

AI 기반 무선 통신 시스템에서 신뢰성 및 일반화 문제 연구 동향에 대한 조사

이승찬, 오준석, 원동욱, Quang Tuan Do, 송치현, 최성진, 김주영, 조성래
중앙대학교 컴퓨터공학과

{sclee, jsch, dwwon, dqtuan, chsong, sjchoi, jykim}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

Recent Trends in Reliability and Generalization Issues of AI-Based Wireless Communication Systems

Seungchan Lee, Junsuk Oh, Dongwook Won, Quang Tuan Do,
Chihyun Song, Seongjin Choi, Juyoung Kim, and Sungrae Cho

School of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University

요 약

인공지능 기반 통신 기술은 6G 무선 네트워크의 성능 향상을 위한 핵심 요소로 주목받고 있으나, 학습 모델의 신뢰성과 일반화 성능 한계는 여전히 중요한 도전과제로 남아 있다. 특히 훈련 환경과 상이한 무선 환경에서 발생하는 도메인 시프트는 학습 기반 통신 기법의 성능을 급격히 저하시켜, 초신뢰·초저지연 통신 요구사항을 만족하기 어렵게 만든다. 본 논문에서는 6G 환경에서의 머신러닝 및 딥러닝 기반 통신 기법을 대상으로, 신뢰성 및 일반화 문제에 관한 최근 연구 동향을 조사한다.

I. 서 론

차세대 6G 무선 통신에서는 초대용량·초저지연·초신뢰 통신을 달성하기 위해 머신러닝 및 딥러닝 기반 통신 기법의 도입이 필수적인 요소로 인식되고 있다 [1]. 최근 강화학습, 연합학습, 전이학습 등을 활용한 자원 할당, 채널 추정, 링크 적응 기법들이 제안되며 Artificial Intelligence (AI) 기반 통신의 잠재력이 보고되었다 [1]. 그러나 다수의 기존 연구는 시뮬레이션 환경이나 제한된 데이터셋을 기반으로 수행되어, 실제 무선 환경에 적용할 경우 도메인 시프트로 인한 성능 열화와 일반화 성능 부족 문제가 지적되고 있다 [2-3]. 또한 실제 무선 환경에서 대규모 학습 데이터를 확보하기 어렵다는 점은 학습 기반 기법의 신뢰성 확보를 더욱 어렵게 만든다. 본 논문에서는 이러한 문제의식 하에, 6G 무선 통신 시스템에서 AI 기반 통신 기법의 신뢰성 및 일반화 한계를 정리하고, 이를 완화하기 위한 도메인 일반화, 데이터 효율적 학습, 적응 학습 관점의 최신 연구 동향을 조사한다.

II. 도메인 시프트에 따른 일반화 성능 한계

무선 통신에서 도메인 시프트는 훈련 환경과 실제 운용 환경 간 채널 통계, 사용자 이동성, 간섭 조건 등의 분포 차이를 의미한다. 이러한 분포 변화가 발생할 경우, 딥러닝 기반 통신 모델은 훈련 환경에서는 우수한 성능을 보이더라도 실제 환경에서는 성능이 급격히 저하될 수 있다. [2]은 다수의 무선 통신용 머신러닝 기법이 특정 시뮬레이션 조건에 과적합되어 있으며, 새로운 채널 분포에서는 성능 안정성이 보장되지 않음을 지적하였다. [3] 역시 시간 변화 채널이나 비정상 간섭 환경에서 딥러닝 기반 수신기의 신뢰성이 크게 저하됨을 보고하였다.

도메인 시프트는 공변 시프트와 컨셉 시프트로 구분될 수 있으며, 무선 환경에서는 사용자 이동, 장애물 변화, 하드웨어 편차 등으로 인해 이러한 변화가 빈번하게 발생한다. [4]은 멀티모달 무선 환경에서 학습된 모델을

특정 특징에 의존할 경우 새로운 도메인에서 성능이 급격히 저하될 수 있음을 보였다. 또한 [5]은 시맨틱 통신 환경에서도 도메인 변화에 따른 성능 편차가 크며, 도메인 일반화 기법이 이러한 문제를 완화하는 핵심 요소임을 강조하였다. 이러한 결과들은 6G 환경에서 학습 기반 통신 기법의 실용화를 위해 일반화 성능 확보가 필수적임을 시사한다.

