

기계학습 기반 트래픽 예측을 활용한 O-RAN E2AP 중복 메시지의 지능형 억제 기법

조세영

한국전자통신연구원

csy1009@etri.ac.kr

Intelligent Suppression of Redundant E2AP Messages in O-RAN using Machine Learning-based Traffic Prediction

Cho Sae Young

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문에서는 E2 노드가 과거의 트래픽 패턴을 학습하여, 정보량이 낮거나 정책적으로 불필요한 메시지를 사전에 예측하고 억제하는 인공지능 기반 메시지 최적화 프레임워크를 제안한다. 제안 방식은 LSTM(Long Short-Term Memory) 및 오토 인코더 기반의 ML(Machine Learning) 모델을 활용하여 메시지의 정보 유의성을 판단하고, 의미 있는 메시지에 대해서만 전송을 수행함으로써 네트워크 자원을 효율적으로 활용한다.

I. 서론

초고속, 초저지연, 초연결 특성을 요구하는 차세대 무선 통신망에서는 지능형 무선 차원 제어 및 효율적인 네트워크 운영이 핵심 기술로 주목받고 있다. 이에 따라, 3GPP와 O-RAN Alliance는 무선 접속망(RAN)의 개방성과 유연성을 확보하기 위해 O-RAN(Open Radio Access Network) 아키텍처를 제안하였으며, 이는 중앙집중형 제어 기능과 분산형 데이터 처리를 동시에 지원하는 구조로 설계되었다. 특히 O-RAN 구조 내에서 Near-Real Time RIC(RAN Intelligent Controller)는 E2 인터페이스를 통해 gNB 또는 O-DU와 다양한 제어 및 모니터링 메시지를 교환하며, 이 때 사용되는 E2 Application Protocol(E2AP)은 KPM(Key Performance Measurement), RC(RAN Control) 등 다양한 Service Model 기반의 KPI 보고, 이벤트 트리거링, 제어 명령 전달 등의 기능을 수행한다. 그러나 현재의 E2AP 메시지 흐름에는 여러 비효율성이 존재한다. 첫째, 대부분의 보고 메시지가 네트워크 상태와 무관하게 주기적으로 전송되어 불필요한 트래픽을 유발한다. 둘째, 의사결정에 영향을 주지 않는 메시지들도 동일한 우선순위로 처리되며, 이는 대역폭 낭비와 지연을 초래한다. 셋째, 메시지 양이 많아질수록 RIC의 연산 부담이 증가하여 실시간 제어 성능이 저하된다.

따라서 본 논문에서는 E2AP 메시지 중 반복적이거나 의미 없는 정보, 상태 변화가 거의 없는 정적 보고, 그리고 정책상 필요 없는 데이터를 식별하고 억제하기 위한 AI 기반 메시지 전송 제어 프레임워크를 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 O-RAN의 E2 인터페이스는 Near-Real Time RIC와 E2 노드(gNB, O-DU 등) 간의 실시간 제어 및 모니터링을 위해 설계된 핵심 경로로서, KPI 보고(E2SM-KPM), 무선 차원 구성 상태(E2SM-RC), 네트워크 슬라이스 정보(E2SM-NI) 등 다양한 유형의 메시지를 주기적 또

