Y-Twin, 3D RT 및 시나리오 자동화 플랫폼

김건하, 박정훈
연세대학교

drawnemo@yonsei.ac.kr, jhpark@yonsei.ac.kr

Y-Twin: 3D Ray-Tracing and Scenario Automation Platform

Geonha Kim, Jeonghun Park
Yonsei Univ.

요 약

본 논문에서는 기존 Twin Simulator 들이 PHY 레벨 MU-MIMO 지원 및 이동성·트래픽 시나리오 자동화 기능에서 갖는 한계를 극복하기 위해 Y-Twin 을 제안한다. Y-Twin 은 3 차원 지도를 기반으로 다수의 UE 를 자동 생성하여 채널을 구성하고, 채널의 기반이 되는 Ray data set 생성(Ray Generation), 이동성(Mobility), 트래픽(Traffic) 모듈을 통합하여 핸드오버, 스케줄링 등 상위 계층 알고리즘 실험에 필요한 데이터를 제공하는 종합 테스트베드를 구현한다. 제안 시스템은 NVIDIA 의 sionna RT 시뮬레이터를 확장하여 다중 GPU 병렬 연산을 활용한 빠른 RT 데이터 생산과 API 방식의 유연한 시나리오 제어 기능을 제공하며, 이를 통해 실제 네트워크 테스트베드로의 확장 가능성을 내포한다.

Ⅰ. 서 론

무선 통신 시스템의 성능 최적화를 위해서는 실제 환경에 근접한 채널 모델링과 시뮬레이션이 필수적이다. 기존에 존재하던 Twin Simulator 로는 통상적으로 많이 사용되는 상용 Ray-Tracing 시뮬레이터인 Wireless Insite, 독자적인 RT 알고리즘을 구현한 연구용 시뮬레이터 WithRay[1], 시나리오 기반의 3GPP 표준 채널 모델 데이터셋 생성기인 DeepMIMO[2], 그리고 NVIDIA 에서 오픈소스로 공개하여 Ray-Tracing 을 포함한 링크·시스템 레벨 시뮬레이션을 제공하는 Sionna[3] 등이 있다. Sionna 는 NS-3[4] 와 OpenAirInterface(OAI) [5] 등 상위 레벨 시뮬레이터와 연계한 Stack-up 연구도 활발히 진행되고 있다.

그러나 현존하는 RT 시뮬레이터 중 PHY 레벨에서 MU-MIMO 를 정밀하게 지원하는 경우는 드물다. 또한, 이들 시뮬레이터는 대규모 연산을 위한 다중 GPU 병렬 처리를 충분히 지원하지 않아, 복잡한 시나리오에서의 실험 수행이 제한적이다. 이에 본 논문에서는 Y-Twin 을 제안한다. Y-Twin 은 3D 지도를 기반으로 자동으로 다수의 UE 를 생성하여 MU-MIMO 채널을 구성하고, 상위 계층 알고리즘(핸드오버, 스케줄링 등) 실험을 위한 데이터까지 제공하는 종합 테스트베드를 목표로 한다.

Ⅱ.Ⅰ Sionna 기반 확장

Y-Twin 은 최근 정식 출시된 sionna RT 시뮬레이터를 기반으로 한다. 기존 모듈을 활용하여 3D 맵 상에서 BS 와 UE 의 위치가 지정된 채널을 생성할 수 있다. 다만, 원래 버전은 연속적인 사용자 이동성 결정 모듈이 없고, UE 정보 생성 모듈이 부재하며, SU-MIMO 만 지원한다. 본 연구에서는 맵 임포트 방식을 변경하지 않고, 3D 맵으로부터 UE 위치 좌표를 자동 수집·갱신하는 모듈을 개발하였다.

Ⅱ.Ⅱ Data Ray Generation

sionna 는 OSM(OpenStreetMap)으로부터 가져온 3D 맵을 Blender 편집기로 XML 형식으로 내보내며, 길 객체의 물성 정보를 통해 길의 용도를 식별할 수 있다. Y-Twin 의 Path Generator 모듈은 이러한 Mesh 정보를 활용하여 UE 가 이동 가능한 모든 좌표를 추출(그림 1)하고, 다중 GPU 병렬 연산으로 빠르게 RT 데이터를 생성(그림 2)한다. 이를 통해 다양한 모델의 학습용 데이터 생성이 가능하다.