또한 도메인 시프트는 단순히 채널 분포가 달라지는 문제를 넘어, 학습 기반 수신기/제어기의 성능 변동성이 커지는 형태로 나타난다. 예를 들어 훈련 시 가정된 SNR 범위 또는 이동성 조건을 벗어나면, 링크 적응이나 빔 선택에서 오판율이 증가하여 블록 오류율이 급증할 수 있으며, 하드웨어 비선형성이나 주파수 오프셋 등 비이상 요인이 포함될 경우 모델이 의존하던 특징이 붕괴되기도 한다 [2-3]. 이러한 현상은 평균 성능뿐 아니라 최악(worst-case) 성능을 악화시키므로, 6G의 신뢰성 요구조건 관점에서 일반화 성능을 별도의 설계 목표로 다루어야 한다 [3-4].

III. 데이터 부족 문제와 신뢰성 향상 기법

무선 통신 분야에서는 대규모 공개 데이터셋이 부족하여, 학습 기반 통신 기법이 다양한 환경을 충분히 학습하지 못하는 문제가 존재한다. 제한된 데이터로 학습된 모델은 특정 환경에 과적합되기 쉽고, 이는 일반화 성능 저하로 이어진다. 이를 해결하기 위해 최근 연구들은 데이터 효율적 학습과 도메인 지식 활용에 주목하고 있다. 예를 들어, 측정 비용이 제한된 환경에서의 라디오 핑거프린팅 구축 문제에 대해 [6]은 제한된 측정 경로 길이 제약 하에서 recurrent Deep Q-Network (DQN)을 활용하여 측정 수집을 지능적으로 최적화함으로써, 제한된 데이터 조건에서도 성능을 향상시키는 접근을 제시하였다.

[4]은 물리 법칙을 반영한 손실 함수와 협력적 도메인 적응을 결합한 학습 프레임워크를 제안하여, 제한된 데이터 환경에서도 일반화 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 이와 함께 데이터 증강 및 도메인 랜덤화 기법을

통해 훈련 데이터의 다양성을 인위적으로 확장하려는 연구도 진행되고 있다. 또한 여러 도메인에서 공통적으로 유지되는 특징을 학습하는 표현 학습 기법이나, 메타러닝 기반 접근을 통해 새로운 환경에서도 안정적인 성능을 유지하려는 시도가 보고되고 있다 [2], [7].

IV. 적응 학습 및 지속 학습 접근

사전 학습만으로 모든 환경 변화를 대응하기 어렵기 때문에, 운용 단계에서 모델을 적응시키는 학습 기법 역시 중요하다. 전이학습과 도메인 적응은 소량의 새로운 데이터로 모델을 보정하는 방법으로 활용되고 있으나, 실시간 제약과 라벨 부족 문제로 한계가 존재한다. 이를 보완하기 위해 메타러닝 기반 few-shot 적응 기법이 제안되었으며, [7]은 이중 시스템 환경에서의 시공간적 변동성을 고려한 스트리밍 프레임워크를 제안하였다. 또한 신뢰성 요구조건을 목표로 한 응용 관점에서, [8]은 다중 Unmanned Aerial Vehicle (UAV) 제어 문제에서 협력적 다중 에이전트 심층 강화학습을 통해 감시 신뢰성을 향상시키는 프레임워크를 제안하여, 신뢰성 중심 학습 기반 제어의 가능성을 보여주었다.

다만 이러한 적응 학습이 실제 무선 시스템에서 안정적으로 동작하기 위해서는, 운용 단계에서 확보 가능한 데이터의 양과 품질이 결정적인 제약으로 작용한다. 즉, 타겟 도메인에서 라벨된 데이터를 충분히 수집하기 어렵고, 적응 과정 자체가 불안정해질 수 있다. 이러한 한계를 완화하기 위해 최근 연구들은 제한된 데이터 환경에서도 학습 기반 통신 기법의 일반화 성능을 향상시키는 방향에 주목하고 있다. 대표적으로 시뮬레이터 기반 합성 데이터 생성, 채널 및 간섭 조건을 체계적으로 변화시키는 데이터 증강, 그리고 라벨 의존성을 줄이는 자기지도학습 기반 표현 학습 기법들이 논의되고 있다. 특히 무선 통신 시스템은 채널 구조 및 물리적 제약이 비교적 명확하므로, 도메인 지식을 학습 과정에 반영하는 모델 기반 접근법이 데이터 효율성과 신뢰성을 동시에 향상시킬 수 있는 현실적인 대안으로 제시되고 있다 [1-2].