는 이벤트 기반으로 전달하는 기능을 수행한다. 그러나 실제 운영 환경에서는 메시지 전송과 관련하여 여러 비효율적인 현상이 반복적으로 나타나고 있으며, 이는 네트워크 리소스 낭비와 실시간 제어 성능 저하로 이어질 수 있다. 대표적인 문제로는 먼저, 정보의 실질적인 변화가 없음에도 동일한 메시지가 짧은 주기로 반복 전송되는 현상이 있다. 예를 들어 KPI 구성 상태 값이 수 초에서 수 분간 거의 동일하게 유지되는 상황에서도, 설정된 주기에 따라 동일한 정보가 지속적으로 보고된다. 이와 같은 반복 전송은 메시지의 정보량에 의해 과도한 전송 비용을 초래한다. 또한, 네트워크 품질 지표가 설정된 이벤트 임계값을 미세하게 넘나드는 경우에는 불필요한 이벤트 트리거 메시지가 빈번하게 발생한다. 이러한 과도한 민감도는 RIC의 처리 부담을 가중시키며, 제어 결정의 품질을 저해할 수 있다. 더불어, 제어 정책이 적용되지 않는 셀이나 슬라이스에 대해서도 KPI 정보가 계속해서 보고되는 문제가 있다. 이는 RIC 입장에서 활용되지 않는 데이터를 반복 수신하게 만들어, 자원 낭비로 이어진다. 여기에 더해 ACK 타이머 만료, 오류 복구 절차 등으로 인해 동일한 메시지가 중복 전송되는 경우까지 포함되면, 전체적인 메시지 트래픽 중 실질적으로 유의미한 정보는 극히 제한적인 상황이 발생한다. 이러한 관점에서 본 논문은 실시간 네트워크 제어의 품질을 유지하면서도 전송 효율을 향상시키기 위한 인공지능 기반 메시지 억제 프레임워크를 제안한다.

본 프레임워크는 메시지의 정보 가치를 정량적으로 평가하고, 정책 관점에서의 유의성 여부를 판단하여 전송 필요성을 동적으로 결정하는 방식으로 동작한다. 구체적으로, 메시지의 억제 여부는 정보 유사성, 정책 비관련성, 시간적 예측 가능성의 세 가지 기준을 바탕으로 판단된다. 정보 유사성은 메시지의 내용이 이전 전송과 매우 유사하여 새로운 의미를 전달하지 못하는 경우를 의미하며, 예를 들어 RSRP 값이 ± 1 dB 내에서만 반복적으로 변화하는 상황이 해당된다. 정책 비관련성은 해당 메시지가 현재 RIC의 제어 정책이나 서비스 시나리오에서 사용되지 않는 경우로, 제어 대상이 아닌 슬라이스에 대한 지속적인 보고가 대표적이다. 시간적 예측

가능성은 메시지의 발생 패턴이 반복적이며 이전 메시지를 기반으로 충분히 재구성 가능한 경우로, 주기적으로 동일한 KPI 값이 보고되는 상황 등이 이에 해당된다.

제안하는 프레임워크는 이러한 기준에 따라 각 메시지를 실시간으로 평가하고 억제 여부를 결정하는 여러 구성 요소로 이루어져 있다. 먼저, 메시지 분류기는 수신된 메시지를 E2SM 유형별로 분류하며, 정보 유의성 추정기는 LSTM과 Autoencoder 기반의 시계열 분석 기법을 활용해 메시지의 정보량을 계산한다. 이어서, 정책 기반 억제 컨트롤러는 현재 활성화된 제어 정책과의 연관성을 평가하여, 관련성이 낮은 메시지를 억제 대상으로 식별한다. 마지막으로, 전송 모듈은 위 과정을 거쳐 최종적으로 선별된 유의미한 메시지만을 E2AP를 통해 RIC로 전달한다. 전체 시스템은 각 메시지에 대해 유의성 점수를 계산한 후, 사전에 정의된 임계값과 비교하여 전송 여부를 결정하는 방식으로 동작한다. 이러한 접근법은 메시지 수를 효과적으로 줄이면서도 네트워크 제어에 필요한 핵심 정보는 안정적으로 유지할 수 있는 균형점을 제공하며, 결과적으로 O-RAN 기반 무선망의 전송 효율성과 RIC의 반응성을 동시에 향상시키는데 기여한다.

