

Wi-Fi 7 다중 링크 동작의 공정성 및 성능 개선을 위한 혼잡도 기반 전송 제어

김병창, 권 람, 박은찬
동국대학교-서울 정보통신공학과

mbc991028@dongguk.edu, lamk@dongguk.edu, ecpark@dongguk.edu

Congestion-Based Transmission Control for Fairness and Performance Enhancement in Wi-Fi 7 Multi-Link Operation

Byeong-Chang Kim, Lam Kwon, Eun-Chan Park

Department of Information and Communication Engineering, Dongguk University-Seoul

요약

IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) 표준에서 도입된 다중 링크 동작(Multi-Link Operation(MLO))은 다수의 주파수 대역을 동시에 활용하여 전송 속도를 극대화하고 지연 시간을 단축하는 핵심 기술이다. 그러나 다중 링크 장치(Multi-Link Device(MLD))와 레거시 단일 링크 기기(Single-Link Device(SLD))가 공존하는 이기종 네트워크 환경, 특히 링크 간 혼잡도가 비대칭적인 상황에서는 기존의 동기화 전송 방식들이 구조적 한계를 드러낸다. 기존 기법들은 모든 링크의 백오프 완료를 기다리느라 MLD의 전송 기회 박탈을 야기하거나, 반대로 지나치게 공격적인 동기화 전송으로 인해 SLD의 전송 기회를 박탈하는 등 기기 간의 공평성과 효율적인 공존을 보장하지 못하는 문제가 있다. 이에 본 논문에서는 MLD와 SLD 간의 공존 문제를 해결하기 위해 확률적 동기화 전송 제어 (Probabilistic Synchronous Transmission Control(PSTC))를 제안한다. 제안 기법은 물리 계층의 채널 감지 횟수를 기반으로 링크의 실시간 혼잡도를 측정하고, 이를 바탕으로 동기화 전송 여부를 확률적으로 결정한다. 이를 통해 한산한 링크에서는 MLD의 전송 효율을 유지하면서도, 혼잡 링크에서는 동기화 전송을 스스로 억제하여 SLD와의 공정성을 확보한다. 성능 검증 위해 수행한 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 혼잡한 환경에서도 MLD와 SLD 간의 전송 기회 비율을 동등한 수준으로 유지하였다.

I. 서론

IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) 표준의 핵심 기술인 다중 링크 동작 (Multi-Link Operation (MLO))은 다수의 주파수 대역(2.4/5/6GHz)을 결합하여 전송 효율을 높이는 차세대 무선랜 기술이다[1]. 그러나 MLO 기술 도입 시 다중 링크 장치(Multi-Link Device (MLD))와 단일 링크 장치 (Single-Link Device (SLD))가 공존하는 이기종 네트워크 환경에서 링크 간 경쟁으로 인한 공정성 문제가 대두된다. 특히, 기기 내 간섭 문제로 인해 동시 송수신이 불가능한 NSTR(Non-Simultaneous Transmit and Receive) 기반 MLD가 동기화 전송을 시도할 경우, SLD의 전송 기회를 박탈당하거나 반대로 MLD의 성능이 저하되는 현상이 발생한다.

기존 연구에서는 NSTR MLD의 동기화 전송을 위해 WAIT, PIFS, ePIFS 등의 방식이 제안되었다[2]. WAIT 기법은 MLD의 모든 링크의 백오프 완료를 기다리는 방식으로, MLD의 전송 기회 손실을 야기한다. 반면, PIFS 및 ePIFS 기법은 한 링크의 백오프가 완료되면 인접 링크의 전송을 강제하는 방식으로 MLD의 처리율을 개선하였으나, 해당 링크의 혼잡 상황을 고려하지 않는 동기화 전송으로 인해 SLD의 전송 기회를 박탈하는 문제가 있다.

이에 본 연구에서는 링크별 혼잡 상황을 기반으로 동기화 전송을 확률적으로 제어하는 기법을 제안한다. 제안 기법은 물리 계층의 DIFS(DCF Inter-Frame Space) 감지 횟수를 통해 링크의 혼잡도를 정량화하고, 이를 시그모이드 함수와 지수 이동 평균 모델에 적용하여 동기화 전송 확률을 산출한다. 이를 통해 혼잡 환경에서는 MLD의 과도한 동기화 전송을 제한하여 SLD와의 공정성을 확보하고, 한산한 환경에서는 MLD의 전송 효율을 높이는 것을 목표로 한다.

II. 제안 기법

기존의 WAIT, PIFS, ePIFS 기법은 링크 간 혼잡도가 비대칭적인 환경에서 이웃 링크의 상태를 고려하지 않은 고정된 전송 규칙을 적용하여, MLD의 처리율 저하 또는 SLD의 공정성 훼손이라는 한계를 보였다. 이에 본 장에서는 이웃 링크의 실시간 혼잡도를 정량화하고, 이를 기반으로 동기화 전송 여부를 확률적으로 결정하는 (Probabilistic Synchronous Transmission Control(PSTC)) 메커니즘을 제안한다. PSTC는 한산한 상황에서는 MLD의 전송 효율을 극대화하고, 혼잡한 상황에서는 SLD와의 공존성을 확보하는 것을 목표로 한다.

