

입자 기반 물리모델의 신경망 모사 기법과 디지털 트윈 기반 차세대 통신 네트워크 시뮬레이터

오승현, 이욱진, 송영진, 이정범, 김건, 이상현*
고려대학교

{seunghyunoh, mekdugi, thd4090, felix9698, imgunkim99, *sanghyunlee}@korea.ac.kr

Neural Approximation of Particle-Based Physical Models and Digital Twin-Based Simulator for Next-Generation Wireless Networks

Seung Hyun Oh, Sang Hyun Lee*
Korea Univ

요약

6G 무선 네트워크의 효율적 운용을 위해 실제 도시 환경을 반영한 디지털 트윈 기반 시뮬레이터를 구축하였다. 시스템은 서울 도심의 3 차원 건물 및 도로 지형을 Unity 엔진으로 모델링하고, NVIDIA Sionna 채널 모델을 적용하여 현실적인 전파 특성을 구현하였다. 시뮬레이터 내에서 기지국과 사용자 단말 간의 할당 문제는 입자 간 상호작용 기반의 물리모델로 나타내고, 이를 신경망으로 근사한 Physics-Inspired AI Solver 를 설계하였다. 제안된 환경은 실시간으로 변화하는 도시 상황에서 통신 성능을 검증할 수 있는 실험 기반을 제공하며, 차세대 6G 네트워크의 연관 알고리즘 연구를 위한 검증 플랫폼으로 활용될 수 있다.

I. 서 론

6 세대 이동통신(6G) 네트워크는 초고속, 초저지연, 초연결 서비스를 지원하기 위해 다수의 기지국, 사용자 단말, 빔 등 다양한 통신 요소가 상호작용하는 복잡한 환경을 형성한다 [1]. 이러한 환경에서 사용자와 기지국 간의 할당을 실시간으로 결정하는 것은 네트워크의 안정성과 전체 서비스 품질을 유지하기 위한 핵심 과제이다. 기존의 최적화 기반 기법은 연산 복잡도가 높아 실시간 적용이 어렵고, 신경망 기반 접근법은 제약 조건을 단순화하여 처리하기 때문에 물리적 제약을 정확하게 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 물리 법칙에 기반한 neural-solver 를 적용하였다. 제안한 방법은 기지국과 사용자 매칭 문제를 입자 간 상호작용 시스템으로 해석하고, 신경망으로 근사하여 제약 조건을 자연스럽게 내재화하였다. 또한 Unity 기반의 디지털 트윈 환경과 NVIDIA Sionna 전파 모델을 통합하여 현실적인 전파 특성을 구현한 6 세대 시뮬레이터를 구축하였다. 이를 통해 실제 도심 환경에서

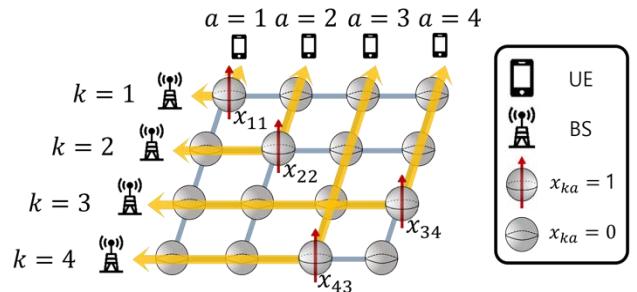


그림 1. 기지국과 사용자 단말 간의 매칭 문제를 입자 간 상호작용 시스템으로 재구성한 물리기반 모델.

통신 알고리즘 성능을 정밀하게 평가할 수 있다 [2], [3].

II. 본론

6 세대 이동통신 환경에서는 기지국과 사용자 단말 간의 자원 할당이 네트워크 효율을 좌우하는 중요한 요소이다. 할당 문제 자체는 전통적인 최적화 기법으로도 해결 가능하지만, 실시간 환경에서는 계산 지연과 물리적 제약 반영의 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 제약을 완화하기 위해 물리적 상호작용 개념을 기반으로 한

신경망 해석기(Physical-Inspired Neural Solver, PINS)를 적용하였다.

$$\mathbf{P1} : \max_{\mathbf{x}} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^N w_{ka} x_{ka},$$

$$\text{subject to } \sum_{a=1}^N x_{ka} \leq 1, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (1a)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ka} = 1, \quad \forall a \in \mathcal{N}, \quad (1b)$$

시스템은 k 개의 기지국과 n 개의 사용자 단말로 구성되며, 각 링크 (k, a) 의 전송률을 w_{ka} 로 정의할 때, 목표는 전체 네트워크의 합 전송률을 최대화한다. 그럼 1은 물리적 입자 물리 기반 할당 구조를 시각적으로 나타낸 값이며 이를 도식화하면 (2)번 식과 같다.