III. 시스템 설계

제안하는 인공지능 기반 메시지 억제 프레임워크는 E2 노드에서 발생하는 다양한 E2AP 메시지에 대해 정보 유의성과 정책 연관성을 판단하여 실시간으로 전송 여부를 결정하는 구조로 설계되었다. 전체 시스템은 메시지 수신부터 전송 결정에 이르기까지 다음과 같은 주요 구성 요소로 이루어진다. 먼저, 메시지 분류기(Message Classifier)는 수신된 메시지를 KPM, RC, NI 등 E2SM 유형별로 분류하며, 각 유형에 따라 적용되는 처리 로직을 구분한다. 이후, 정보 유의성 추정기(Information Relevance Estimator)는 메시지의 시간적 변화 패턴을 분석하여 정보량을 정량적으로 추정한다. 이를 위해 시계열 모델인 LSTM(Long Short-Term Memory)과 Autoencoder 기반의 재구성 오류 평가 방식을 활용한다. LSTM은 메시지의 시계열 상 예측 가능성을 학습하고, Autoencoder는 메시지를 재구성하면서 정보의 변화 정도를 수치화한다. 이어지는 정책 기반 억제 컨트롤러(Policy-Aware Suppression Controller)는 현재 RIC에서 활성화된 제어 정책 정보를 바탕으로 메시지의 정책 관련성을 평가한다. 제어 대상이 아닌 셀이나 슬라이스에서 수신된 메시지는, 유의성 점수와 관계없이 억제 대상으로 분류될 수 있다. 마지막으로, 전송 모듈(Transmission Module)은 위의 판단 결과를 종합하여, 유의미하다고 판단된 메시지만을 선택적으로 RIC로 전송한다.

시스템은 각 메시지에 대해 유의성 점수와 정책 관련성을 동시에 고려한 통합 평가를 수행하며, 설정된 임계값을 기준으로 억제 여부를 결정한다. 이러한 구조는 단순 필터링이 아닌, 지능형 판단 기반의 메시지 억제를 가능하게 하며, 결과적으로 메시지 트래픽을 줄이면서도 실시간 제어 품질을 보장할 수 있도록 설계되었다.

IV. 실험 및 분석

제안한 프레임워크의 성능을 검증하기 위해, E2AP 메시지 특성을 반영한 시뮬레이션 기반 실험을 수행하였다. 실험 환경은 Python 기반의 시계열 분석 및 머신러닝 프레임워크(PyTorch, Scikit-learn 등)를 활용하여 구축되었으며, KPI 보고 메시지를 중심으로 데이터셋을 구성하였다. 실험은 두 가지 시나리오에서 수행되었다. 하나는 트래픽 부하가 낮고 상태 변화가 적은 환경이며, 다른 하나는 이벤트 빈도가 높고 정책이 다양한 고복잡도 환경이다. 성능 평가 지표로는 전체 메시지 억제율(Suppression

Rate), 정보 손실률(Information Loss Rate), RIC 수신 메시지 감소율(RIC Load Reduction), 정책 연관성 분석 정확도(Policy Relevance Accuracy)를 사용하였다. 이 중 억제율은 전체 메시지 중 억제된 비율을 나타내며, 정보 손실률은 억제된 메시지로 인해 실제 필요한 정보를 놓친 비율을 의미한다. 또한, RIC 수신 감소율은 시스템 적용 전후의 메시지 수 차이를 정량화한 지표이다. 실험 결과, 제안 시스템은 평균 40~60%의 메시지를 억제하면서도 정보 손실률은 2% 이내로 억제되었고, 정책 비관련 메시지 식별 정확도는 96% 이상을 기록하였다. 특히 주기적으로 변화가 없는 KPI 항목에서 높은 억제 효과를 보였으며, 이벤트 기반 메시지의 경우에도 과도한 트리거링을 효과적으로 차단할 수 있었다. 이는 제안 시스템이 반복적이거나 불필요한 메시지를 효과적으로 제거하면서도, 실시간 제어에 필요한 정보는 안정적으로 유지하고 있음을 보여준다. 또한, RIC 측의 메시지 수신량이 크게 줄어들면서 CPU 사용률과 처리 지연이 완화되는 등 시스템 레벨에서의 성능 개선도 확인되었다. 이러한 실험 결과는 제안 프레임워크가 실제 O-RAN 환경에서도 적용 가능성이 높으며, 트래픽 최적화 및 지능형 RAN 제어를 위한 기반 기술로 활용될 수 있음을 시사한다.

