

위성 네트워크 환경에서 서비스 신뢰성 향상을 위한 VPTR 기술 연구 동향

윤다빈, 윤지승, 김수형, 김동현, 조성현*

한양대학교, *한양대학교 에리카

ekqls09@hanyang.ac.kr, yjs1104@hanyang.ac.kr,

dreammusic23@hanyang.ac.kr, kdh2637@hanyang.ac.kr, *chopro@hanyang.ac.kr

A Study on VPTR Research Trends for Enhancing Service Reliability in Satellite Networks

Yun Da Been, Youn Ji Seung, Kim Soo Hyeong, Kim Dong Hyun, Cho Sung Hyun*

Hanyang Univ., *Hanyang Univ. ERICA.

요약

위성 네트워크 환경에서 서비스 신뢰성 보장을 만족하기 위해, 네트워크 내 VNF의 수행 위치와 트래픽 전달 경로를 공동으로 결정하는 VNF Placement and Traffic Routing(VPTR) 기법이 활용된다. 저궤도 위성망에서는 위성 이동성과 제한된 자원으로 인해 지연 증가와 서비스 실패가 발생할 수 있으므로, 지연 시간 최소화과 서비스 실패를 최소화를 목표로 한 VPTR 기법들이 연구되었다. 본 논문은 VPTR 연구들을 다양한 고려 요소에 따라 비교함으로써, 위성 네트워크 환경에서의 최신 연구 동향을 정리한다.

I. 서론

VNF Placement and Traffic Routing(VPTR)은 네트워크 내 가상 네트워크 기능(Virtual Network Function, VNF)의 수행 위치와 트래픽 전달 경로를 공동으로 결정하는 문제이다. VPTR의 통합적 결정은 VNF 처리 지연과 전송 지연에 직접적인 영향을 미치며, 서비스 성능을 좌우하는 핵심 요소로 작용한다. 이로 인해 VPTR은 초저지연과 초연결을 요구하는 6G 네트워크, 특히 대규모 저궤도 위성망 환경에서 중요한 핵심 제어 기술로 주목받고 있다.

하지만 위성망 환경에서는 빠르게 변화하는 네트워크 토폴로지와 제한된 자원으로 인해, 서비스 지연 증가뿐만 아니라 서비스 실패가 발생할 수 있으며, 이는 서비스의 신뢰성을 저해하는 요인으로 작용한다. 이에 따라 최신 VPTR 연구들은 안정적인 서비스 제공을 위해 중단 간 지연 시간 최소화와 서비스 실패를 최소화를 주요 최적화 목표로 한다. 이러한 연구들은 동적 네트워크 환경을 고려하는 방식과 서비스 처리 전략, 트래픽 변동성 반영 여부에 따라 서로 다른 VPTR 접근법을 제시해 왔다.

본 논문에서는 VPTR 연구들을 지연 시간 최소화와 서비스 실패를 최소화라는 두 가지 관점에서 분류하여 소개한다. 또한, 각 연구들을 동적 네트워크 환경을 고려하는 방식, 서비스 처리 전략, 트래픽 변동성 반영 여부 관점에서 분석하여 향후 VPTR 연구가 풀어야 할 방향성을 제시한다.

II. 본론

II.1. 지연 시간 최소화

지연 시간 최소화를 목표로 하는 VPTR 연구들은 서비스 요청이 네트워크를 통과하는 과정에서 발생하는 전송 및 처리 지연을 줄이는 데 초점을 둔다. 대규모 위성 네트워크 환경에서는 네트워크 상태와 서비스 수요가 시간에 따라 변화하므로 중단 간 지연 시간 또한 동적으로 영향을 받을

수 있다.

