

O-RAN에서의 트래픽 관리 및 자원 할당에 대한 조사

최성진, 원동욱, 김재민, 김주영, 조성래

중앙대학교 컴퓨터공학과

{sjchoi, dwwon, jmkim, jykim}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

A Survey on Traffic Management and Resource Allocation in O-RAN

Seongjin Choi, Dongwook Won, Jaemin Kim, Juyoung Kim, and Sungrae Cho

Department of Computer Science and Engineering

Chung-Ang University

요약

본 논문은 트래픽 예측 기반 Traffic Steering, Federated DRL, AoI 기반 슬라이싱 등 O-RAN 환경에서의 지능형 트래픽 관리 및 자원 할당과 관련된 최신 연구 동향을 분석한다. 이러한 기법들은 O-RAN의 개방형 구조와 AI/ML 기반 RIC의 특성을 활용하여 다양한 서비스 클래스의 요구를 유연하게 수용할 수 있도록 돕는다. 특히, 계층적 제어 구조와 mixed numerology 기반 자원 분리를 통해 슬라이스 간 간섭을 최소화하고, 실시간성과 확장성을 동시에 확보할 수 있다. 본 연구는 6G 시대의 초지능·초연결 네트워크 실현을 위한 기술적 기반 마련에 기여할 수 있다.

I. 서론

차세대 무선 네트워크는 초고속 전송 속도, 초저지연, 초연결성을 달성하기 위해 네트워크 슬라이싱, 빔포밍과 같은 고도화된 통신 기술들을 도입하고 있다 [1]. 그러나 기존 폐쇄형 RAN 구조는 확장성 부족과 벤더 종속성으로 인하여 다양한 서비스 클래스 (mIoT, URLLC, eMBB)의 요구사항을 유연하게 반영하기 어렵다.

Open Radio Access Network (O-RAN)는 개방형 인터페이스와 RAN Intelligent Controller (RIC)를 기반으로 다중 벤더 장비 간 상호운용성을 보장하며, AI/ML을 통한 지능형 자원 관리가 가능하다. 특히 실시간 트래픽 패턴을 예측하거나 QoS/QoE 기반의 자원 재분배에서 AI/ML이 중요한 역할을 하고 있다 [2], [3].

최근 연구에서는 O-RAN의 발전 방향으로 지능성과 프로그램 가능성의 통합이 대두되고 있다. 예를 들어, Non-Real Time RIC (Non-RT RIC)와 Near-Real Time RIC (Near-RT RIC) 간의 계층적 제어 구조를 활용하여 정책 기반 제어와 동적 자원 할당을 결합하는 방안이 제안되고 있다. 이를 통해 트래픽 부하에 따른 네트워크 자원의 효율적 분배가 가능해진다 [4], [5]. 또한, 딥러닝 기반 O-RAN 관리 프레임워크는 네트워크 슬라이싱, 사용자 스케줄링, 빔포밍 최적화 등 다양한 자원 관리 문제를 데이터 기반으로 해결할 수 있음을 보여준다 [6].

이와 같이 O-RAN 환경에서 트래픽 관리와 자원 할당을 최적화하는 연구는 6G 시대의 초연결, 초지능 네트워크 실현에 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다. 본 논문에서는 O-RAN의 구조와 특징을 기반으로,

트래픽 관리 및 자원 할당과 관련된 최신 연구 동향을 분석하고 향후 발전 방향을 제시한다.

II. 본론

II-1. 트래픽 관리 기법

차세대 무선 네트워크에서는 다양한 서비스 클래스의 공존으로 인해 지능적이고 유연한 트래픽 관리가 중요해지고 있다. O-RAN은 non-RT RIC과 near-RT RIC의 계층 구조를 통해 트래픽 예측과 정책 기반 자원 최적화를 가능하게 한다.

[7]의 저자는 LSTM 기반의 트래픽 예측 모델을 적용한 지능형 Traffic Steering 프레임워크를 제안하였다. 이 프레임워크는 실시간 상황에 따라 사용자를 적절한 기지국에 배치하거나 자원의 효율적인 재배치를 수행하는데, rApp이 수행하는 트래픽 예측 및 슬라이싱 결정과 xApp이 수행하는 실시간 자원 할당을 결합해 구성된다. 이는 URLLC의 저지연성과 eMBB의 고속 처리 요구를 동시에 만족시키면서 실시간 트래픽 변화에 민감하게 대응할 수 있도록 설계되었다. 또한, 다양한 서브캐리어 구조를 적용한 슬라이스 간 간섭 방지를 통해 서비스 간 간섭을 최소화하고, 기존 RAN 구조의 유연성 부족 문제를 보완함으로써, 고도화된 트래픽 관리 전략으로서의 가치를 입증하고 있다.

II-2. 자원 할당 기법

O-RAN의 핵심 목표 중 하나는 QoS 보장과 함께 자원 효율성을 극대화하는 것이다. 이를 위해 최근 연구들은 딥러닝 기반의 자원 할당 최적화 기법에 주목하고 있다.

[8]의 저자는 다수의 Mobile Virtual Network Operator (MVNO) 가 존재하는 환경에서 Federated Deep Reinforcement Learning (FDRL) 기반의 협력적 RAN 슬라이싱 프레임워크를 제안하였다. 본 접근 방식에서는 개별 MVNO 가 자사의 사용자 데이터를 기반으로 DDPG 모델을 학습하고, 해당 모델을 RIC 에서 집계한 후 전체 MVNO 에 다시 배포하는 과정을 통해 데이터 프라이버시는 보장하면서도 다양한 환경에 일반화 가능한 DRL 모델을 구축할 수 있다.