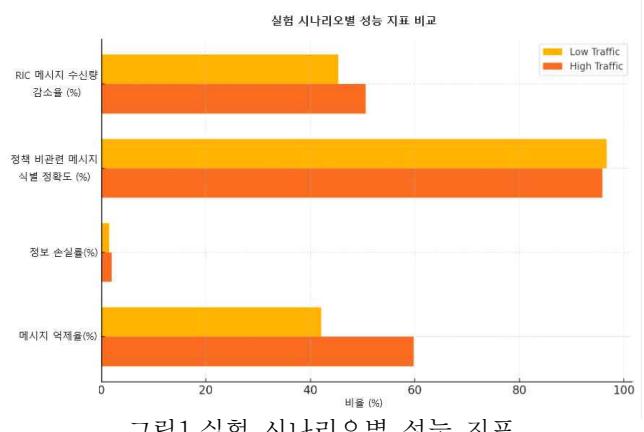


그림 1. 실험 시나리오별 성능 지표

V. 결론

본 논문에서는 O-RAN 기반 무선 접속망에서 발생하는 E2AP 메시지 전송의 비효율성을 해결하기 위해, AI 기반 메시지 억제 프레임워크를 제안하였다. 제안 시스템은 메시지의 정보 유사성, 정책 비관련성, 시간적 예측 가능성 등을 기준으로 메시지의 유의성을 정량적으로 평가하며, LSTM 및 Autoencoder 기반의 시계열 분석 모델을 활용해 불필요한 메시지를 실시간으로 억제하도록 설계되었다. 실험을 통해 제안 기법은 평균 40~60%의 메시지를 효과적으로 억제하면서도 정보 손실률은 2% 이내로 유지되었으며, 정책 비관련 메시지 식별 정확도 또한 96% 이상으로 나타났다. 이를 통해 본 프레임워크는 RIC의 메시지 처리 부하를 줄이고 실시간 제어 반응성을 개선하는 데 실질적인 효과가 있음을 입증하였다.

시스템은 각 메시지에 대해 유의성 점수와 정책 관련성을 동시에 고려한 통합 평가를 수행하며, 설정된 임계값을 기준으로 억제 여부를 결정한다. 이러한 구조는 단순 필터링이 아닌, 지능형 판단 기반의 메시지 억제를 가능하게 하며, 결과적으로 메시지 트래픽을 줄이면서도 실시간 제어 품질을 보장할 수 있도록 설계되었다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-023-00225468, Development of RAN Intelligent Controller for ORAN intelligence).

참 고 문 헌

- [1] O-RAN Alliance, "O-RAN E2 Application Protocol (E2AP) Specification," ORAN.WG3.E2AP-v02.00, Oct. 2020.
- [2] O-RAN Alliance, "O-RAN Use Cases and Deployment Scenarios," O-RAN.WG1.UseCases-v08.00, July 2022.
- [3] 3GPP TS 38.463, "NG-RAN; E2 Application Protocol (E2AP)," Release 16, Dec. 2020.
- [4] T. Wang, R. N. Uma, and T. Melodia, "Machine Learning for 5G/B5G Mobile and Wireless Communications: Potential, Limitations, and Future Directions," IEEE Access, vol. 9, pp. 72063 - 72090, 2021.
- [5] D. Liu, Y. Liu, and Y. Chen, "Reinforcement Learning-Based Dynamic Resource Allocation for 5G Slicing," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 7, pp. 1420 - 1432, July 2020.
- [6] M. Polese, M. Giordani, and M. Zorzi, "Machine Learning at the Edge for Channel-Oriented Optimization in 5G Networks," in Proc. IEEE ICC, 2021.[7] M. Y. Arslan, M. H. Kabir, et al., "AI/ML in ORAN: Current State and Future Challenges," in IEEE Communications Magazine, vol. 60, no. 12, pp. 56 - 62, Dec. 2022