

전력 효율적인 멀티링크 전송 동작을 위한 트래픽 특성 인지 전송 기법

김하연¹, 이진민², 이일구³

¹성신여자대학교 융합보안공학과 학부생

²성신여자대학교 미래융합기술공학과 박사과정

³성신여자대학교 융합보안공학과/미래융합기술공학과 교수

imstella59@naver.com, csewa56579@gmail.com, iglee@sungshin.ac.kr

Traffic Characteristics-Aware Transmission Technique for Power-Efficient Multi-Link Operation

Ha-Yeon Kim¹, Jin-Min Lee², Il-Gu Lee^{1,2}

¹Dept. of Convergence Security Engineering, Sungshin Women's University

²Dept. of Future Convergence Technology Engineering, Sungshin Women's University

요 약

멀티링크를 지원하는 무선 네트워크 장치의 전력 효율은 모바일 장치의 배터리 수명, 시스템 성능, 네트워크 품질에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 종래의 전송 방식은 트래픽이 발생할 때마다 링크가 활성화되어 전력 소모가 증가하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 트래픽 특성에 따라 스케줄링하고 링크를 제어하는 전송 기법을 제안한다. 실험 결과에 따르면, 제안 방식은 기존 방식 대비 멀티링크 환경에서 전력 소모량을 약 32% 줄일 수 있었다.

1. 서론

Wi-Fi 7 및 5G에서는 스루풋(throughput) 향상을 위해 멀티링크(MLO, Multi-Link Operation) 기술이 도입되었다. 멀티링크는 하나의 단말에서 서로 다른 주파수 대역의 여러 무선 링크를 병렬로 활용해 스루풋을 향상시킨다. 그러나, 다양한 트래픽이 공존하는 네트워크 환경에서는 지연 민감도나 데이터 크기에 상관없이 트래픽이 발생할 때마다 링크가 활성화되므로 전력 소모가 증가하는 문제가 있다[1]. 단말에서 실행되는 애플리케이션은 서로 다른 지연 허용도(delay tolerance)를 가지므로 모든 트래픽을 동시에 무작위로 처리하면 불필요한 에너지 소비 및 자원 낭비가 발생하고, 모바일 장치의 배터리 수명, 시스템 성능, 네트워크 품질에 영향을 미칠 수 있다[2]. Tamas Levai.[3]는 트래픽 특성마다 SLO(Service Level Objective)를 고려해 패킷을 모았다가 특정 값에 도달했을 때 Batch로 전송되는 구조를 제안하였으나, 전송 시점을 고려한 전력 효율성을 고려하지 않았다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 트래픽 특성에 따라 스케줄링하고 링크를 제어하는 전송 기법인 Traffic Characteristic-aware Multi-Link Operation (TC-MLO)를 제안한다.

본 논문의 주요 기여점은 다음과 같다.

- 전력 효율을 위해 트래픽 특성을 고려한 멀티링크 전송 기법인 TC-MLO를 제안하였다.

- 단일링크와 멀티링크 환경에서 제안하는 TC-MLO와 종래 트래픽 전송 기법의 전력 소모량과 평균 지연 시간을 비교 평가하는 프레임워크를 제안했다.
- 제안하는 TC-MLO는 멀티링크 환경에서 종래 기법 대비 전력 소모를 약 32% 절감했다.

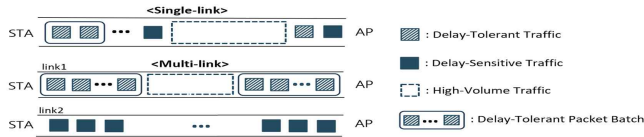
본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 TC-MLO를 설명한다. 3장에서는 ns-3 시뮬레이터를 이용하여 제안 방식과 기존 방식의 성능을 평가한다. 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

2. 전력 소모를 줄이기 위한 TC-MLO 전송 메커니즘

종래 모델은 트래픽이 도착하는 즉시 무작위로 분산 전송하기 때문에, 각 링크가 자주 활성화되며 전력 소모가 증가하는 문제가 있다.

본 연구에서 제안하는 TC-MLO는 단일링크 환경일 때, 지연 허용(delay-tolerant) 트래픽을 내부 큐에 저장한 뒤, 일정량 이상 모이면 함께 전송하며 그 외의 트래픽들은 지연 없이 즉시 전송한다. 멀티링크 환경에서는 트래픽의 특성에 따라 다른 링크를 사용한다. Delay-tolerant 트래픽은 link 1에서 모아서 전송하며, 유희 구간에는 고용량(high-volume) 트래픽을 집중적으로 전송한다. 동시에, 지연 민감(delay-sensitive) 트래픽은 link 2에서 즉시 처리한다.

다. 그림 1은 제안 방식의 동작 과정이다.



(그림 1) 제안 방식.