[1]은 위성 네트워크에서 사용자 단말로부터 특정 네트워크 기능들의 순차적 처리를 요구하는 서비스 요청이 발생할 때마다, 해당 시점의 네트워크 상태를 기준으로 요청에 필요한 서비스 기능 체인(Service Function Chain, SFC)을 즉시 계획하는 온라인 VPTR 기법을 제안한다. 제안 기법은 요청의 출발지와 목적지 인근으로 탐색 범위를 제한한 뒤, 해당 영역 내에서 전송 지연과 처리 지연을 함께 고려하여 VNF 배치 노드와 전달 경로를 동시에 선택한다. 이러한 방식은 불필요하게 긴 경로나 과도한 중간 처리를 회피할 수 있도록 하여, 각 요청의 중단 간 지연을 감소시킨다. 하지만, 네트워크 토폴로지가 시간에 따라 변화하는 동적 위성 환경은 고려하지 않기 때문에, 위성 이동으로 인한 연결 상태 변화가 발생하는 경우에는 지연 성능이 저하될 수 있다는 한계를 가진다.

이러한 정적 위성 환경의 한계를 보완하기 위해, [2]는 시간에 따라 변화하는 위성 네트워크 환경에서 VNF 배치와 라우팅을 공동으로 최적화하기 위한 수리적 최적화 기반 VPTR 기법을 제안한다. 제안 기법은 위성 이동으로 인한 링크 생성과 단절이 서비스 성능에 미치는 영향을 반영하기 위해, 네트워크를 여러 시간 구간으로 확장한 그래프 모델을 사용한다. 각 시간 구간에서의 연결 가능성과 자원 제약을 기반으로, 주어진 서비스 요청에 대한 VNF 배치와 전달 경로를 하나의 통합 최적화 문제로 구성하여 지연을 최소화하는 해를 도출한다. 이러한 시간 확장 기반 모델링을 통해 경로 단절 가능성을 사전에 반영할 수 있어, 동적 위성 환경에서도 안정적인 지연 성능을 확보할 수 있다.

II.2. 서비스 실패율 최소화

서비스 실패율 최소화를 목표로 하는 VPTR 연구들은 서비스 요청이 네트워크 내에서 처리되지 못하고 실패하는 상황을 줄이는 데 초점을 둔

표 1. VPTR 연구 비교

목적	문헌	고려 요소		
		동적 환경 고려	서비스 처리 방식	트래픽 분포
지연 시간 최소화	[1]	X	온라인	X
	[2]	O	오프라인	X
서비스 실패율 최소화	[3]	O	오프라인	X
	[4]	O	온라인	X
	[5]	O	온라인	O

다. LEO 위성망 환경에서는 위성 이동과 자원 제약으로 인해 특정 위성에서의 서비스 수용 가능성이 시간과 위치에 따라 달라질 수 있다.

[3]은 LEO 위성의 고속 이동으로 인해 네트워크 토폴로지가 지속적으로 변화하는 환경에서, 서비스를 안정적으로 유지하기 위한 제어 구조를 제안한다. 제안 기법의 핵심은 인접한 위성들을 논리적 서비스 영역으로 클러스터링하여, 개별 위성이 이동하더라도 해당 영역 내에서 VNF 가용성이 지속되도록 설계하는 것이다. 이를 통해 위성 단위의 잦은 위치 변화나 VNF 재배포를 직접 추적할 필요가 없으며, 결과적으로 빈번한 라우팅 재계산이나 VNF 재배포로 인한 서비스 중단 가능성이 감소한다. 하지만 일정 시점에 주어진 서비스 요구와 네트워크 상태를 기반으로 미리 결정된 구조를 적용하는 오프라인 방식을 채택함에 따라, 시간에 따라 동적으로 변화하거나 예측되지 않은 트래픽 변동이 발생하는 경우 이를 즉각적으로 반영하기 어렵다.

이러한 오프라인 처리 방식의 한계를 극복하기 위해, [4]는 동적으로 변화하는 위성 네트워크 환경에서 분산적인 의사결정을 가능하게 하는 온라인 VPTR 기법을 제안한다. 제안 기법은 각 위성을 개별 에이전트로 모델링한 다중 에이전트 심층 강화학습 구조를 적용하여, 위성 이동이나 링크 상태 변화에 따라 분산적으로 배치 결정을 수행하도록 설계된다. 이러한 온라인 학습 기반 의사결정은 특정 위성이나 링크에 부하가 집중되는 상황을 완화하여, 자원 부족으로 인해 서비스 요청이 수용되지 못하는 경우를 줄이는 데 기여한다. 다만, 서비스 요청의 발생 주기가 지역별 트래픽 집중과 같은 변동성은 명시적으로 모델링되지 않으며, 각 요청은 발생 시점에 주어진 입력으로만 처리된다는 한계를 가진다.

