

가상화 기지국 환경 near-RT RIC 연동 MAC 로그 수집 및 LLM 기반 분석 테스트베드 구현

정태일, 최재형, 홍인기
경희대학교

wjdxodlf012345@khu.ac.kr, wogud1221@khu.ac.kr, ekhong@khu.ac.kr

Implementation of a Testbed for MAC Log Collection and LLM-Based Analysis with near-RT RIC Integration in a Virtualized Base Station Environment

Taeil Jung, Jaehyung Choi, Eenkee Hong
Kyunghee University

요약

본 연구에서는 오픈소스 가상화 기지국 플랫폼인 OpenAirInterface(OAI)와 near-Real Time RIC 플랫폼인 FlexRIC을 O-RAN 표준 기반 E2 인터페이스로 연동하여 UE 단위 MAC 계층 로그를 수집하는 xApp을 구현하였고, 수집된 MAC 로그를 대규모 언어 모델(LLM)로 분석하여 가상화 RAN 환경에서의 MAC 계층 운영 특성과 성능을 평가하였다.

I. 서론

O-RAN Alliance에서 정의한 표준은 기지국 기능의 개방 및 상호 운용을 가능하게 하며, 표준화된 인터페이스를 통해 다종 벤더 장비 및 소프트웨어 구성 요소의 결합이 가능한 RAN 환경을 구현한다[1]. 가상화 기술은 클라우드 네이티브 인프라 기반 배치, 확장성, 비용 효율성, 운영 자동화 등의 이점을 제공한다.

그러나 개방성 및 가상화의 확산은 운영 복잡도를 증가시킨다. 기지국 내 MAC 계층은 무선 자원 스케줄링, 링크 적응, 서비스 품질 보장 등의 기능을 수행하는 시간 민감적 계층이며, 해당 계층의 운영 및 해석을 위해서는 전문 지식이 요구된다. 이에 따라 MAC 계층의 동작 상태 파악 및 성능 저하의 근본 원인 진단에 어려움이 존재한다.

본 논문에서는 O-RAN 표준을 준수하는 FlexRIC을 활용하여 E2 인터페이스를 통한 MAC 계층 로그 수집 및 대규모 언어 모델(LLM) 기반 로그 분석 구조를 제안한다. OAI 기반 가상화 기지국 및 코어 네트워크와 FlexRIC을 연동한 테스트베드를 구축 하였으며, near-RT RIC 플랫폼 상에서 xApp을 통한 UE 단위 MAC 로그 수집 환경을 구현하였다. 수집된 로그에 대한 분석을 통해 네트워크 상태 진단 및 성능 분석 측면에서 LLM 기반 MAC 로그 분석 기법의 유효성 및 활용 가능성을 검증한다.

II. 본론

본 논문에서 제안하는 시스템 구조는 그림 1에 제시되어 있다. OAI 기반 가상화 기지국 및 코어 네트워크를 구축하고[2], O-RAN 표준을 준수하는 near-RT RIC 플랫폼인 FlexRIC을 연동하여 MAC 계층 로그를 수집하는 시스템 모델을 설계하였다[3]. 테스트베드는 도커 컨테이너 기반 가상화 환경 위에서 동작하며, OAI 코어 네트워크, 기지국, FlexRIC이 연동되는 구조로 구성되었다. 상용 UE와 SDR 장비가 포함된 종단 간 5G 통신 환경에서 MAC 계층 동작을 관찰하고 수집·분석할 수 있는 환경을 구축하였다.

Near-RT RIC에서 동작하는 MAC 로그 모니터링 xApp은 SWIG 바인딩을 활용하여 Python 언어로 구현하였다. xApp은 E2 인터페이스를 통해 gNB 컨테이너로부터 MAC 계층 정보를 수집하며, BLER, MCS 변동, 할당 PRB 수 등의 성능 지표를 저장하도록 설계되었다. xApp은 MAC 계층 이벤트 및 성능 변동을 추적할 수 있는 구조를 갖추고 있어, MAC 계층의 동작 특성과 상태 변화를 분석할 수 있다.