이러한 데이터 제약을 고려할 때, 연합학습을 통해서도 다른 환경에 위치한 노드들의 학습 경험을 공유함으로써 도메인 간 격차를 완화하려는 연구도 진행되고 있다 [4]. 장기적으로는 지속 학습 및 온라인 학습 기법을 통해 모델이 시간에 따른 환경 변화를 반영하면서도 기존 지식을 유지하도록 하는 방향이 6G 무선 AI 시스템의 신뢰성 확보에 중요할 것으로 전망된다.

V. 결론

본 논문에서는 6G 무선 통신 환경에서 AI 기반 통신 기법이 직면하는 신뢰성 및 일반화 문제에 대한 최근 연구 동향을 조사하였다. 도메인 시프트와 데이터 부족 문제는 학습 기반 통신 기법의 실질적 적용을 제한하는 주요 요인으로 작용하며, 이를 해결하기 위해 도메인 일반화, 데이터 효율적 학습, 적응 및 지속 학습 기법들이 제안되고 있다. 향후에는 통신 환경에 특화된 벤치마크 데이터셋과 평가 체계 구축, 그리고 신뢰성 검증을 고려한 학습 프레임워크 설계가 6G AI 기반 통신의 핵심 연구 과제가 될 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아

수행된 연구임(IITP-2026-RS-2022-00156353, 50% / IITP-2026-RS-2024-00436887, 50%)

참 고 문 헌

- [1] Y. Liu, Y. Deng, A. Nallanathan and J. Yuan, "Machine Learning for 6G Enhanced Ultra-Reliable and Low-Latency Services," *IEEE Wireless Communications*, vol. 30, no. 2, pp. 48-54, April 2023.
- [2] M. Akrouf, A. Feriani, F. Bellili, A. Mezghani and E. Hossain, "Domain Generalization in Machine Learning Models for Wireless Communications: Concepts, State-of-the-Art, and Open Issues," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 4, pp. 3014-3037, Fourthquarter 2023.
- [3] F. Zhu, X. Wang, C. Zhu, T. Gong, Z. Yang, C. Huang, X. Chen, Z. Zhang and M. Debbah, "Robust Deep Learning-Based Physical Layer Communications: Strategies and Approaches," *IEEE Network*, doi: 10.1109/MNET.2025.
- [4] M. Kim, W. Saad, and D. Calin, "Efficient Domain Generalization in Wireless Networks with Scarce Multi-Modal Data," *arXiv preprint arXiv:2510.04359*, 2025.
- [5] M. F. Zia, M. A. Ouameur, M. Bagaa, D. Massicotte, and A. Ksentini, "A survey of domain generalization in AI-enabled semantic communication: Architecture, challenges and future opportunities," *Physical Communication*, vol. 73, p. 102857, 2025.
- [6] J. Raghuram, Y. Zeng, D. G. Martí, R. R. Ortiz, S. Jha, J. Widmer, and S. Banerjee, "Few-Shot Domain Adaptation For End-to-End Communication," in *Proc. of International Conference on Learning Representations (ICLR)*, p. 1-35, May 2023.
- [7] S. Park, H. Baek and J. Kim, "Spatio-Temporal Multi-Metaverse Dynamic Streaming for Hybrid Quantum-Classical Systems," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 32, no. 6, pp. 5279-5294, Dec. 2024.
- [8] W. J. Yun, S. Park, J. Kim, M. Shin, S. Jung, and D. A. Mohaisen, "Cooperative Multiagent Deep Reinforcement Learning for Reliable Surveillance via Autonomous Multi-UAV Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 10, pp. 7086-7096, Oct. 2022.