

지상-비지상 통합 네트워크에서 전송 계층 성능 최적화 연구 동향

이수경, 이수경
연세대학교 컴퓨터과학과

{codesums.api, sklee}@yonsei.ac.kr

A Survey on Transport Layer Performance Optimization for Space-Air-Ground Integrated Networks

Lee Sugyeong, Lee Sukyoung
Yonsei Univ.

요약

최근 지상-비지상 통합 네트워크(Space-Air-Ground Integrated Networks, SAGIN)가 확산되면서, 지상 인프라 구축이 제한적인 통신 사각지대까지 전 지구적 초연결 네트워크 환경이 구축되고 있다. 그러나 이러한 통합망은 위성의 고속 이동으로 인한 네트워크 변화에 취약하다는 한계가 있다. 이에 본 논문은 지상-비지상 통합 네트워크에서 전송 계층 성능을 최적화하기 위한 연구 동향을 학습 기반 제어 기법과 위성 동역학 적응형 제어 기법으로 구분하여 살펴본다.

I. 서론

최근 지상-비지상 통합 네트워크(Space-Air-Ground Integrated Networks, SAGIN)가 확산되면서, 지상 인프라 구축이 제한적인 통신 사각지대까지 전 지구적 초연결 네트워크 환경이 구축되고 있다. 종단 간(end-to-end) 연결 경로를 확장하는 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성 시스템이 개발되면서 통신 거리는 줄어들고 고용량 데이터를 신속히 전송하게 되었다. 그러나 기존의 전송 계층 프로토콜은 지구 주변을 초속 7.5km로 공전하는 LEO 위성의 동적 특성을 반영하지 못한다 [1], [2]. 특히 데이터를 릴레이(relay)하던 LEO 위성 간 연결이 단절되면 심각한 서비스 중단이 발생한다 [3]. 대표적인 전송 계층 프로토콜인 TCP(Transmission Control Protocol)는 LEO 위성의 빠른 움직임으로 인한 패킷 손실을 혼잡 이벤트로 오인하고 전송률을 최저 수준으로 재설정하여 네트워크 성능을 저해한다.

LEO 위성의 동적 특성을 반영하기 위해 Starlink는 전 세계에 걸쳐 15초 간격으로 동기화된 네트워크 재구성 주기를 가진다. 그러나 이러한 연결 중단 또한 지연 시간 증가 및 처리량의 저하를 유발한다 [1], [4]. 이 문제를 해결하기 위해 전송 계층의 혼잡 제어 알고리즘을 개선하려는 기술들이 연구되고 있다. 본 논문은 1) 학습 기반 전송률 제어와 2) 위성 동역학 적응형 전송률 제어로 분류하여 지상-비지상 통합 네트워크에서 전송 계층 성능을 최적화하기 위한 연구 동향을 살펴본다.

표 1. 지상-비지상 통합망 전송 계층 성능 최적화 연구

	학습 기반 전송률 제어		위성 동역학 적응형 전송률 제어	
기반 기법	온라인 학습	강화 학습	CUBIC	BBR
제안 기법	PCC [5]	Aurora [6]	SaTCP [2]	LeoCC [1], SATPIPE [7]

II. 본론

2.1 학습 기반 전송률 제어 연구

지상-비지상 통합망의 무선 환경은 연결 중단이 빈번하게 일어나 비혼잡 손실(non-congestion loss)을 유발한다. 전송 계층에서 이러한 비혼잡 손실을 구별하고 네트워크 성능 개선을 이루기 위해 초기 연구들은 학습 기반 전송률 제어 기법을 제안하였다 [5], [6].

[5]은 온라인 학습 알고리즘으로 전송률을 제어하는 PCC(Performance-oriented Congestion Control)를 제안했다. 이를 수행하기 위해 sender는 특정한 전송률(sending rate)로 데이터를 전송한 다음, 그 결과로 얻어지는 처리량, 손실률, RTT(Round Trip Time) 등을 관찰한다. 패킷 수준에서 일어나는 이러한 이벤트는 유저리티 함수(utility function)을 통해 단일 수치인 성능 유저리티(performance utility)로 집계되고, PCC는 집계된 유저리티 값을 비교하며 성능 유저리티를 증가시키는 방향으로 전송률을 조정한다. 라우터 변경 없이 sender만 수정하므로 현실적인 배포 가능성이 높고, 다양한 환경의 실험에서 TCP 계열의 다른 알고리즘보다 일관되게 높은 성능을 보였다.

