

6 세대 이동통신을 위한 통신-감지 통합 기술의 최신 동향

이승찬, 이동현, 오준석, 최성진, 김주영, Quang Tuan Do, 조성래
중앙대학교 컴퓨터공학과

{sclee, dhlee, jsch, sjchoi, jykim, dqtuang}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

Recent Trends of Integrated Sensing and Communication Technologies for 6G Networks

Seungchan Lee, Donghyun Lee, Junsuk Oh, Seongjin Choi, Juyoung Kim,
Quang Tuan Do, and Sungrae Cho

School of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University

요 약

통신-감지 통합(ISAC, Integrated Sensing and Communication)은 차세대 6G 무선 네트워크의 핵심 기술로 부상하고 있다. ISAC 은 하나의 시스템에서 무선 통신 기능과 센싱(감지) 기능을 통합하여 스펙트럼과 하드웨어 자원을 효율적으로 활용하고 새로운 서비스를 제공하려는 개념이다. 본 논문에서는 ISAC 의 기본 개념과 필요성을 설명하고, 기술 구현 방식의 분류, 최신 연구 동향과 대표적인 기술 사례를 살펴본다. 또한 ISAC 분야의 핵심 이슈와 향후 과제를 논의한다.

I. 서 론

6 세대(6G) 이동통신은 단순한 초고속·저지연 연결을 넘어, 무선 인프라가 주변 환경을 인식하고 지능적으로 반응하는 네트워크로 진화하고 있다. 이러한 패러다임 전환의 중심에는 통신-감지 통합(ISAC, Integrated Sensing and Communication) 기술이 있다. ISAC 은 통신과 센싱이 동일한 하드웨어 및 주파수 자원을 공유하여 동시에 수행되는 기술로, 스펙트럼 효율과 시스템 비용 절감을 동시에 달성할 수 있다 [1-2]. 최근 IoT 및 산업용 무선 센서 네트워크(WSN, Wireless Sensor Network)에서도 에너지 효율과 자원 활용도를 높이기 위한 분산 통신 연구가 진행되고 있으며, 특히 비동기적 듀티사이클링 기반의 통신 구조가 효율적인 저전력 네트워크 설계 방향으로 주목받고 있다 [3].

ISAC 의 개념은 기존의 통신 시스템에 센싱 기능을 추가하는 통신 중심형, 레이더에 통신 기능을 더하는 레이더 중심형, 두 기능을 하나의 파형으로 통합하는 공동설계형으로 분류된다. 이 중 공동설계형이 가장 활발하게 연구되고 있으며, 통신률과 감지 정확도 간의 트레이드오프를 최적화하기 위한 듀얼 기능 레이더-통신(DFRC, Dual-Functional Radar Communication) 파형 설계, 공동 빔포밍, 적응형 자원 관리 기법이 핵심 기술로 주목받고 있다 [1-2, 4]. 또한 분산 학습과 강화학습 기법을 결합하여 센싱-통신 통합의 효율성을 높이려는 시도도 이루어지고 있으며, 다중 에이전트 기반 자원 제어를 통해 협력형 네트워크의 학습 효율을 향상시키는 연구가 보고되고 있다 [5]. 이러한 ISAC 은 자율주행 차량, 산업 자동화, 스마트시티, 확장현실(XR), 위성 및 비지상 통신 등 다양한 응용 분야에서 중요한 기반 기술로 인식되고 있다.

II. 최신 기술 동향

ISAC 기술의 발전은 크게 파형 설계, 빔포밍 최적화, 자원 관리, 지능형 표면 제어, 인공지능 융합 등의 흐름으로 나뉜다. 파형 설계 측면에서는 OFDM(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)과 OTFS(Orthogonal Time-Frequency Space) 기반의 공동 파형 설계가 활발히 연구되고 있다. 이는 하나의 송신 신호가 데이터 전송과 표적 탐지를 동시에 수행하도록 설계하는 것으로, 통신 신호의 정보 전송률과 센싱 해상도를 동시에 고려한 다목적 최적화(Multi-objective Optimization) 접근이 대표적이다 [1-2].

또한 대규모 MIMO와 고주파(mmWave/THz) 대역의 결합을 통해 ISAC 의 해상도와 감지 성능이 향상되고 있다. THz 대역은 광대역폭으로 초정밀 센싱을 가능하게 하지만, 전파 감쇠가 크기 때문에 정밀한 빔포밍 및 빔추적이 필요하다. 특히 근거리(near-field) 환경에서의 구면파 특성을 고려한 빔포커싱 기반 ISAC 연구가 활발히 진행 중이다 [6].

시스템 레벨에서는 시간·주파수·전력 자원을 통합적으로 고려하는 공동 자원 관리 기법이 제안되고 있다. 기존 SDMA, NOMA 방식에 더해 RSMA(Rate-Splitting Multiple Access)가 주목받으며, 다수의 사용자와 표적을 동시에 지원하기 위한 프리코딩-스케줄링 결합 기법이 제안되고 있다 [2, 6].

재구성 가능한 지능형 표면(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)은 통신 및 센싱 성능을 동시에 개선할 수 있는 새로운 수단으로 연구되고 있다. RIS 를 이용하면 전파 경로를 능동적으로 제어하여 비가시선(NLoS, Non-Line-Of-Sight) 환경에서도 신호 품질과 감지 정확도를 향상시킬 수 있다. 이를 바탕으로 다수의 기지국과 RIS 를 결합한 협력형 ISAC 네트워크 구조가 제안되고 있다.

