

이동형 안테나를 활용한 통합 센싱 및 통신 시스템 최신 연구 조사

성명기, 김재홍, 정진곤*

중앙대학교 전자전기공학과

{mg4768, kjhct9606, jgjoung}@cau.ac.kr

Contemporary Survey on Integrated Sensing and Communication Systems Using Movable Antennas

Myeonggi Sung, Jaehong Kim, Jingon Joung*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

요약

최근, 안테나 위치를 동적 조정할 수 있는 이동형 안테나 (MA: movable antenna) 기술을 통합 센싱 및 통신 (ISAC: integrated sensing and communication) 시스템에 적용하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. MA는 고정형 안테나보다 빔포밍 설계 자유도가 높고 간섭 제어가 용이하므로, ISAC 시스템에 적용하면 효과적으로 센싱 및 통신 성능을 향상할 수 있다. 본 논문에서는 ISAC 시스템에 MA를 활용하여 얻을 수 있는 기술적 이점을 네 가지로 정리하고, 이를 이론 및 실험적으로 입증하는 최신 연구 내용을 소개한다. 한편, MA 기반 ISAC 시스템이 갖는 기술적 한계와 이를 극복하기 위한 향후 연구 방향을 제시한다.

I. 서론

6G 이동 통신 시스템 후보 기술로 센싱과 통신 기능을 동시에 수행하는 통합 센싱 및 통신 (ISAC: integrated sensing and communication) 기술이 주목받고 있다 [1]. ISAC 기술은 센싱 및 통신을 위한 하드웨어와 무선 자원을 공유하므로, 자원 효율성과 시스템 통합성을 크게 향상할 수 있다. 그러나 고정형 안테나 (FPA: fixed-position antenna)를 활용하는 기존 ISAC 시스템에선 안테나 위치 조정이 불가하므로, 공간 자원 활용, 환경 변화에 적응적 대응, 통신-센싱 사이 성능 균형 조정 등에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 안테나 위치를 유동적으로 조정하는 이동형 안테나 (MA: movable antenna) 기술을 도입하여, 센싱 및 통신 성능을 효과적으로 개선하는 연구가 최근 이루어지고 있다. MA를 활용하여 안테나 위치를 동적으로 조정하면, 센싱 측면에서 각도 해상도, 통신 측면에선 공간 다중화 및 빔포밍 정밀도 높일 수 있다. 또한, 주파수 자원을 효율적으로 활용하며 센싱 및 통신 성능을 동시에 최적화할 수 있으며, 안테나를 재배치하여 채널 불확실성 및 레이다 단면적 (RCS: radar cross section) 변동성 같은 외부 환경 변화에도 유연하게 대응할 수 있다 [2].

이에 본 논문에서는 ISAC 성능 향상에 MA가 기여할 수 있는 기술적 이점 네 가지를 밝히고, 관련 연구 내용을 소개한다. 이에 더하여, 현시점에 연구 결과가 부재하거나 미흡하여 추가 연구가 필요한 향후 연구 방향을 제시한다. 한편, 유체 안테나 (FA: fluid antenna) 기술 또한 안테나 위치를 제어하여 ISAC 성능을 향상할 수 있으므로, FA 기반 ISAC 연구도 조사 범위에 포함한다.

II. ISAC 시스템에 MA 기술을 적용하여 얻는 기술적 이점

본 논문에서는 MA 위치 최적화를 통해 얻을 수 있는 ISAC 시스템 성능 향상 요소를 네 가지 측면으로 구분하고, 관련 최신 연구를 소개한다.

1. MA 공간 자유도를 활용한 고정밀 센싱 연구

MA는 공간 자유도를 효과적으로 활용하여, 제한된 하드웨어 자원으로

도 높은 센싱 성능을 달성할 수 있다. 구체적으로, MA는 안테나 위치를 동적으로 조정하여, 송·수신 배열 공간 응답을 제어할 수 있으므로, 다중 경로로 도달하는 신호 간 위상 차이를 세밀하게 조절하여 센싱 빔패턴 main lobe를 타깃 방향에 정교하게 정렬한다. 또한, MA 공간 자유도를 활용하면 각도 분해능과 신호 대 잡음 비 (SNR: signal-to-noise ratio)를 향상할 수 있으며, 제한된 안테나 수로 고성능 각도 추정 및 다중 타깃 탐지가 가능하다. [3]에서는 ISAC 송신단에 FA를 배치하여, 센싱 신호 위상 정렬 및 빔 조향 효과를 극대화하였다. 이를 통해, 센싱 SNR을 크게 향상하며, 동시에 사용자 통신 품질 요구를 만족하는 설계를 실현하였다. [4]에서는 ISAC 송신기와 센싱 수신기 모두에 MA를 도입함으로써, 다중 경로 신호의 위상을 제어하여 최적 수신 배열 공간 응답을 설계하였다. 특히, 재구성 가능한 지능형 반사 표면을 함께 활용하여, 반사 신호 경로에 대한 위상제어 자유도를 추가적으로 활용하였다. 이를 통해, 레이다 신호 대 잡음 및 간섭비를 극대화하고 복잡한 클러터 환경에서도 안정적인 센싱 성능을 확보하였다.