[5]는 트래픽 변동성을 반영하기 위해, 서비스 요청 수의 증가와 감소로 인해 발생하는 자원 경쟁 상황을 핵심 문제로 설정한 딥러닝 기반 VPTR 기법을 제안한다. 제안 기법은 시간 슬롯마다 도착하는 서비스 요청 집합과 현재 네트워크 자원 상태를 입력으로 받아, 각 요청을 수락할지 여부와 함께 VPTR 결정을 순차적 의사결정 형태로 수행한다. 이를 통해 트래픽이 증가해 자원이 포화되는 상황에서도, 비용 대비 효율적인 요청만 선별적으로 수락함으로써 서비스 수락률을 유지하면서 전체 자원 사용 비용을 절감한다.

III. 최신 연구 비교 분석 및 향후 연구 방향 제시

표 1은 최신 VPTR 관련 연구들을 최적화 목표, 동적 네트워크 환경 고려 여부, 서비스 요청 처리 전략, 그리고 트래픽 변동성 반영 여부의 관점에 대한 내용을 정리한 표이다. 대부분의 VPTR 연구는 트래픽을 각 시점의 수요량처럼 크기만 변하는 입력으로 취급하며, 해당 수요가 어떤 위치에서 어떤 시간 패턴으로 집중되어 발생하는지와 같은 시공간적 발생 구조는 의사결정 변수로 포함하지 않는다. 서비스 요청을 예측하기 어려운 실제 위성망 환경에서는, 트래픽의 시공간적 집중으로 인해 링크 혼잡과 VNF 자원 고갈이 동시에 발생할 수 있으며, 이는 지연 시간 증가와 서비

스 실패로 직결된다. 따라서 이러한 시공간적 트래픽 발생 특성을 반영한 VPTR 의사결정 기법에 대한 추가 연구가 필요하다.

IV. 결론

본 논문에서는 VPTR 최신 연구 동향을 소개하고, 지연 시간 최소화와 서비스 실패율 최소화라는 두 가지 최적화 목표를 기준으로 기존 연구들을 분석하였다. 또한 각 연구를 동적 네트워크 환경 고려 방식, 서비스 요청 처리 전략 그리고 트래픽 변동성 반영 여부를 중심으로 비교함으로써, 현재 VPTR 접근법들의 설계 특성을 정리하였다. 이러한 분석을 통해 기존 연구들이 서비스 트래픽 발생의 시공간적 변동성을 의사결정 과정에 충분히 반영하지 못하고 있음을 확인하고, 향후 시공간적으로 다양한 트래픽 분포를 고려한 실시간 VPTR 의사결정 기법에 대한 연구 방향성을 제시한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원에서 시행한 한국전자통신연구원의 3GPP 표준기반 저궤도 군집 위성통신 지상국 핵심기술 개발(과제번호 RS-2024-00359235)의 위탁연구개발과제 논문이며, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2024-00335012)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Kim, J. Park, J. Youn, S. Ahn and S. Cho, "Online Service Function Chain Planning for Satellite - Ground Integrated Networks to Minimize End-to-End (E2E) Delay," *Sensors*, vol. 24, no. 22, p. 7286, 2024.
- [2] S. Yuan, Y. Sun, and M. Peng, "Joint network function placement and routing optimization in dynamic software-defined satellite-terrestrial integrated networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications.*, vol. 23, no. 5, pp. 5172 - 5186, 2024.
- [3] G. Zheng, N. Wang, P. Qian, D. Griffin and R. Tafazolli, "SDN-based Service Function Chaining in Integrated Terrestrial and LEO Satellite based Space Internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025.
- [4] P. Xu, D. Wei, J. Wen, and L. Yang, "Multi-agent deep reinforcement learning for service function chain deployment in software defined LEO satellite networks," *Computer Communications*, 2025.
- [5] H. Zhang, N. Gao, X. Zhao, Y. Zhao and P. Zhang, "GSDRL: Resource orchestration in integrated satellite-terrestrial network for a hybrid edge-cloud," *Computer Networks*, 2025.