[6]은 [5]의 접근 방식을 확장하여 강화 학습(Reinforcement Learning) 기반 전송률 제어 기법인 Aurora를 제안한다. Aurora는 sender가 agent에 해당하며, 모니터링 간격마다 관측한 통계 베타(latency gradient, latency ratio, sending ratio)의 고정 길이 이력을 신경망의 상태(state)로 입력 받아 전송률 변화(action) 값을 출력하고, 이에 따라 전송률을 개선한다. 실험 결과 최신 혼잡 제어 알고리즘인 PCC-Vivace, BBR(Bottleneck Bandwidth and RTT) 등과 비교했을 때 동등하거나 더 우수한 성능을 보였다. 특히 용량이 5초마다 16Mbps와 32Mbps 사이에서 무작위로 변하는 동적 링크 환경에서 Aurora는 BBR에 필적하는 처리량을 보이면서도 BBR보다 현저히 낮은 지연을 달성했다.

위와 같은 학습 기반 전송률 제어 기법은 LEO 위성의 빠른 움직임에 대한 적절한 대처를 실시간으로 학습할 수 있으므로 수렴 속도나 지연 유발과 같은 불안정한 동작을 보이고 결과적으로 지상-비지상 통합 네트워크의 성능 저하로 이어질 수 있다. 따라서 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위한 위성 동역학 적응형 전송률 제어 기법이 제안되고 있다.

2.2 위성 동역학 적응형 전송률 제어 연구

기존의 학습 기반 전송률 제어 연구가 복잡한 네트워크 변수 간 관계를 모델링하여 전송 성능 개선을 추구한다면, 위성 동역학 적응형 전송률 제어 연구는 LEO 위성 시스템 특유의 결정론적(deterministic) 변화를 활용하여 특정 이벤트 상황에서의 제어 정확도를 극대화한다는 차이점이 있다. LEO 위성 시스템의 주기적이고 예측 가능한 변동성을 이용하여 전송 계층에서 선제적으로 CWND(congestion window) 크기를 조절하고 통신 성능을 최적화하는 기법들이 제안되었다 [1], [2], [7].

[1]은 Starlink 단말에서 발견되는 15 초 간격의 연결 재구성(connection reconfiguration) 시점을 관측하고, 이를 전송률 미세 조정에 반영하는 LeoCC를 제안했다. 재구성이 감지되면 전송 중인 패킷(inflight packets) 수를 제한하여 큐를 비우고, 새로운 구간의 샘플로 대역폭을 추정하며, RTT 상태를 통해 목표 전송률을 채택한다. 다른 혼잡 제어 알고리즘과의 비교 실험에서 CUBIC, Copa, BBRv3 보다 85~494% 높은 처리량을 달성했고, BBRv1 및 PCC-Vivace 보다 44~56% 더 낮은 지연 시간을 달성했다.

[2]는 LEO 위성 위치의 예측 가능성을 활용하여 비혼잡 손실이 언제 발생할지를 계산하고, 예측된 시점으로부터 일정 기간 TCP 로직이 CWND를 억제하는 SaTCP를 제안한다. SaTCP는 종단 간 설계 원칙을 따르므로, 라우터와 같은 핵심 백본 장비를 교체하지 않고도 구현할 수 있다는 장점이 있다. ISL(Inter Satellite Link) 경로 실험은 성능 개선 효과가 미미했지만, Bent-pipe 경로에 대한 실험에서는 CUBIC 대비 1.47~1.74 배 처리량 향상을 달성했다.

한편, [7]은 [2]의 기법이 지상국(ground station)의 신호에 의존하기 때문에 결과적으로 불필요한 지연과 오버헤드, 긴 CWND 고정 구간을 요구한다는 사실을 지적하며 SATPIPE를 제안한다. SATPIPE는 sender 단에서 LEO 위성들의 역학으로 인해 연결 전환이 일어나는 기간을 정확히 측정하여 CWND를 줄이고, 그 직후 ProbeRTT 상태로 전환하여 RTprop을 개선한다. 제안된 기법은 실제 Starlink 환경 실험에서 BBR 대비 처리량, 재전송률과 같은 성능 지표를 크게 개선했다.

