

DT-RAN 소개: 디지털 트윈 기반 O-RAN을 통한 차세대 RAN 최적화 및 제어 기술

최재형, 김건, 홍인기

경희대학교

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

DT-RAN : Enabling Next-Generation RAN Optimization and Control through Digital Twin-Based O-RAN

Jaehyung Choi, Geon Kim, Een Kee Hong

Kyunghee University

요약

본 논문은 Open Radio Access Network 환경에서 Digital Twin Radio Access Network의 등장 배경, 주요 구성요소 등을 정리하여 실시간 최적화 및 지능형 네트워크 제어가 가능함을 보인다. 또한, 다양한 Use Case들을 소개하고 기존 연구의 한계점을 기반으로 개선 방향을 제시한다. Digital Twin Radio Access Network는 현재 개념적인 단계에 머물러 있기에 DT-RAN 연구를 시작하려는 연구자 및 개발자들에게 가이드라인을 제공한다.

I. 서론

무선 액세스 네트워크 (RAN)는 벤더 종속 구조에서 벗어나 상호 운용성, 제어 정책 검증·운영 효율화, AI/ML 모델 학습·검증, 대규모 시나리오 기반 성능 예측 등을 실시간으로 지원하기 위해 O-RAN (Open RAN)을 도입했다. 그러나 네트워크 복잡도가 증가하면서 보다 정교한 검증·예측 기법이 요구된다 [1]. 또한, 5G는 공중망을 넘어 스마트 공장·물류센터·캠페스 등 특정 구역에 맞춰 구축되는 5G 특화망 (Private 5G Network)에서도 빠르게 확장 중이며, 이들 환경은 초저지연·고신뢰성·강화된 보안·로컬 제어가 필수이다 [2].

이러한 O-RAN의 검증·운영 요구와 특화망의 서비스 요구를 동시에 만족시키기 위해, 본 논문에서는 DT-RAN (Digital Twin RAN)을 제안한다. DT-RAN은 물리적 RAN의 토폴로지·채널 상태·트래픽 패턴을 가상 환경에 동일하게 재현해, 제어 정책 사전 검증, AI/ML 워크플로우 검증, 시나리오 기반 성능 예측을 지원함으로써 공중망과 특화망 모두에서 안전하고 효율적인 제어를 가능하게 한다. 본문에서는 O-RAN 환경에서 DT-RAN의 필요성과 배경을 살펴보고, 주요 구성 요소와 Use Case를 소개하고, 아울러 기존 연구의 한계와 이를 극복하기 위한 개선 방안을 제시한다.

II. 본론

1. DT-RAN 등장 배경

RAN은 기지국·DU·CU·사용자 단말 등 수많은 요소가 실시간으로 상호 작용하는 복합 시스템으로, 5G를 넘어 6G로 진화할수록 제어해야 할 파라미터의 수와 상호 의존성은 기하급수적으로 증가한다. O-RAN 아키텍처는 개방형 인터페이스와 다중 벤더 호환성을 통해 유연성과 확장성을 대폭 개선하였다. 하지만 대규모 필드 검증이 비용·시간·위험 측면에서 사실상 불가능하며, 실 네트워크에 직접 적용 시 QoS 저하나 서비스 중단 리스크가 상존한다.

이러한 한계를 극복하기 위해 DT-RAN은 물리 RAN의 실시간 측정 데이터를 활용해 네트워크 토폴로지·채널 상태·트래픽 패턴 등을 동기화된 가상 환경에 재현하고, AI/ML 기반 자동 최적화 및 검증된 시나리오의 안전 적용 워크플로우를 제공한다. ITU-R M.2516-0 권고안에서도 디지털 트윈 기술을 차세대 무선망의 자동화·자율화 실현을 위한 핵심 인프라로 주목하고 있다 [3],[4].

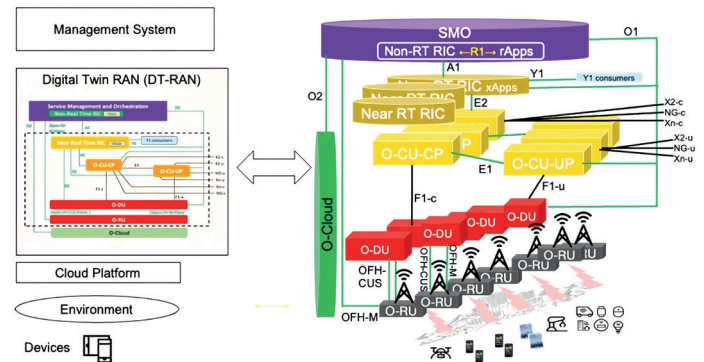


그림 1. O-RAN nGRG가 제안하는 DT-RAN의 구조

2. DT-RAN 구조 및 구현

그림 1에서 확인할 수 있듯이, DT-RAN은 물리 RAN과 동일한 구조로 구성되며, 표준 인터페이스를 그대로 복제하여 가상환경에서도 동일한 방식으로 통신하도록 설계된다. 이러한 DT-RAN을 구현하는 절차는 다음과 같다.