대규모 언어 모델(LLM)에 입력하여 분석을 수행한다. 본 연구는 LLM을 통해 로그에 포함된 지표 간 상관관계 해석, 성능 저하 원인 추정, 장애 징후 식별, 네트워크 운영 전략 도출 가능성을 검증한다. 이를 통해 MAC 로그를 활용하여 운영자가 수행하는 진단 과정을 자동화할 수 있음을 제시한다. 본 논문은 near-RT RIC 기반 MAC 로그 수집과 LLM 기반 분석을 결합한 프레임워크가 vRAN 환경에서 동작한다.

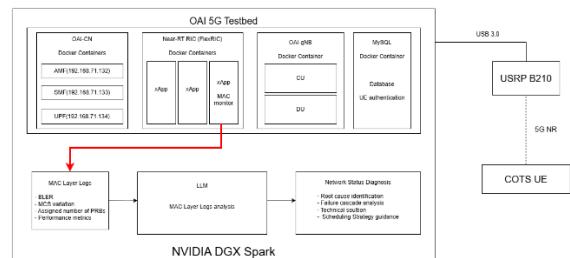


그림 1. 테스트 베드 연동 구조

하지만 MAC 계층 데이터 수집 측면에서 볼 때, 5G vRAN 환경의 1ms로 생성되는 원천 계층 데이터를 전수 수준으로 수집하는 접근은 인한 과도한 로깅 데이터를 생성할 수 있다[4]. 이러한 관점에서 본 연구에서는 MAC 계층 통계를 500 ms 주기로 집계하고, UE 별 자원 할당 및 링크 상태 지표를 1 초 주기로 로깅하도록 설계함으로써, 원천 MAC 트래픽을 그대로 수집하는 방식이 야기하는 데이터 폭증 문제를 완화하면서도,

스케줄링 동작 분석과 UE 단위 성능 평가에 요구되는 시간 해상도를 유지하는 데이터 수집하였다.

우선, 무선 자원 할당 지표로서 PRB(Physical Resource Block) 사용량이 UE 별로 측정되는데, PRBs(max)는 해당 UE의 측정 구간 내 슬롯별 최대 할당 PRB 수를 의미하며, PRBs(total)은 UE 연결 시점 이후 누적 PRB 사용량을 나타낸다. 이는 각각 개별 UE의 순간 자원 할당 강도와 장기 자원 소비 패턴을 정량화한다. 또한 TBS(Transport Block Size)는 해당 UE의 MAC 계층에서 처리된 누적 전송 블록 크기를, SDUs(Service Data Units)는 상위 계층으로부터 수신한 데이터 단위의 누적 개수를 각각 기록한다.

링크 품질 및 신뢰성 지표로서 HARQ(Hybrid Automatic Repeat Request)는 각 UE의 DL/UL 방향별 재전송 횟수를 추적하여 UE 별 무선 구간 전송 성공률을 평가한다. 마지막으로 Frame과 Slot 정보는 3GPP 5G NR 표준의 프레임 구조에 따른 시간 참조점을 제공하며, 모든 메트릭은 UE 별로 독립적으로 기록되어 다중 UE 환경에서의 개별 성능 분석 및 비교를 가능하게 한다.

다음은 실제 OAI 기반 테스트베드와 FlexRIC 환경에서 수집된 MAC 계층 로그를 대상으로 수행한 분석 결과이다. 본 연구에서는 nemotron-nano-9B-v2 LLM 모델을 활용하여 수집된 로그를 자동 분석하도록 구성하였다. 그림 2와 같이 MAC 로그에 대한 LLM 출력은 특정 시간 구간 내에서 비정상적인 패턴이나 성능 저하 징후가 탐지되지 않는 경우와 정상 동작 상태를 명시적으로 선언하도록 동작한다. 반면, PRB(Physical Resource Block) 이용량의 급격한 변동, PUSCH SNR의 특정 시점 저하, 혹은 PRBs(max)와 PRBs(total) 간의 비정상적인 관계와 같이 성능 편차가 감지되는 경우에는 해당 구간을 ISSUE 항목으로 분류하여 제시하고, 그에 대한 근거, 영향 가능성 그리고 추가 확인이 필요한 점검 요소를 구조화된 형태로 제공하도록 설계되었다.

