

디지털 트윈을 활용한 저궤도 위성 통신의 연구 동향 조사

이민지, 고영채
고려대학교

<ddi06048, koyc>@korea.ac.kr

A Study on the Digital Twin for Low Earth Orbit Satellite Communication

Min-ji Lee, Young-chai Ko,
Korea Univ.

요 약

디지털 트윈은 물리적 트윈과 동기화되어 현실의 시스템을 정교하게 나타내는 것을 목표로 한다. 본 논문은 디지털 트윈을 저궤도 위성 통신에 활용한 연구 사례를 조사하고 기존의 시뮬레이션과 구분되는 디지털 트윈의 특징을 분석한다.

I. 서 론

6 세대(6G) 이동통신은 유비쿼터스 커버리지를 지향하며 저궤도 위성 통신은 낮은 지연 시간과 넓은 커버리지로 6G 이동 통신의 핵심으로 떠오르고 있다. 저궤도 위성 통신은 기존의 지상 기반 통신에 비해 복잡도가 높으며 더 정교한 모니터링 및 유지 기술을 필요로 한다. 이를 위한 방안으로 디지털 트윈이 떠오르고 있다. [1] 디지털 트윈은 실제 시스템의 가상환경에서 복제본으로 이때 현실 환경에서의 시스템을 물리적 트윈이라고 한다. 디지털 트윈은 물리적 트윈과 디지털 트윈 사이의 양방향 연결을 통해 현실의 시스템에 보다 가깝게 묘사하고자 한다. 물리적 트윈에서 디지털 트윈 방향으로 데이터가 실시간으로 업데이트되고 디지털 트윈에서 물리적 트윈 방향으로 물리적 트윈의 예측, 분석, 최적화가 이루어진다. [2]

본 논문에서는 디지털 트윈을 이용한 저궤도 위성 통신의 연구 사례와 특징을 분석한다.

II. 본론

저궤도 위성 통신에서는 네트워크 토폴로지의 동적 특성으로 기존의 지상 네트워크보다 효율적인 라우팅 전략이 필요하다. [3]은 라우팅 과정에서 디지털 트윈을 활용하여 기존의 정적인 라우팅 전략보다 낮은 지연시간을 보인다. 이때 디지털 트윈은 실제 위성 네트워크의 복제본으로 실시간으로 얻은 출발지 및 도착지에 대한 정보를 바탕으로 최적의 경로를 결정하여 이를 물리적 위성 네트워크 방향으로 전송한다.

전력 계통은 전통적으로 유선 광 통신을 사용하는데 이때 케이블이 지하에 위치하고 있어 열게 될 경우 전력 계통에 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 [4]은 전력 계통에서 유선 광 네트워크의 백업으로 저궤도 위성 통신을 이용할 때 디지털 트윈을 통해 전력 계통을 모니터링하고자 한다. 이때 디지털 트윈은 위성의 궤적을 시뮬레이션 하는 모듈, 위성파 기지국 간 네트워크의 역할을 하는 모듈, 전력 계통 역할을 하는 모듈로 이루어진다. 디지털 트윈은 보다 실제에 가깝게 묘사하고자 하여 전통적인 시뮬레이션에 비해 복잡하며 더 많은 기능을 필요로 한다. 모듈화를 통해 쉽게 새로운 기능을 추가하고 제거할 수 있다. 또한 엔터티-컴포넌트-시스템 구조를 활용하여 물리적 트윈과 디지털 트윈 사이의 데이터 흐름이 중심이 되도록 설계하였다.

디지털 트윈은 모듈화된 디자인, 유연성, 확장성 등을 필요로 한다. 이를 위해 [5]는 보다 디지털 트윈에 적합한 위성 통신 시뮬레이션 플랫폼 Plotinus 을 구축하였다. Plotinus 는 플러그 인 구조를 활용하여 물리 계층, 토폴로지 및 경로 계산, 시각화의 기능들이 독립적으로 실행되도록 설계되었다. 또한 실시간으로 위성의 궤적과 지상 네트워크 정보를 입력 받아

모니터링할 수 있어 기존의 고정된 토폴로지를 이용하는 플랫폼에 비해 디지털 트윈에 적합하다.

중앙의 서버가 아닌 로컬 장치에서 데이터를 처리하는 에지 컴퓨팅에서 저궤도 위성을 활용하면 지상의 에지 서버에 지나치게 많은 작업이 할당되었을 때 위성으로 분산하여 보다 빠른 통신이 가능하다. 이때 지상의 에지와 위성 에지 사이의 작업을 어떻게 할당하느냐가 문제가 된다. [6]는 이를 위해 디지털 트윈을 활용한다. 디지털 트윈은 별도로 구축한 클라우드 센터에서 이루어지며 위성의 네트워크 정보를 수집하고 이를 바탕으로 지상의 에지와 위성, 그리고 이와 인접한 위성 사이의 오프로딩 및 리소스 공유를 최적화한다. 디지털 트윈과 물리적 트윈 사이의 연결은 위성 간 통신 링크를 통해 이루어진다.

III. 결론

본 논문은 저궤도 위성 통신에 디지털 트윈을 적용하는 연구에 대한 동향을 분석하였다. 저궤도 위성 통신에서 디지털 트윈 연구는 라우팅, 전력 계통, 리소스 공유 최적화 등의 다양한 분야에서 이루어지고 있으며 이를 위한 플랫폼에 관한 연구 역시 이루어지고 있다. 디지털 트윈은 현실의 시스템을 가능한 유사하게 묘사하고자 하여 각 기능들은 모듈화되고 높은 확장성을 필요로 한다. 또한 디지털 트윈과 물리적 트윈의 동기화가 이루어지기 위해 데이터가 중심이 되도록 설계하여야 한다. 저궤도 위성 통신에서의 디지털 트윈 역시 그러한 특징을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00428780, 6G·클라우드 리더십구축을 위한 교육 연구 오픈 허브).

참 고 문 헌

- [1] Y. Zhou, R. Zhang, J. Liu, T. Huang, Q. Tang and F. R. Yu, "A Hierarchical Digital Twin Network for Satellite Communication Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 11, pp. 104-110, November 2023
- [2] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, "Characterising the Digital Twin: A systematic literature review," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 29, pp. 36-52, May 2020.

- [3] L. Zhao, C. Wang, K. Zhao, D. Tarchi, S. Wan and N. Kumar, "INTERLINK: A Digital Twin-Assisted Storage Strategy for Satellite-Terrestrial Networks," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 5, pp. 3746-3759, Oct. 2022
- [4] T. Cheng, T. Duan and V. Dinavahi, "Real-Time Cyber-Physical Digital Twin for Low Earth Orbit Satellite Constellation Network Enhanced Wide-Area Power Grid," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 5, pp. 1029-1041, 2024
- [5] Y. Gao et al., "Plotinus: A Satellite Internet Digital Twin System," *IEEE Journal of Communications and Information Networks*, vol. 9, no. 1, pp. 24-33, March 2024
- [6] Z. Ji, S. Wu and C. Jiang, "Cooperative Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Computation Offloading in Digital Twin Satellite Edge Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 11, pp. 3414-3429, Nov. 2023