A. O1/O2 구독 에이전트

Non-RT RIC에 구독 에이전트를 배치하여 물리 RAN의 PM(Performance Management), CM(Configuration Management), FM(Fault Management) 지표 및 장기 트래픽·정책 데이터를 구독할 수 있도록 한다.

B. E2 구독 에이전트

Near-RT RIC에 구독을 수행하는 xApp을 배포하여, PRB (Physical Resource Block)사용률·MCS (Modulation and Coding Scheme) 등의 데이터를 10 ms에서 100 ms 단위로 수신할 수 있도록 한다.

C. 3D 환경 모델 및 채널 모델 구현

드라이브 테스트, LiDAR, 위성 영상 등을 통해 3D 메쉬를 생성한다. DT-RAN은 아주 정교한 3D 모델 구현은 불필요하므로 앞서 생성된 3D 메쉬를 경량화한다. 그 뒤에 Stochastic 채널 모델을 적용해 거리·페이딩 특성을 모사하고, 실측치와 비교하여 주요 파라미터를 반복 보정함으로써 채널 정확도를 유지한다 [3].

아직 DT-RAN에 대한 연구가 활발하지 않으며 정해진 표준도 없기에 앞서 말한 구조와 구현 절차는 O-RAN Alliance의 nGRG(next Generation Research Group)에서 제안하는 DT-RAN을 소개한 것이다. 이외에도 Azure와 같은 클라우드 플랫폼을 이용하거나 전체 물리 RAN을 복제하는

대신 모듈 단위로 트윈을 생성하는 것을 시작으로 점차 전체 복제 방식으로 확장하려는 시도들도 있다 [5],[6],[7].

3. DT-RAN Use Case

DT-RAN은 데이터 수집·모델링·시뮬레이션·인터페이스 기술을 바탕으로 다양한 RAN 운영·검증 시나리오에 적용될 수 있다.

A. Network Planning

디지털 트윈 환경에서는 가상 시뮬레이션을 통해 다양한 셀 배치, 빔구성 등을 시도하는 것이 가능하므로 AI/ML을 결합하여 최적의 셀 배치 혹은 빔포밍 구성을 찾는 데 활용할 수 있다.

B. Network Performance Predictions

DT-RAN은 AI, E2 등 여러가지 실제 인터페이스들이 모두 동일하게 복제되어 있으므로 여러가지 시나리오들에 대한 KPI (Key Performance Indicator)들을 예측할 수 있다.

C. Network Energy Saving

셀 스위칭, On/Off, 안테나 수 조정 등 여러가지 시나리오를 시뮬레이션하여 AI/ML을 통해 최소한의 에너지로 최대의 성능을 확보하는 조합을 찾아내 전력 소모를 줄이는 것이 가능하다.

D. xApp/rApp Testing

네트워크는 앞으로 변동성이 더욱 심해질 것으로 예상되는데 [4], 이러한 상황에서 xApp이나 rApp의 정책들을 물리 RAN에 바로 적용하는 것은 위험부담이 존재한다. 하지만 DT-RAN에 적용하여 실험 및 검증을 한다면 위험부담을 줄이는 동시에 반복 실행을 통해 최적화된 상태의 정책을 물리 RAN에 배포하는 것이 가능하다 [3],[8].

4. DT-RAN의 한계와 개선방안

System Type	GPU Qnty	GPU vRAM	GPU Requirement	GPU Notes
Frontend alone	1	12GB+	GTX/RTX	e.g. RTX 6000 Ada, A10, L40
Backend alone	1	48GB+		e.g. RTX 6000 Ada, A100, H100, L40
Frontend and backend replay	1	48GB+		e.g. RTX 6000 Ada, L40
Frontend and backend colocated	2	see note	see note	1x frontend-capable GPU, 1x backend GPU

표 1. Aerial Omniverse Digital Twin이 요구하는 GPU

현재까지 연구된 DT-RAN은 개념 단계에 머물러 있으며, 실제 구현에 필요한 시스템 자원과 운영상의 제약에 대한 논의가 이루어지지 않았다. 예컨대, 표 1에 정리된 NVIDIA AODT (Aerial Omniverse Digital Twin)는 비실시간 가상 시뮬레이션 구조임에도 불구하고 최소 12 GB VRAM (Video Random Access Memory)의 GPU (Graphics Processing Unit)에 서부터 48 GB VRAM 이상의 GPU까지 수천만 원대의 고성능 GPU를 요구한다. 그러나 DT-RAN은 실시간으로 채널 모델·트래픽·3D 모델을 동시 구현하고, 24시간 연속 운영을 보장하며, 수백 수천 기지국 및 수십만 UE에 대한 동적 모델링과 AI 기반 최적화를 수행해야 하므로, AODT보다 훨씬 더 높은 연산 성능과 전력 효율, 안정성, 그리고 물리 RAN과의 저지연 동기화를 요구한다. 이처럼 GPU 성능과 전력 소모는 물론, 비용 및 시스템 설계 다양한 제약 요인이 DT-RAN 구현을 한층 더 어렵게 만든다 [6].

