도래각(θ)	$45~^\circ$



그림 3. OFDM-ISAC 시스템의 위치 추정 성능. Fig. 3. RMSE performance of OFDM-ISAC systems.



그림 4. OFDM-ISAC 시스템의 비트 오류율 성능 Fig. 4. BER performance of OFDM-ISAC systems.

N_{CS}의 값이 클수록 송신 시퀀스 탐지 확률이 증가하여 골드 시퀀스와 m-시퀸스의 BER 성능이 ZC 시퀀스의 BER 성능보다 우수하다. 한편, 동일한 N_{CS} 값을 갖는 m-시퀸스와 골드 시퀸스의 BER 성능은 시퀸스의 자기 상관 특성에도 영향을 받아 m-시퀀스의 BER 성능이 더 우수한 결과를 보였다.

V.결론

본 논문에서는 PS-LTE 망에서 구조 대원이 송신한 직교 시퀀스의 자기 상관 특성을 활용해 위치 추정과 통신을 동시에 수행하는 OFDM-ISAC 시스템을 제안 하였다. 모의실험을 통해 수신단에서 신호처리 관점의 오버샘플링과 다중안테나 기반 방향탐지 알고리즘을 수행하여 구조 대원의 위치를 정밀하게 탐지할 수 있음 을 확인하였으며, 인택스 변조를 고려한 시퀀스 송수신 이 효과적으로 동작함을 검증하였다.

References

 F. De Cillis, et al., "Hybrid indoor positioning system for first responders," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Syst.*, vol. 50, no. 2, pp. 468-479, Feb. 2020. (https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2772821)

 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.

(https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3235618)

- [3] C. Han, Y. Wu, Z. Chen, Y. Chen, and G. Wang, "THz ISAC: A physical layer perspective of terahertz integrated sensing and communication," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 2, pp. 102-108, Feb. 2024. (https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200404)
- Z. Gao, et al., "Integrated sensing and communication with mmWave massive MIMO: A compressed sampling perspective," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, pp. 1745-1762, Mar. 2023. (https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3206614)
- Y.-S. Lee, I. Lee, and B. C. Jung, "Performance analysis of signal source direction finding algorithms for PS-LTE networks," *J. KICS*, vol. 48, no. 5, pp. 539-542, May 2023.

(https://doi.org/10.7840/kics.2023.48.5.539)