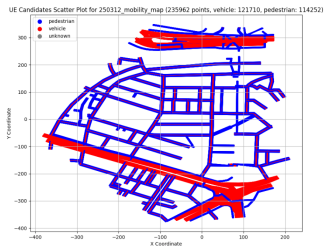

그림 1. 신촌역 앞 거리 지도에서 추출한 모든 UE 위치 후보군

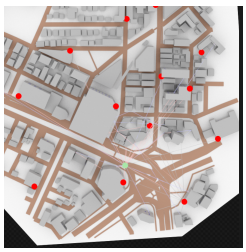

그림 2. 한 위치에서 생성된 path data

Ⅱ. Ⅲ Mobility & Traffic Scenario

맵 상의 이동 가능 좌표를 바탕으로 UE 의 생성·소멸 시나리오를 구현한다. Y-Twin 의 User Scenario Generator 는 API 서버 형태로 동작하여, 외부 요청 시 특정 시점 이후의 UE 상태(위치, 속도, 방향, 목적지 등)를 응답한다. 초기화된 UE 에 대해 Traffic 모듈은

트래픽 볼륨, 큐 길이, HOL 지연, BSR 등의 정보를 지속 생성한다. 요청이 누적되면 Mobility 가 업데이트되고, 트래픽 업데이트 후 UE 가 Idle 상태가 되면 UE 를 소멸시켜 단일 UE 를 관리한다. Pedestrian, Car 특성에 따른 다양한 UE 를 생성·관리하여, 향후 네트워크 스택 확장 시 정교한 시스템 시뮬레이터 구현이 가능하다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 다중 GPU 병렬 연산을 활용한 빠른 RT 데이터 생성, API 기반의 유연한 이동성·트래픽 시나리오 제어 기능을 통합한 Sionna 기반 테스트베드를 제안하였다.

향후 계획으로는 우선, Y-Twin 이 생성하는 3D 지형 기반 채널 데이터로부터 채널의 장기간 특성(long-term characteristic)을 학습하고 이를 활용해 CSI 획득 과정을 보완하는 연구를 수행하고자 한다. 학습된 채널 특성을 활용하여 CSI 예측 정확도를 높이고, Precoder 설계 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 계획이다.

또한, Y-Twin 테스트베드를 활용하여 [6], [7] 등에서 제안된 CSI 피드백 방식의 실제 성능을 측정할 것이다. 이를 통해 피드백 오버헤드, Throughput 및 지연 특성 등을 실험적으로 분석하고, 테스트베드 관점에서의 실용적 설계 가이드를 제시한다.

마지막으로, Y-Twin 의 위치정보 활용 특성을 살려 통신-센싱 융합 기반 기술[8] 들을 검증할 예정이다. UE 위치를 적극적으로 이용한 Beamforming, 핸드오버 최적화 및 센싱 보강 기능을 구현하여, 통신과 센싱이 결합된 디지털 트윈 플랫폼으로서의 실용성을 입증할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00395824, (총괄 1-세부 2) Upper-mid Band 를 지원하는 Cloud vurtulized RAN (vRAN) 시스템 기술 개발).

참 고 문 헌

[1] A. Alkhateeb, “DeepMIMO: A Generic Deep Learning Dataset for Millimeter Wave and Massive MIMO Applications,” in Proc. of The Information Theory and Applications Workshop (ITA), San Diego, CA, Feb. 2019.

[2] H. Choi, J. Oh, J. Chung, G. C. Alexandropoulos and J. Choi, "WiThRay: A Versatile Ray-Tracing Simulator for Smart Wireless Environments," in IEEE Access, vol. 11, pp. 56822-56845, 2023

[3] J. Hoydis, S. Cammerer, F. Aoudia, A. Vem, N. Binder, G. Marcus, and A. Keller, “Sionna: An Open-Source Library for Next-Generation Physical Layer Research,” arXiv, Mar. 2022, arXiv:2203.11854

[4] R. Pegurri, F. Linsalata, E. Moro, J. Hoydis, and U. Spagnolini, “Toward Digital Network Twins: Integrating Sionna RT in ns-3 for 6G Multi-RAT Networks Simulations,” arXiv, Jan. 2024, arXiv:2501.00372

[5] T. Iye, M. Sakamoto, S. Takaya, E. Sato, Y. Susukida, Y. Nagaoka, K. Maruta, and J. Nakazato, “Open Wireless Digital Twin: End-to-End 5G Mobility Emulation in O-RAN Framework,” arXiv, Mar. 2025, arXiv:2503.12177.

[6] N. Kim, I. P. Roberts and J. Park, "Splitting Messages in the Dark-Rate-Splitting Multiple Access for FDD Massive MIMO Without CSI Feedback," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 24, no. 4, pp. 3320-3332, April 2025

[7] J. Kim, J. Choi, J. Park, A. Alkhateeb and N. Lee, "FDD Massive MIMO: How to Optimally Combine UL Pilot and Limited DL CSI Feedback?," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 24, no. 2, pp. 926-939, Feb. 2025

[8] J. Choi, J. Park, N. Lee and A. Alkhateeb, "Joint and Robust Beamforming Framework for Integrated Sensing and Communication Systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 11, pp. 17602-17618, Nov.

[9] E. Choi, S. Park, J. Choi, J. Park and N. Lee, “Beamforming Optimization for Integrated Sensing and Communication Systems with SCNR Consideration,” in Proc. 22nd Int. Symp. Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), Seoul, Korea, 2024, pp. 146- 153.