[9]의 저자는 ORAN 에서 발생하는 서버 지연을 최소화하는 지연 인지형 자원 할당 최적화 모델을 제시하였다. 본 연구에서는 서버 지연을 비선형(지수적) 함수로 표현하며, 전력 소모, 리소스 블록, 가상 머신의 수와 같은 제약 조건 하에서 전체 지연을 최소화하는 목적함수를 구성하였다. 문제의 비선형성과 복잡성에 대응하기 위해 라그랑주 승수법을 통해 문제를 수학적으로 모델링하고, Active-set, Interior Point, Sequential Quadratic Programming 등 세 가지 최적화 알고리즘을 비교하였다. 이를 통해 실제 트래픽 환경에서 지연 민감형 서비스의 QoS 를 만족시키기 위한 정형적인 최적화 접근이 가능함을 보였다.

[10]의 저자는 산업용 IoT(IIoT) 환경을 위한 탄력적 O-RAN 슬라이싱(elastic slicing) 프레임워크를 제안하였다. 본 연구에서는 정보 신선도(AoI)를 최소화하면서 에너지 소모와 슬라이스 격리성을 동시에 고려한 자원 할당 최적화 문제를 정의하였고, 이 문제는 NP-hard 이다. 이를 해결하기 위해 분산 매칭 게임 기법과 심층 강화학습 기반 Actor-Critic 모델을 제안하였다. 이 구조는 IIoT 서비스의 패턴과 요구사항을 학습함으로써 장기적인 정책 기반의 자원 분배가 가능하며, 기존 방식 대비 평균 50% 이상의 장비 지원 성능 향상을 달성함을 보였다.

III. 결론

O-RAN 은 개방형 아키텍처와 AI/ML 기반의 RIC 를 통해 기존 폐쇄형 RAN 구조의 한계를 극복하고, 다양한 서비스 클래스의 요구를 유연하게 수용할 수 있는 기반을 제공한다. 본 논문에서는 O-RAN 환경에서의 트래픽 관리 및 자원 할당과 관련된 최신 연구들을 분석하였다. 트래픽 관리 측면에서는 LSTM 기반 예측과 rApp 과 xApp 의 연동을 통한 실시간 Traffic Steering 이 효과적인 방안으로 제시되었으며, 다양한 서브캐리어를 활용한 슬라이스 간 간섭 방지를 통해 서비스 품질이 향상됨을 확인하였다. 자원 할당 측면에서는 Federated DRL 을 활용한 프라이버시 보장형 슬라이싱, 지연 최소화를 위한 수학적 최적화 모델, 그리고 AoI 기반의 탄력적 슬라이싱 기법 등 다양한 접근 방식들이 제안되었다. 이러한 연구들은 O-RAN 이 지향하는 지능형, 자율형 네트워크 구조를 실현하는 데 핵심적인 역할을 하며, 향후 차세대 네트워크 서비스를 안정적으로 제공하기 위한 기반 기술로 발전할 것으로 기대된다. 향후에는 실제 상용 환경에서의 적용 가능성과 운영 효율성에 대한 추가적인 실증 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation) - ITRC (Information Technology Research Center) (IITP-2025-RS-2022-00156353, 50% / IITP-2025-RS-2024-00436887, 50%) grants funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT).

참 고 문 헌

- [1] M. Choi, J. Kim and J. Moon, "Wireless Video Caching and Dynamic Streaming Under Differentiated Quality Requirements," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 6, pp. 1245-1257, June 2018.
- [2] M. Polese, L. Bonati, S. D'Oro, S. Basagni and T. Melodia, "Understanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 1376-1411, 2023.
- [3] 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.
- [4] A. Arnaz, J. Lipman, M. Abolhasan and M. Hiltunen, "Toward Integrating Intelligence and Programmability in Open Radio Access Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 67747-67770, 2022.
- [5] 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.
- [6] B. Brik, K. Boutiba and A. Ksentini, "Deep Learning for B5G Open Radio Access Network: Evolution, Survey, Case Studies, and Challenges," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 228-250, 2022.
- [7] F. Kavehmadavani, V. -D. Nguyen, T. X. Vu and S. Chatzinotas, "Intelligent Traffic Steering in Beyond 5G Open RAN Based on LSTM Traffic Prediction," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 11, pp. 7727-7742, Nov. 2023.
- [8] A. Abouaomar, A. Taik, A. Filali and S. Cherkaoui, "Federated Deep Reinforcement Learning for Open RAN Slicing in 6G Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 2, pp. 126-132, February 2023.
- [9] B. N. Khalaf, W. H. Ali, R. S. Alhumaima, H. A. J. Alshamary, "Delay aware resource allocation in ORAN through network optimization," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 14, pp. 528-538, 2024.
- [10] S. F. Abedin, A. Mahmood, N. H. Tran, Z. Han and M. Gidlund, "Elastic O-RAN Slicing for Industrial Monitoring and Control: A Distributed Matching Game and Deep Reinforcement Learning Approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 10, pp. 10808-10822, Oct. 2022.