그러나 [2]가 TCP CUBIC, [7]이 TCP BBR을 각각 개선하므로, 이와 같이 개별 혼잡 제어 알고리즘의 특성에 맞춘 수정 방식만으로는 급격히 변하는 지상-비지상 통합 네트워크 환경에서 모든 전송 프로토콜의 성능을 일괄적으로 보장하기 어렵다. 즉, 전송 계층의 다양한 혼잡제어 알고리즘에 통용하여 LEO 위성의 동역학을 반영하고 전반적인 네트워크 성능 개선을 달성할 기법이 필요하다.

III. 결론

본 논문에서는 지상-비지상 통합 네트워크에서 LEO 위성 시스템의 동적 특성으로 발생하는 전송 계층의 성능 저하 문제를 해결하는 최신 연구 동향들을 학습 기반 제어 기법 및 위성 동역학 적응형 제어 기법으로 나누어 살펴보았다. PCC와 Aurora 등 학습 기반 전송률 제어 기법은 온라인 학습이나 강화 학습을 모델링의 기반 기술로 활용하여 전송 성능 향상을 도모했으나, 위성 환경의 급격한 변화 속에서 수렴 안정성 확보에 한계를 보인다. 이를 보완하기 위해 제안된 위성 동역학 적응형 전송률 제어 기법들은 LEO 위성의 결정론적 이동 경로와 연결 재구성 주기를 선제적으로 활용하여 비약적인 처리량 향상과 지연 시간 감소를 달성하였다. 하지만 현재의 연구들이 CUBIC, BBR 등 특정 혼잡 제어 알고리즘의 로직 수정에 의존하고 있는 만큼, 향후에는 다양한 전송 프로토콜에 범용적으로 적용 가능하면서 LEO 위성 시스템의 불규칙한 연결 변화에도 강건하게 대응할 수 있는 통합적인 최적화 프레임워크 연구가 지속되어야 할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 중견연구(No. RS-2025-00573388)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Z. Lai, Z. Li, Q. Wu, H. Li, J. Li, X. Xie, Y. Li, J. Liu and J. Wu, "LeoCC: Making Internet Congestion Control Robust to LEO Satellite Dynamics," in *Proc. ACM SIGCOMM 2025 Conf.*, New York, NY, USA, pp. 129-146, Sep, 2025.
- [2] X. Cao and X. Zhang, "SaTCP: Link-Layer Informed TCP Adaptation for Highly Dynamic LEO Satellite Networks," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, New York, NY, USA, pp. 1-10, May, 2023.
- [3] H. Yang, B. Guo, X. Xue, X. Deng, Y. Zhao, X. Cui, C. Pang, H. Ren, and S. Huang, "Interruption Tolerance Strategy for LEO Constellation with Optical Inter-Satellite Link," *IEEE Trans. Netw. Service Manag.*, vol. 20, no. 4, pp. 4815-4830, May, 2023.
- [4] N. Mohan, A. E. Ferguson, H. Cech, R. Bose, P. R. Renatin, M. K. Marina, and J. Ott, "A Multifaceted Look at Starlink Performance," in *Proc. ACM Web Conf. (WWW)*, Singapore, pp. 2723-2734, May, 2024.
- [5] M. Dong, Q. Li, D. Zarchy, P. B. Godfrey and M. Schapira, "PCC: Re-architecting Congestion Control for Consistent High Performance," in *Proc. 12th USENIX Symp. Netw. Syst. Des. Implementation (NSDI)*, Oakland, CA, USA, pp. 395-408, May, 2015.
- [6] N. Jay, N. Rotman, B. Godfrey, M. Schapira, A. Tamar, "A Deep Reinforcement Learning Perspective on Internet Congestion Control," in *Proc. 36th Int. Conf. Mach. Learn. (ICML)*, Long Beach, CA, USA, pp. 3050-3059, Jun, 2019.
- [7] D. Zhao, X. Zhang and M. Lee, "SatPipe: Deterministic TCP Adaptation for Highly Dynamic LEO Satellite Networks," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, London, UK, pp. 1-10, May, 2025.