그림 2 MAC 로그에 대한 LLM 출력

이와 같은 출력 구조를 통해, 기준의 수동 로그 확인 방식에서 요구되던 반복적인 패턴 탐지 및 해석 과정을 크게 단축할 수 있으며, 운영자는 단순 수치 변화를 넘어 시간 구간별 성능 상태와 이상 징후 발생 맥락을 함께 파악할 수 있다. 또한 본 연구에서 활용한 LLM 분석 방식은 특정 지표의 절대값뿐만 아니라, 지표 간 상호 변화 양상과 시간축 상의 연속적 변화를 함께 고려할 수 있도록 구성되어 있어, MAC 계층 수준에서 발생하는 상태 변동을 보다 정밀하게 관찰하고 해석할 수 있는 장점을 제공한다. 이러한 결과를 통해, 제안된 구조가 MAC 로그 기반 성능 관찰 환경에서 자동 분석 도구로서 기능할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 본 논문에서는 O-RAN 표준 기반 near-RT RIC 환경에서 MAC 계층 로그를 수집하고,

대규모 언어 모델(LLM)을 활용하여 로그 해석을 수행하는 테스트베드 연동 구조를 제안하고 실험적으로 검증하였다. OAI 기반 가상화 기지국과 FlexRIC을 연동한 실제 5G 테스트베드 환경에서 수행된 실험을 통해, 제안된 프레임워크가 MAC 계층 로그에 포함된 다양한 성능 지표를 해석 가능한 형태로 구조화하고, 이상 징후 구간 식별, 원인 후보 제시, 추가 점검 항목 제안과 같은 운영 실무에 유용한 진단 정보를 자동으로 생성할 수 있음을 확인하였다.

그러나 본 연구는 데이터 수집 효율성과 시스템 복잡도 간의 균형을 고려하여 MAC 계층 통계를 500 ms 주기로 수집하고, UE 단위 MAC 로그를 1 초 주기로 로깅하도록 설계하였다. 이러한 설계는 데이터 폭증 문제를 완화한다는 실용적 장점이 있지만, 동시에 1 초 미만의 미세 시간 구간에서 발생하는 순간적인 스케줄링 이벤트, 짧은 지속시간의 링크 품질 열화, 그리고 단기 트래픽 급변 현상을 완전히 포착하지 못할 가능성을 내포한다는 한계를 가진다. 즉, 본 연구에서 제시된 결과는 중장기적 MAC 동작 분석과 이상 징후 경향 파악에 적합하지만, 초저지연·초세밀한 실시간 제어 관점에서는 보완이 요구된다.

향후 연구에서는 더 미세한 시간 해상도를 지원하는 계층적 로깅 구조 설계, 실시간 분석 및 페루프 제어와의 연계 등을 통해 보다 정밀하고 신뢰성 있는 AI-native O-RAN 운용 지원 체계로 확장하는 것을 목표로 할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보-통신기획평가원의 지원 (No. RS-2024-00395824, *Upper-mid band*를 지원하는 *Cloud virtualized RAN(vRAN)* 시스템 기술 개발, 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신-기획평가원의 부분적 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00397520, 5G 버티컬 서비스를 위한 가상화 기반 경량형 5G 올인원 시스템 개발, 50%).

참고 문헌

- [1] M. Polese, L. Bonati, S. D’Oro, S. Basagni, and T. Melodia, “Understanding O-RAN: Architecture, interfaces, algorithms, security, and research challenges,” IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 25, no. 2, pp. 1376–1411, 2nd Quart., 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3239220..
- [2] N. Nikaein, M. K. Marina, S. Manickam, A. Dawson, R. Knopp, and C. Bonnet, “OpenAirInterface: A flexible platform for 5G research,” ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 44, no. 5, pp. 33–38, Oct. 2014, doi: 10.1145/2677046.2677053.
- [3] R. Schmidt, M. Irazabal, and N. Nikaein, “FlexRIC: An SDK for next-generation SD-RANs,” in Proc. 17th Int. Conf. Emerg. Netw. Experiments Technol., Dec. 2021, pp. 411–425, doi: 10.1145/3485983.34 94870.
- [4] Ananthanarayanan, G., Balkwill, M., Foukas, X., Lai, Z., Radunovic, B., Settle, C., and Zhang, Y., “Distributed AI Platform for the 6G RAN,” *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Open and AI RAN (OpenRAN ’25)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 15–21, 2025, doi:10.1145/3737900.3770167.