

심우주 통신 환경에서 성능 향상을 위한 LTP 파라미터 최적화 및 제어 기법에 관한 연구 동향

김가현, 이동현, 송치현, 조성래
중앙대학교 컴퓨터공학과

{ghkim, dhlee, chsong}@uclab.re.kr, srcho@cau.ac.kr

Recent Advances in Parameter Optimization and Control Strategies for LTP Performance Enhancement in Deep Space Communications

Gahyun Kim, Donghyun Lee, Chihyun Song, and Sungrae Cho
Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University

요 약

심우주 통신 환경에서는 긴 왕복 지연, 간헐적 링크 단절, 비대칭 채널 등의 제약으로 인해 전통적인 TCP/IP 기반 전송이 효과적으로 작동하지 않으며, 이를 해결하기 위해 DTN 구조와 LTP가 도입되었다. LTP는 파일을 블록과 세그먼트 단위로 나누어 전송하며, 세션 기반의 신뢰성 있는 데이터 전송을 제공한다. LTP의 성능은 세그먼트 크기, 블록 크기, 세션 수, 타이머 설정 등 다양한 파라미터에 민감하게 영향을 받지만, 이에 대한 최적화 기준은 표준화되어 있지 않다. 본 논문은 최근 심우주 통신 환경을 고려하여 제안된 세 가지 연구를 기반으로 LTP의 파라미터 최적화 및 제어 기법의 동향을 살펴본다.

I. 서 론

차세대 우주 탐사 임무에서는 지구-달, 화성, 그리고 저 너머 심우주까지의 안정적인고 효율적인 데이터 전송이 필수적이다. 행성 간 네트워크는 매우 긴 왕복 지연, 채널의 비대칭성, 간헐적 연결 등의 제약 조건이 있어 안정적인 전송을 위한 기술의 필요성이 대두되고 있다. [1]

이러한 특수성으로 인해, 기존의 TCP 기반 네트워크를 사용하기 어려워, Delay/Disruption Tolerant Network(DTN) 아키텍처가 대안으로 채택되고 있다. [2] DTN 구조의 핵심 기술인 Licklider Transmission Protocol (LTP)은 심우주 환경에서 신뢰성 있는 블록 전송을 지원하며, Bundle Protocol (BP)아래의 convergence layer에서 핵심 프로토콜로 작동한다. [3]

LTP는 데이터 전송 시 파일을 여러 개의 블록으로 나누고, 각 블록을 다시 세그먼트 단위로 분할하여 전송한다. 세그먼트의 마지막에는 체크포인트(CP)가 포함되어 수신 측으로부터 report 세그먼트(RS)를 받아 작동하도록 설계되어 있다. 이러한 구조 때문에 LTP에서는 세그먼트 크기, 블록 크기, 세션 수, 타이머 설정과 같은 여러 구성 파라미터들이 성능에 직접적인 영향을 미친다. [4]

그러나 이러한 중요한 파라미터에 대한 구체적인 설정 기준은 현재 표준 문서에 정의되어 있지 않다. 이러한 배경 속에서 최근 연구들은 LTP의 성능 최적화를 위해 전송 효율성과 신뢰성을 제고하려는 시도를 하고 있다. 따라서 본 논문에서는 성능 향상을 위한 LTP 파라미터 최적화 및 제어 기법에 대한 연구 동향을 제시한다.

II. 본론

[5]의 저자는 ACK 채널의 전송 속도가 낮은 비대칭 환경에서 CP 타이머 설정이 LTP 전송 효율과 재전송 횟수, 그리고 에너지 소비에 큰 영향을 미친다는 점에 주목하였다. CP 타이머는 수신자의 RS가 도착하지 않았을 경우 송신자가 CP 세그먼트를 재전송할지 판단하는 기준이 되며, 타이머 값이 너무 짧으면 불필요한 재전송이 발생하게 된다. 이를 방지하기 위해 저자들은 CP 타이머 길이가 RTT보다 충분히 길어야 한다는 조건을 만족해야 한다고 제안하며, 실험 기반 최적값 탐색을 수행하였다.

실험은 ION 테스트베드를 사용해 수행되었으며, 비대칭 링크 환경에서 CP 타이머를 4~36 초 범위로 변화시키며 goodput과 재전송 횟수를 측정하였다. 결과적으로 CP 타이머를 28 초 이상으로 설정할 때, 가장 적은 재전송과 높은 전송 효율을 보였으며, 전력 소모 측면에서도 개선된 것을 확인할 수 있었다. 이 연구는 CP 타이머 설정 조정이 LTP의 성능 개선과 전력 소비 절감에 긍정적인 영향을 주는 것을 입증하였다.

[6]의 저자는 기존의 전송 모델이 CDSN 환경에서 멀티홉 전송에 적용되기 어려운 문제를 해결하고자, 파일 전송 지연 모델을 새롭게 정의하고, 이에 기반한 파라미터 최적화 알고리즘인 LTP-PODA를 제안한다. 이 알고리즘은 블록 크기, 세그먼트 크기, 세션 수를 상호 연관된 요소로 고려하며, 실제 통신 환경의 전송률, 지연 시간, 오류율 등을 반영해 CDSN용 지연 모델을 수학적으로 설계하여 최적 값을 도출한다.