$$\rho_{ka}^{(t+1)} = f(\alpha_{ka}^{(t)}, \mathbf{W}), \quad \alpha_{ka}^{(t+1)} = g(\rho_{ka}^{(t)}, \mathbf{W}), \quad (2)$$

이 반복 과정이 수렴하면 시스템은 안정 상태에 도달하며, 결과적으로 물리적으로 일관된 자원 할당 구조가 형성된다. 그러나 이러한 물리 모델은 반복 계산 과정이 많아 실시간 환경에서는 계산 지연이 발생하는 한계가 있다. PINS는 이러한 물리 시스템의 반복 계산 과정을 신경망으로 근사하여, 단 한 번의 추론으로 수렴된 상태를 예측한다. 학습은 비지도 방식으로 수행되며, $\mathcal{L} = \|\rho - f(\alpha, \mathbf{W})\|_F^2 + \|\alpha - g(\rho, \mathbf{W})\|_F^2$ 손실함수를 최소화하여 안정적인 근사 결과를 얻는다.

III. 시뮬레이션 및 결과

제안된 PINS의 성능을 검증하기 위해 Unity 기반의 3 차원 디지털 트윈 환경을 구축하였다. 서울 도심 지역의 실제 건물 데이터를 활용하여, 건물과 도로, 지형을 정밀하게 모델링하고 NVIDIA의 Sionna를 통해 ray-tracing 모델을 활용하여 Signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) 히트맵을 구성하였다. 시뮬레이션에서는 7 개의 기지국과 3,5,7 명의 사용자를 배치하여 보행자 이동성이 존재하는 6G 시뮬레이터를 개발하였다. 그림 2는 Graphical user interface (GUI)로, 첫번째 화면에서는 각 사용자들은 보행 경로를 따라 이동한다. 두 번째 화면은 Sionna를 통한 SINR 히트맵으로 가중치를 계산한다. 계산된 히트맵을 통해 각 사용자들은 기지국에 할당되게 되며 그 결과, 제안된 PINS는 최적 알고리즘 대비 약 93% 이상의 성능을 유지하면서도,

반복 계산 없이 단일 추론만으로 결과를 도출하였다. 이는 기존의 반복형 최적화 방식 대비 약 10 배 이상의 계산 효율 향상을 보였으며 또한 디지털 트윈 시뮬레이터는 사용자 이동에 따른 전파 변화를 적용하여 6G 네트워크 환경에서의 알고리즘 평가에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

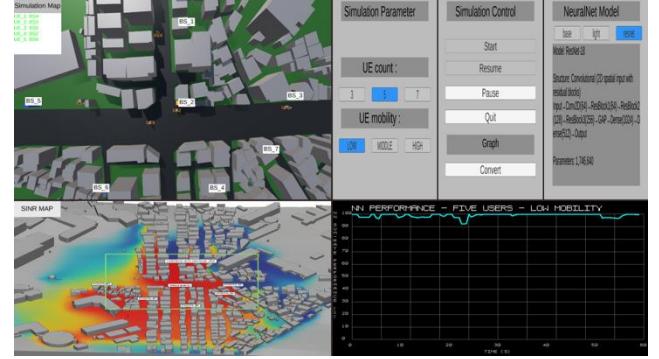


그림 2. PINS 서울시 디지털 트윈 모델 GUI

용될 수 있음을 확인하였다.

IV. 결론

본논문에서는 Unity 와 NVIDIA Sionna 를 통합한 고정밀 디지털 트윈 시뮬레이터를 구축하여 제안된 PINS 의 성능을 검증하였다. 본 시뮬레이터는 사용자 연관 문제의 실험 환경을 제공할 뿐 아니라, 현실적인 3 차원 도시 모델링, 정밀한 전파 추적 기반 채널 시뮬레이션, 그리고 조정 가능한 사용자 이동 기능을 포함한다. 이를 통해 동적 조건에서의 종합적인 성능 평가가 가능하다. 제안된 연구는 디지털 트윈 기반 시뮬레이션 플랫폼이 향후 6 세대 이동통신 환경에서 실시간 알고리즘 설계와 성능 분석을 위한 실질적 도구로 활용될 수 있음을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No.2021-0-00467, 지능형 6G 무선 액세스 시스템, No. 2021-0-00260, 저궤도 군집 소형 위성 간 통신 기술 개발)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] C.-X. Wang et al., "On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies, and testbeds," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 25, no. 2, pp. 905– 974, 2nd Quart. 2023.
- [2] H. Lee et al., "Machine learning-aided cooperative localization under a dense urban environment: Demonstrates universal feasibility," IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 19, no. 3, pp. 78– 89, Sep. 2024.
- [3] J. Hoydis et al., "Sionna: An open-source library for next-generation physical layer research," arXiv preprint arXiv:2203.11854, 2022.