2. MA 빔 정밀 제어를 통한 통신 품질 향상 연구

MA는 안테나 위치를 동적으로 조정함으로써, 사용자 위치나 채널 상태에 따라 다중 경로 위상을 능동적으로 정렬하여 최적 빔을 형성한다. 이를 통해, 사용자 간 간섭은 효과적으로 억제하며 특정 사용자에 대한 신호 강도만 높일 수 있다. 특히, FPA 대비 높은 통신 품질을 제공한다. 이러한 특성은 ISAC 시스템 내에서 신뢰성 있는 통신 링크 확보에 대한 기술적 이점을 제공한다. [5]에서는 사용자 단말에 FA를 배치하고, 이를 전송률 분할 기반 다중접속 구조와 결합하였다. 특히, 사용자 위치에 따라 FA의 위치를 조정하여 사용자 간 간섭을 효과적으로 완화하고, 도청자에 대한 보안 성능이 향상됨을 시뮬레이션을 통해 입증하였다. [6]에서는 ISAC 송신기와 센싱 수신기에 MA를 배치하여, 안테나 위치 조정을 통한 채널 응답 최적화로 통신 SNR을 극대화하였다. 특히, 수신기 MA를 활용해 클러터 간섭을 억제하고 수신 빔을 정밀하게 조정함으로써, 센싱 성능을 유지

하면서도 통신 용량 향상을 달성하였다.

3. MA 위치 최적화를 통한 센싱 및 통신 통합 성능 향상 연구

MA는 통신과 센싱에서 요구되는 빔 응답 특성을 동시에 고려하여, 안테나 위치와 빔포밍을 동시에 최적화할 수 있다. 이를 통해, 동일한 신호를 활용하는 ISAC 시스템에서 스펙트럼 자원을 효율적으로 활용하여 통신 품질과 센싱 정확도 간의 트레이드 오프를 유연하게 조정할 수 있다. [7]에서는 ISAC 송신기에 MA를 도입해, 안테나 위치 및 빔포밍을 교대로 최적화하여, 통신 용량 및 센싱 상호 정보량을 동시에 향상하는 알고리즘을 제안하였다. 특히, 고정형 안테나 대비 제한된 수의 MA만으로도 통신률과 센싱 상호 정보량의 합산 성능 지표 기준으로 두 성능을 동시에 높일 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증하였으며, 스펙트럼 자원에 대한 효율적 활용이 가능함을 보였다. [8]에서는 ISAC 송신기와 센싱 수신기에 모두 MA를 배치하여, 통신 전송률과 센싱 상호 정보량의 가중합을 최대화하는 통합 최적화 구조를 제안하였다. 특히, 수신기에 MA를 도입하여 자기 간섭을 억제하고 센싱 정확도를 향상하여, 송·수신기 위치 최적화 기술이 갖는 효용성을 입증하였다.

4. 동적 MA 위치 조정을 통한 외부 환경 변화 강인성 향상 연구

MA는 통신 채널 불확실성 및 센싱 RCS 변동성 등과 같은 외부 환경 변화에 강인한 성능을 얻기 위해 안테나 위치를 동적으로 조정할 수 있다. 특히, 경로 손실 및 다중 경로 간섭이 심한 환경에서, MA는 신호 도달 경로를 효과적으로 보정하고, 사용자별 최적의 빔 응답을 형성함으로써 통신 성능을 안정적으로 유지한다. [9]에서는 ISAC 송신기에 MA를 배치하고, 물리적 이동 지연을 고려해 MA 위치를 주기적으로 한 번씩만 갱신하는 이중 시간 스케일 프레임워크를 제안하였다. 이 구조는 스캐닝 주기마다 MA 위치를 조정하고, 각 스캔샷마다 통신 및 센싱 빔포밍 벡터와 스캔샷 시간을 채널 및 환경 변화에 따라 최적화함으로써, 사용자 위치 변화, RCS 변동, 채널 불확실성 등 외부 요인에 유연하게 대응하였다. 이를 통해 통신 품질과 센싱 정확도를 유지하면서 평균 송신 전력을 효과적으로 낮출 수 있음을 보였다. [10]에서는 ISAC 송신기와 센싱 수신기 모두에 MA를 배치하고, 센싱 타겟에 해당하는 RCS 변동성을 고려한 확률 제약 하에, MA 위치와 통신 및 센싱 빔포밍을 공동 최적화하는 구조를 제안하였다. MA 위치를 세밀하게 조정함으로써, 동적 환경에서도 통신 및 센싱 서비스 품질을 안정적으로 유지하여 전체 송신 전력을 최소화하였으며, FPA 시스템 대비 RCS 변화에 대한 강건성과 전력 효율성을 동시에 확보할 수 있음을 실험적으로 보였다.