비용 문제의 경우, 최근 NVIDIA는 O-RAN 및 AI-RAN (Artificial Intelligence-based RAN)을 통해 네트워크 운용에 고성능 GPU가 필수적일 것이라고 보고 AODT를 출시하는 등 시장에 참여하는 움직임을 보이고 있다. 이처럼 GPU는 이미 필수 요소가 되었기 때문에, 비용 측면에서 해결해야 할 과제는 전력 소모이다. 후속 연구를 통해 DT-RAN의 도입으로 생길 추가적인 전력 소모와 네트워크 최적화를 통해 얻는 이득을 비교할 필요성이 있다.

지연시간 문제의 경우, 데이터를 실시간으로 계속해서 받아오는 방식보다는 임계치 이상의 변화 시에만 데이터를 수신하는 이벤트 기반 방식이 더 효율적일 것으로 보인다. 혹은 nGRG에서 제안하는 DT-RAN의 구조와 다르게 RIC까지 복제하지 않고 데이터를 받는 구조로 가는 방법도 논의되고 있다 [6],[7]. 하지만 이 방식은 RIC이 DT-RAN에 구현되어 있지 않기 때문에 DT-RAN Use Case D에서 언급한 xApp/rApp 테스트의 지연시간이 늘어나게 될 것이며, 자체적인 AI/ML 시뮬레이션이 불가능해진다는 한계를 지니고 있다.

III. 결론

본 논문에서는 DT-RAN의 개념, 구조, 구현절차, 그리고 다양한 적용 사례에 대해 종합적으로 다루었다. O-RAN의 개방성과 지능형 제어 기능을 기반으로, DT-RAN은 실제 물리 RAN을 가상으로 정밀하게 재현함으로써 새로운 제어 정책이나 AI/ML 모델을 사전 검증하고 최적화할 수 있는 환경을 제공한다. 이를 통해 기존 RAN 운영의 불확실성과 리스크를 줄이고, 효율적인 네트워크 계획 및 자동화를 가능하게 한다.

DT-RAN은 네트워크 예측·에너지 절감·xApp/rApp 테스트 등에서 유망하지만 아직 개념 단계이며, 고성능 자원 요구, 높은 전력 소비, 실시간 동기화 난제 등을 해결해야 한다. 이에 따라 향후에는 경량화된 시뮬레이션 기술, 이벤트 기반 데이터 수집 기법, 모듈 단위의 트윈 생성 등 실용적인 구현 방안에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2021-II212046, 50%)과 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00397520, 5G 버티컬 서비스를 위한 가상화 기반 경량형 5G 올인원 시스템 개발, 50%)

참 고 문 헌

- [1] S. Niknam, A. Roy, H. S. Dhillon, S. Singh, R. Banerji, J. H. Reed, N. Saxena, and S. Yoon, "Intelligent O-RAN for Beyond 5G and 6G Wireless Networks," IEEE Communications Magazine, 2020.
- [2] A. Aijaz, "Private 5G: The Future of Industrial Wireless," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 14, no. 2, pp. 4 - 18, Jun. 2020
- [3] O-RAN next Generation Research Group (nGRG), Digital Twin RAN: Key enablers, O-RAN nGRG Contributed Research Report, RR-2024-09, Oct. 2024.
- [4] ITU-R, Report ITU-R M.2516-0 : Future Technology Trends of Terrestrial IMT systems Towards 2030 and Beyond, International Telecommunication Union, Nov. 2022
- [5] Y. Deshpande, E. Sulkaj, and W. Kellerer, "TwinRAN: Twinning the 5G RAN in Azure Cloud," in Proc. IEEE, Jan. 2025.
- [6] H. X. Nguyen, K. Sun, D. To, Q.-T. Vien, and T. A. Le, "Digital Twin for O-RAN Towards 6G," IEEE Communications Magazine, Oct. 2024.
- [7] T. Iye et al., "Open Wireless Digital Twin: End-to-End 5G Mobility Emulation in O-RAN Framework," IEEE Open Journal of Vehicular Technology, vol. 5, June 2024,
- [8] C. Tunc, K. Duran, B. Bilgin, G. Kalem, and B. Canberk, "DTRAN: A Special Use Case of RAN Optimization using Digital Twin," in Proc. EuCNC & 6G Summit, IEEE, 2024.