실험을 통해 다양한 채널 조건에서도 LTP-PODA 는 기존 고정 파라미터 설정 방식에 비해 평균적으로 더 높은 전송 성능을 보였으며, 최대 93%까지의 goodput 향상이 관측되었다. 특히 번들 집계 여부나 멀티홉 구조 여부에 관계없이 안정적인 성능 향상을 달성하여, 복잡한 우주 통신 환경에 적합한 유연한 최적화 기법임을 입증하였다.

[7]의 저자는 심우주 환경에서 세션 종료 시간이 RTT 및 BER 에 따라 불규칙하게 증가하는 현상이, 실시간 제어가 필요한 우주 임무에 큰 장애가 될 수 있다고 판단하였다. 이를 해결하기 위해 제안된 Aggressive and Proactive CP (APCP) 기법은 수신 측이 전송 블록의 길이를 미리 추정하여 CP 수신 이전에도 임의의 RS 를 선제적으로 전송하여 재전송 대기 시간을 제거한다. 해당 방법은 LTP 표준을 유지하면서도 CP 타이머 만료를 기다릴 필요가 없어 세션 종료 시간을 RTT 범위 내로 고정할 수 있다.

시뮬레이션 결과, 99.67%의 세션이 5 OWLT(one-way light time) 이내에 종료되었으며, 이는 기존 방식 대비 QoS 관점에서 우수한 성능임을 확인할 수 있다. goodput 의 경우 중복 제어 메시지 전송으로 인해 약 6~10%의 감소가 발생했지만, 실시간 명령, 제어 임무에서는 지연의 예측 가능성 확보가 더 우선시되는 점을 강조하였다.

III. 결론

LTP 는 DTN 기반의 심우주 통신에서 핵심적인 전송 계층 프로토콜로 자리잡고 있으며, 그 성능은 설정된 파라미터와 제어 메커니즘에 따라 크게 달라질 수 있다. 본 논문에서는 최근 연구들을 통해, 파라미터 최적화와 세션 제어 전략이 전송 효율, goodput, 에너지 소비, 지연 예측 가능성 등에 미치는 영향을 구체적으로 분석하였다.

첫째, 비대칭 링크 환경에서의 실험 기반 CP 타이머 설정 기법은 재전송을 줄이고 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 실용적인 접근임을 보여주었다. 둘째, LTP-PODA 알고리즘은 복잡한 다홉 네트워크 환경을 고려한 수학적 지연 모델 기반 최적화 기법으로, 다양한 조건에서도 높은 성능을 보장하는 유연한 설정을 가능하게 한다. 셋째, APCP 기법은 세션 종료 시간을 안정적으로 제어할 수 있어 실시간 우주 임무 통신에 효과적인 방식임을 입증하였다.

향후 연구에서는 이러한 전송 모델과 제어 기법에 최신 지능형 최적화 기술을 접목함으로써, 보다 동적이고 환경 적응적인 LTP 성능 향상이 가능할 것이다. 특히 자율 협력 UAV 제어 기반의 Multiagent Deep Reinforcement Learning 접근 방식이나, 분산 연합 학습 기반의 자원 최적화 기법과 같은 최근의 강화학습 및 분산 지능 제어 기술을 접목한다면[8][9], 향후 LTP 파라미터 설정 문제 또한 지속 학습 기반의 동적 최적화 문제로 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2022-00156353, 50%)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2023-00209125)을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] S. Burleigh et al., "Delay-tolerant networking: An approach to interplanetary internet", IEEE Commun. Mag., vol. 41, no. 6, pp. 128-136, Jun. 2003.
- [2] Caini, C., et al. "Delay- and disruption-tolerant networking (DTN): an alternative to TCP/IP for space communications." Computer Networks 2011.
- [3] S. Burleigh, M. Ramadas and S. Farrell, "Licklider transmission protocol - motivation", Internet Requests for Comments RFC Editor RFC 5325, September 2008.
- [4] Z. Wei, R. Wang, Q. Zhang and J. Hou, "Aggregation of DTN bundles for channel asymmetric space communications," 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), Ottawa, ON, Canada, 2012, pp. 5205-5209.
- [5] Z. Shi et al., "Study on Checkpoint Timer Optimal Setup of Licklider Transmission Protocol," in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 35, no. 5, pp. 4-13, 1 May 2020.
- [6] Guo YU, Zhenxing DONG, Yan ZHU, Performance improvement of licklider transmission protocol in complex deep space networks based on parameter optimization, Chinese Journal of Aeronautics, Volume 36, Issue 5, 2023, Pages 406-420.
- [7] C. H. Koo and S. C. Burleigh, "Aggressive and proactive LTP control signal handling for minimal session delivery time: RTT rules the world," in Journal of Communications and Networks, vol. 25, no. 4, pp. 516-531, Aug. 2023.
- [8] W. J. Yun et al., "Cooperative Multiagent Deep Reinforcement Learning for Reliable Surveillance via Autonomous Multi-UAV Control," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 18, no. 10, pp. 7086-7096, Oct. 2022
- [9] D. Kwon, J. Jeon, S. Park, J. Kim and S. Cho, "Multiagent DDPG-Based Deep Learning for Smart Ocean Federated Learning IoT Networks," IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 10, pp. 9895-9903, Oct. 2020.