최근에는 인공지능(AI)과 머신러닝(ML)을 접목한 지능형 ISAC이 새로운 연구 축으로 부상했다. 데이터 기반 학습을 통해 채널 상태와 반사 특성을 예측하고, 빔 선택 및 자원 재배분을 자율적으로 수행하는 기술이 발전하고 있다. 이러한 AI 기반 ISAC은 환경 적응성, 실시간 처리, 복잡도 절감 측면에서 유리하며, 2025년 이후에는 지상-비지상 통합 네트워크, 지능형 하드웨어 기반 ISAC 등으로 확장될 전망이다 [7].

III. 주요 과제와 향후 전망

ISAC의 상용화를 위해 해결해야 할 과제는 다음과 같다. 첫째, 통신률과 센싱 정확도 간의 기본적인 성능 경계 분석이 필요하다. 최근 Gaussian 채널 환경에서 통신-센싱 통합 한계가 이론적으로 규명되었으나, 실제 하드웨어 제약과 다사용자·다표적 상황을 포함한 일반화가 요구된다 [8]. 둘째, 실환경 검증을 위한 채널 및 클러터 모델의 표준화와 공개 데이터셋 구축이 필요하다. 산업 현장, 차량, 도심 등 다양한 시나리오별 측정 기반 모델이 ISAC 성능 검증의 핵심이다. 셋째, 시스템 레벨 운영 측면에서 동적 자원 재배분, 실시간성, 엣지 인퍼런스 등을 동시에 고려하는 경량 알고리즘이 요구된다. 마지막으로 보안 및 프라이버시 이슈가 중요하다. 센싱 과정에서 수집되는 위치·환경 정보는 잠재적으로 개인정보를 포함하므로, 물리적층 보안과 데이터 보호 설계가 병행되어야 한다.

향후 ISAC은 파형·빔포밍·자원 관리의 공동 설계, 근거리 초정밀 센싱, RIS 및 AI 융합 기술을 기반으로 상용 6G 통신망의 핵심 구성 요소로 발전할 것이다. 이를 통해 통신망은 초연결과 초인지 기능을 동시에 제공하는 지능형 인프라스트럭처로 진화하게 된다 [2, 6-7].

IV. 결론

본 논문에서는 통신-감지 통합(ISAC)의 개념과 최신 연구 동향을 간략히 정리하고, 주요 기술적 이슈와 향후 발전 방향을 살펴보았다. ISAC은 파형 설계, 빔포밍, 자원 관리, 인공지능 융합 등 여러 기술의 통합을 통해 스펙트럼 효율과 시스템 기능을 동시에 향상시키는 유망한 기술로 평가된다. 향후 6G 시대에는 ISAC이 자율주행, 산업 자동화, 확장현실, 스마트시티 등 다양한 분야에서 핵심적인 역할을 수행하며, 통신망을 “연결과 인식”이 결합된 지능형 플랫폼으로 변화시킬 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2022-00156353, 50% / IITP-2025-RS-2023-00258639, 50%)

참 고 문 헌

[1] J. Andrew Zhang, F. Liu, C. Masouros, R. W. Heath, Z. Feng, L. Zheng and A. Petropulu, "An Overview of Signal

Processing Techniques for Joint Communication and Radar Sensing," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 15, no. 6, pp. 1295-1315, Nov. 2021.

- [2] F. Liu, Y. Cui, C. Masouros, J. Xu, T. X. Han, Y. C. Eldar and S. Buzzi, "Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 6, pp. 1728-1767, June 2022.
- [3] J. Oh, D. Lee, D. S. Lakew and S. Cho, "DACODE: Distributed adaptive communication framework for energy efficient industrial IoT-based heterogeneous WSN," *ICT Express*, Vol 9, Issue 6, 2023.
- [4] D. Kwon, J. Jeon, S. Park, J. Kim and S. Cho, "Multiagent DDPG-Based Deep Learning for Smart Ocean Federated Learning IoT Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 10, pp. 9895-9903, Oct. 2020.
- [5] J. Andrew Zhang, Md. Lushanur Rahman, K. Wu, H. Huang, Y. Jay Guo, S. Chen and J. Yuan, "Enabling Joint Communication and Radar Sensing in Mobile Networks—A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 1, pp. 306-345, Firstquarter 2022.
- [6] S. Lu, F. Liu, Y. Li, K. Zhang, H. Huang, J. Zou, X. Li, Y. Dong, F. Dong, J. Zhu, Y. Xiong, W. Yuan, Y. Cui and L. Hanzo, "Integrated Sensing and Communications: Recent Advances and Ten Open Challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 11, pp. 19094-19120, 1 June1, 2024.
- [7] N. González-Prelcic, D. Tagliaferri, M. F. Keskin, H. Wymeersch and L. Song, "Six Integration Avenues for ISAC in 6G and Beyond," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 20, no. 1, pp. 18-39, March 2025.
- [8] Y. Xiong, F. Liu, Y. Cui, W. Yuan, T. X. Han and G. Caire, "On the Fundamental Tradeoff of Integrated Sensing and Communications Under Gaussian Channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 69, no. 9, pp. 5723-5751, Sept. 2023.