III. 기술적 한계 및 향후 연구 방향

MA 기반 ISAC 시스템의 실질적 구현을 위해서는 MA 위치를 변수로 도입함에 따라 발생하는 채널 응답의 비선형성과 위치 조합에 따른 고차 원성으로 인해 유도되는 복잡한 최적화 문제를 해결해야 한다. 또한 안테나 이동에 따른 제어 지연, 기계적 오차에 따른 정밀 위치 결정의 어려움, 전류 제어 기반 구동 장치의 전력 소모 등의 하드웨어 제약도 성능에 영향을 미친다. MA 기반 ISAC 시스템은 아직 초기 연구 단계에 있으며, 앞으로는 문제 차원을 줄이거나 분할하는 저복잡도 최적화 기법, 제어 및 정밀도 제약을 반영한 하드웨어 모델링, 그리고 통신과 센싱 요구를 모두 만족하는 통합 설계 전략 등이 함께 고려되어야 한다. 이러한 접근은 MA 기반 기술의 실제 적용 가능성을 높이는 데 중요한 역할을 할 것이다.

IV. 결론

본 논문에서는 MA 기반 ISAC 시스템 관련 최신 연구 논문을 조사하여, MA를 통해 ISAC 시스템이 얻을 수 있는 기술적 이점을 정리하였다. MA는 안테나 위치를 유동적으로 조정하여 센싱 정밀도 향상, 통신 품질 향상, 센싱 및 통신 동시 최적화, 그리고 환경 변화에 강인한 특성을 갖는 등 ISAC 시스템 성능을 향상할 수 있다. 한편, MA 기반 ISAC 연구는 하드웨어 구현 및 확장 가능성에 한계가 있으므로, 이를 해결하는 추가 연구 방향을 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2024-00405510)과 정보통신기획평가원의 지원(No.2022-0-00635, 28GHz대역/특화망대역/NR-U 대역을 지원하는 5G 산업용 단말 기술 개발, 25%; No. 2021-0-00864, 시공간 선 부호 기반 차세대 무선 접속 기술 개발, 25%)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] F. Liu et al., "Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1728-1767, Jun. 2022.
- [2] L. Zhu et al., "A Tutorial on movable antennas for wireless networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, (early access articles)
- [3] T. Hao, C. Shi, Y. Guo, B. Xia, and F. Yang, "Fluid-antenna enhanced integrated sensing and communication: Joint antenna positioning and beamforming design," in *Proc. IEEE/CIC Int. Conf. Commun. China (ICCC)*, Hangzhou, China, 2024, pp. 956-961.
- [4] R. Yang, Z. Dong, P. Cheng, Y. Xiu, Y. Li, and N. Wei, "Joint transceiver design for RIS enhanced dual-functional radar-communication with movable antenna," *arXiv preprint arXiv: 2502.09023*, 2025.
- [5] C. Zhang, Y. Xu, S. Peng, X. Guo, X. Ou, H. Hong, D. He, and W. Zhang, "Fluid antenna-aided robust secure transmission for RSMA-ISAC systems," *arXiv preprint arXiv: 2503.05515*, 2025.
- [6] Y. Xiu, S. Yang, W. Lyu, P. -L. Yeoh, Y. Li, and Y. Ai, "Movable antenna enabled ISAC beamforming design for low-altitude airborne vehicles," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, (early access articles)
- [7] W. Lyu, S. Yang, Y. Xiu, Z. Zhang, C. Assi, and C. Yuen, "Movable antenna enabled integrated sensing and communication," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 4, pp. 2862-2875, Apr. 2025.
- [8] S. Peng, C. Zhang, Y. Xu, Q. Wu, L. Zhu, X. Ou, and D. He, "Joint antenna position and beamforming optimization with self-interference mitigation in movable antenna aided ISAC system," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, Milan, Italy, 2025.
- [9] A. Khalili and R. Schober, "Movable antenna enabled ISAC: Tackling slow antenna movement, dynamic RCS, and imperfect CSI via two-timescale optimization," *arXiv preprint arXiv: 2503.18547*, 2025.
- [10] A. Khalili and R. Schober, "Advanced ISAC design: Movable antennas and accounting for dynamic RCS," *arXiv preprint arXiv: 2407.20930*, 2024.