

O-RAN에서 빔포밍 지원을 위한 최신 연구 동향 조사

최성진, 이동현, 오준석, 홍성훈, 이승찬, 김주영, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

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

A Survey on Beamforming Support in O-RAN

Seongjin Choi, Donghyun Lee, Junsuk Oh, Seonghun Hong,

Seungchan Lee, Juyoung Kim, and Sungrae Cho

Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University

요약

본 논문은 6G O-RAN (Open Radio Access Network) 환경에서의 빔포밍 지원 기술 연구 동향을 조사하였다. AI/ML 기반 빔 제어 구조와 프리코딩 학습, Latency 최적화 연구를 중심으로 O-RAN의 지능형 제어와 실시간 적응성 확보 방안을 고찰하였으며, 이들 연구는 Deep Reinforcement Learning 기반 제어 자동화, 실시간 스케줄링, 하이브리드 프리코딩을 통해 자율 빔 관리 기술의 발전 가능성을 제시한다.

I. 서론

6G 무선 네트워크가 요구하는 초고속, 초저지연, 초연결성 등을 실현하기 위해 O-RAN (Open Radio Access Network) 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 폐쇄형 RAN 구조는 밴드 종속성과 중앙집중적 제어로 인해 확장성과 효율성이 제한되었다. 하지만 O-RAN은 Virtualization, Softwarization, Open Interface 등을 통해 다양한 밴드 간의 상호운용성을 보장한다 [1].

또한 최근 네트워크 제어 전반에서 인공지능과 분산 학습 기반의 자원 최적화 연구가 활발히 진행되면서 에너지와 통신 효율을 동시에 고려하는 제어 패러다임이 제시되고 있다. DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) 기반의 연합 학습을 통해 통신 및 에너지 효율을 동시에 최적화한 연구 [2]와, 분산형 센서 네트워크에서 자율 통신 제어를 수행하는 DACODE (Distributed Adaptive Communication with On/Off switching and Dual queuing for Energy efficiency) 프레임워크 [3]는 향후 O-RAN 구조에서도 적용 가능한 지능형 제어 메커니즘을 보여준다.

O-RAN에서 빔포밍은 MIMO (Multi-input Multi-Output) 및 massive MIMO 환경에서 User-Centric 커버리지와 균일한 품질을 보장하기 위한 핵심 기술이다. 특히 mmWave 및 D2D 기반의 고속 스트리밍 트래픽이 폭발적으로 증가함에 따라 6G O-RAN 환경에서 효율적인 스펙트럼 활용을 위한 적응적이고 Quality-aware한 빔 관리 기술이 필수적으로 요구된다 [4]. 하지만 고속 이동 차량이나 UAV 등 동적인 환경에서는 빔 방향이 빠른 속도로 변하기 때문에 기존의 중앙집중식 최적화 방식은 안정적인 빔포밍을 보장하기 어렵다 [5].

이를 해결하기 위해 AI/ML 기반 빔 제어 구조와 프리코딩 학습, Latency 최적화를 중심으로 한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문은 위 연구 사례들을 중심으로 O-RAN 빔포밍 지원 기술의 발전 동향을 살펴본다.

II. 본론

O-RAN의 네트워크 운영 및 자원 관리 측면에서의 핵심 목표는 지능형 제어와 실시간 적응성을 동시에 확보하는 것인데, 이것은 동적으로 변화하는 채널과 트래픽 환경에서도 자율적인 빔 제어와 자원 최적화를 가능하게 하기 때문이다. 이러한 목표를 달성하기 위해 최신 연구들은 빔포밍 및 자원 제어를 인공지능 기반으로 설계하는 방향으로 발전하고 있다. [6]은 O-RAN 환경에서 DRL (Deep Reinforcement Learning)을 기반으로 xApp의 설계를 자동화한 프레임워크인 PandORA를 제안하였다. PandORA는 RIC (RAN Intelligent Controller) 환경에서 다양한 DRL 알고리즘을 기반으로 학습 파라미터를 자동으로 탐색 및 최적화하여 O-RAN 제어용 xApp의 효율적인 설계와 성능 일반화를 동시에 달성하는 것을 목표로 한다. 다시말해 복잡한 네트워크 제어 파라미터를 수동으로 조절하지 않고 DRL 기반 정책 학습을 통해 자율적으로 최적의 제어 구조를 도출하는 것이다.

이 프레임워크는 학습 및 검증 단계에서 Colosseum 무선 네트워크 에뮬레이터와 OpenRAN Gym을 활용하여 총 23개의 xApp을 자동 생성하고 서로 다른 트래픽 슬라이스에 대해서 성능을 비교 및 평가하였다. 그 결과 보상 함수 설계와 의사결정 주기 조절이 xApp의 성능에 큰 영향을 미침을 보였고, eMBB (enhanced Mobile Broadband)의 처리량은 약 99%, 향상되었고, mMTC (massive Machine-Type Communications)의 신뢰도는 56% 개선되는 등 서비스 유형별 성능 개선 효과를 입증하였다. 또한 계층적 학습 구조를 적용해 슬라이스 간 자원 경쟁을 최소화하면서 전체 네트워크 처리량을 약 99% 향상시켰다. PandORA는 O-RAN RIC 내에서 지능형 제어의 자동화 가능성을 제시한 대표적인 연구로, 향후 빔포밍 제어 및 자원 스케줄링 자동화의 기반을 마련하였다고 볼 수 있다.