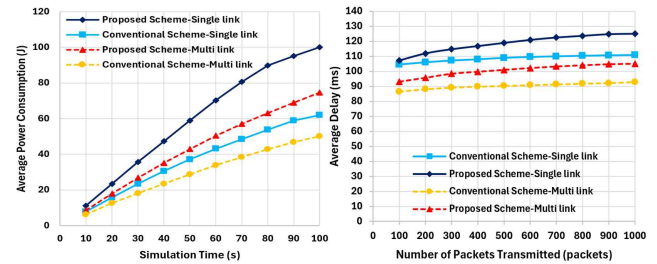
3. 성능 평가 및 분석

본 실험에서는 종래 기법과 제안하는 TC-MLO를 비교하기 위해, ns-3 시뮬레이터에서 STA(station)과 AP 간 2개의 멀티링크 환경과 단일링크 환경을 구성하였다. 트래픽은 지연 허용 시간이 1초이고 512바이트 크기의 패킷을 전송하는 delay-tolerant 트래픽, 지연 허용 시간이 0.1초이고 1,024바이트 크기의 패킷을 전송하는 delay-sensitive 트래픽, 지연 허용 시간이 0.5초이고 4,096바이트 크기의 패킷을 전송하는 high-volume 트래픽으로 가정하였다. 각 트래픽은 30초간 무작위로 패킷을 생성하며, 모든 실험은 1,000회 반복하여 평균값을 산출하였다. 멀티링크에서 delay-tolerant 및 high-volume 트래픽은 link 1에서 전송하고, delay-tolerant 트래픽은 10개의 패킷이 큐에 도달하면 모아서 전송되도록 한다. Delay-sensitive 트래픽은 link 2를 통해 즉시 전송되도록 설정하였다.

그림 2는 동일한 시간 동안 각 트래픽이 소비한 총 전력 소모량을 비교한 실험 결과이다. 전력 소모는 STA에서 소비된 누적 에너지를 측정하는 ns-3의 GetTotalEnergyConsumption()을 이용하였다. 시뮬레이션 종료 시점(100초)의 누적 소비량을 기준으로 비교했을 때, 단일링크 환경에서는 제안한 기법이 종래 기법 대비 전력 소모량을 약 38% 절감시켰고, 멀티링크 환경에서도 약 32%의 전력 절감이 있었다. 멀티링크 환경에서 제안 기법은 단일링크 환경에서 종래 기법보다 약 49% 낮은 절감 효과를 보여 전체 실험 중 가장 큰 차이를 보였다. 제안 기법은 delay-tolerant 트래픽을 묶어 전송함으로써 불필요한 링크 활성화를 줄였고, high-volume 트래픽을 유희 구간에 처리하여 전력 사용량이 절감되었다.

그림 3은 전송된 패킷 수에 따른 평균 지연 시간을 비교한 실험 결과이다. 지연 시간은 ns-3의 FlowMonitor를 이용하여, 각 트래픽 별 지연 시간의 누적값을 수신된 패킷 수로 나누는 방식으로 계산하였다. 각 구간 별 지연 시간 차이의 평균을 계산한 결과, 단일링크 환경과 멀티링크 환경에서 제안 기법이 종래 기법보다 평균 지연 시간이 약 0.01초 더 증가하였다. 멀티링크에서 제안 기법은 단일링크에서 종래 기법보다 평균 지연 시간이 약 0.007초 낮았다. 제안 기법은 delay-tolerant 패킷이 일정량 모일 때

까지 전송을 지연시키는 구조이기 때문에, 평균 지연 시간이 증가하였다.



(그림 2) 시뮬레이션 시간에 따른 전력 소모량. (그림 3) 전송된 패킷 수에 따른 평균 지연 시간.

4. 결론

멀티링크 기술은 스루풋 향상에 기여하지만, 링크가 빈번하게 활성화될 경우, 전력이 낭비되는 문제가 있다. 서로 다른 지연 민감도를 갖는 트래픽이 공존하는 실제 환경을 고려해, 본 연구에서는 트래픽 특성에 따라 스케줄링하고 링크를 제어하는 TC-MLO 전송 모델을 제안했다. 실험 결과에 따르면 멀티링크 환경에서 제안 기법은 종래 기법 대비 전력 소모는 약 32% 절감되고, 지연 시간은 약 0.01초 증가하였다. 향후 연구로는 delay-tolerant 트래픽을 자동으로 식별하고 분류하는 알고리즘을 설계하고, 다양한 STA 환경 및 모든 링크가 동시에 요구되는 고트래픽 시나리오에서 확장 실험을 수행할 계획이다.

Acknowledgement

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원(No. RS-2025-00518150)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT혁신인재4.0 사업의 연구결과로 수행되었음 (No. IITP-2022-RS-2022-00156310).

참고문헌

- [1] Abdalhafid, A.A., Subramaniam, S.K., Zukarnain, Z.A., Ayob, F.H., Multi-Link Operation in IEEE802.11be Extremely High Throughput: A Survey, IEEE Access 2024, 12, 46891-46906, 2024
- [2] Bao, B., Xu, Z., Li, C., Sun, Z., Liu, S., Li, Y., TDTS: Three-Dimensional Traffic Scheduling in Optical Fronthaul Networks with Conv-LSTM, Photonics, 8, 10, 451, 2021
- [3] Tamas Levai, Felician Nemeth, Barath Raghavan, Gabor Retvari, Batchy: Batch-scheduling Data Flow Graphs with Service-level Objectives, 17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '20), Santa Clara, CA, USA, 2020, 633-649