[7]은 O-RAN의 O-DU에서 병렬 MIMO 자원 할당을 실시간으로 수행할 수 있는 실시간 다중 셀 MIMO 스케줄링 프레임워크인 O-M³를 제

시하였다. 기존의 중앙집중식 스케줄링은 셀 간 간섭과 시간지연 문제로 인해 효율성이 떨어지지만, 제안된 프레임워크는 협력적 스케줄링 태스크를 병렬 처리하여 시간지연을 대폭 줄였다. 또한 RL 기반 예측 모델을 결합함으로써 셀 간 간섭 정보를 실시간으로 반영하는 분산형 빔 할당을 구현하였다. 실험 결과 기존의 O-RAN의 스케줄러 대비 20% 이상 높은 Spectral Efficiency를 보였고, 사용자 이동성이 존재하는 상황에서도 안정적인 처리량을 유지할 수 있음을 보였다. 이 연구는 O-RAN의 실시간성 확보를 위한 하위 계층 수준의 구조적 개선을 보여주는 대표적 사례이다.

[8]은 O-RAN 아키텍처 내에서 mmWave massive MIMO 환경을 대상으로 하이브리드 빔포밍 구조와 Deep Learning 기반 프리코딩 구조를 결합하였다. 디지털 프리코딩은 DU에서 수행하고 아날로그 빔포밍은 RU에서 수행되며, 이를 통해 7.2x split fronthaul 링크의 제한된 대역폭 부하를 완화하였다. 또한, 기존 Convex Optimization 기법의 연산 지연을 줄이기 위해 Deep Multi-Output Neural Network 기반 프리코딩을 적용하여 실시간성과 일반화 능력을 동시에 확보하였다. 제안된 기법은 기존의 고정형 빔포밍과 비교하여 스펙트럼 효율이 약 20% 향상되었으며, 불완전한 채널 상태 정보나 사용자 이동성이 존재하는 환경에서도 안정적으로 성능을 보이는 것을 입증하였다. 이 연구는 O-RAN의 분산 구조를 활용해 빔포밍 연산을 분산 처리함으로써 물리계층 수준에서의 실시간 빔 관리의 가능성을 입증하였다는 점에서 의미가 있다.

III. 결론

본 논문에서는 O-RAN의 핵심 목표인 지능형 제어와 실시간 적응성 확보를 중심으로 빔포밍 지원 기술의 최근 연구 동향을 살펴보았다. DRL 기반 xApp 자동화 프레임워크인 PandORA는 RIC 계층에서의 자율 학습형 제어 구조를 구현하였으며, O-M³는 O-DU 수준에서 병렬 MIMO 스케줄링을 통해 실시간성 확보를 가능하게 하였다. 또한 Hybrid Beamforming 연구는 분산 구조를 활용하여 물리계층에서 실시간 빔포밍과 자원 분산 처리를 실현하였다.

이들 연구는 계층적으로 서로 다른 수준에서 O-RAN의 지능화·실시간화라는 동일한 목표를 달성하고 있으며, 향후 통합형 AI 제어 프레임워크 및 cross-layer 최적화 연구로 확장될 가능성을 보여준다. 특히 DRL-FL 기반의 자율 학습, 저지연 스케줄링, 에너지 효율적 빔 관리 기술의 융합은 차세대 6G O-RAN의 핵심 발전 방향이 될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

[1] B. Agarwal, R. Irmer, D. Lister, and G.-M. Muntean, "Open RAN for 6G networks: Architecture, Use Cases and Open Issues," *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, Apr. 18, 2025.

[2] M. C. Ho, A. T. Tran, D. Lee, J. Paek, W. Noh, and S. Cho, "A DDPG-based energy efficient federated learning algorithm with SWIPT and MC-NOMA," *ICT Express*, vol. 10, no. 3, pp. 600 - 607, June. 2024.

[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, no. 6, pp. 1085-1094, Dec. 2023.

[4] W. J. Yun, D. Kwon, M. Choi, J. Kim, G. Caire and A. F. Molisch, "Quality-Aware Deep Reinforcement Learning for Streaming in Infrastructure-Assisted Connected Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 2002-2017, Feb. 2022.

[5] W. J. Yun, S. Park, J. Kim, M. Shin, S. Jung, D. A. Mohaisen, and J.-H. Kim, "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.

[6] M. Tsampazi, S. D'Oro, M. Polese, L. Bonati, G. Poitou, M. Healy, M. Alavirad, and T. Melodia, "PandORA: Automated Design and Comprehensive Evaluation of Deep Reinforcement Learning Agents for Open RAN," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 24, no. 4, pp. 3223-3240, April 2025.

[7] Y. Chen, Y. T. Hou, W. Lou, J. H. Reed and S. Kompella, "O-M³: Real-Time Multi-Cell MIMO Scheduling in 5G O-RAN," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 42, no. 2, pp. 339-355, Feb. 2024.

[8] N. H. Tu, M. Kim and K. Lee, "Hybrid Beamforming and Deep-Learning-Enabled Precoding for O-RAN mmWave Massive MIMO," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Sep. 2025.