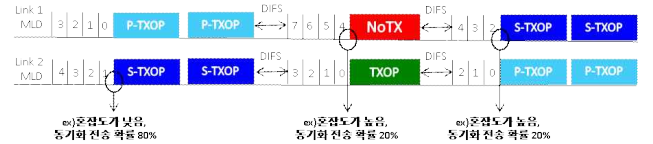
PSTC 기법은 하나의 데이터 패킷을 전송할 때까지 누적된 물리 계층의 DIFS 감지 횟수(\bar{N}_{difs})를 통해 링크의 경쟁 강도를 측정하며, 이를 시그모이드 함수와 지수 이동 평균 기법에 순차적으로 적용하여 최종 동기화 전송 확률(P_{sync})을 도출한다.

$$P_{instant}(t) = \frac{1}{1 + e^{k(\bar{N}_{difs}(t) - Center)}} \quad (1)$$

식(1)은 측정된 \bar{N}_{difs} 를 시그모이드 함수에 대입하여 즉각적인 전송 확률($P_{instant}$)을 산출하는 식이다. 여기서 $Center$ 는 전송 확률이 0.5가 되는 기준점으로 시스템이 허용하는 혼잡의 한계선을 의미하며, k 는 이 한계선 근처에서 확률을 얼마나 급격하게 차단할지를 결정하는 기울기 상수이다. 따라서 \bar{N}_{difs} 가 $Center$ 를 초과할수록 계산된 확률은 0에 수렴하여, 혼잡한 상황에서의 동기화 전송을 차단한다. 이어 시스템의 안정성을 확보하기 위해, 식 (2)와 같이 과거 데이터에 80% 가중치를 부여하는 지수 이동 평균을 적용하여 최종 확률(P_{sync})을 갱신한다.

$$P_{sync}(t) = 0.2 \cdot P_{instant}(t) + 0.8 \cdot P_{sync}(t-1) \quad (2)$$

식(2)는 산출된 $P_{instant}$ 에 지수 이동 평균을 적용하여 P_{sync} 를 도출하는 식이다. 알고리즘의 동작은 매 100ms 윈도우마다 \bar{N}_{difs} 를 측정하여 P_{sync} 를 갱신하는 구조를 갖는다. 주 링크에서 전송 기회(P-TXOP)를 획득한 MLD는 난수(r)를 생성하여 P_{sync} 와 비교한다. $r \leq P_{sync}$ 인 경우 확률 시행에 성공한 것으로 간주하여 동기화 전송(S-TXOP)을 수행하고, 반대의 경우 이웃 링크 동기화 전송을 포기하고 단독 전송만을 수행한다. [그림 1]과 같이, 이는 이웃 링크가 한산한 상황에서는 높은 확률로 동기화 전송을 허용하고, 혼잡한 상황에서는 동기화 전송을 차단한다.



[그림 1] PSTC 동작 예시

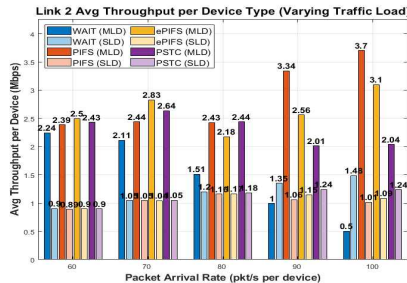
[그림 1]의 예시를 살펴보면, Link 2의 혼잡도가 낮을 경우 80%의 확률이 부여되어 Link 1과 Link 2가 동기화 전송을 수행한다. 이때, 제안 기법은 단순한 동기화 전송에 그치지 않고 다수의 패킷을 연속적으로 전송하도록 설계되었다. 이는 확보된 전송 기회 내에서 데이터 처리율 극대화하여 큐 적체 현상을 해소하기 위함이다. 반면, 혼잡도가 높은 경우에는 20%의 낮은 확률이 부여되어 빈번하게 동기화 전송이 차단되고, Link 1에서만 단독 전송이 이루어짐을 확인할 수 있다.

III. 모의실험

<표 1> 모의실험 환경

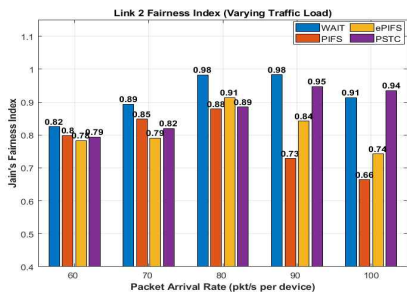
파라미터	값
모의실험 시간	10 sec
주파수 대역	5 GHz (Link 1), 2.4 GHz (Link 2),
다중 링크 수	2 개
데이터 전송률	600 Mbps
패킷 크기	1500 Bytes
슬롯 시간	9 μ sec
SIFS	18 μ sec
DIFS	34 μ sec
Link 1, Link 2 MLD 수	10 대
Link 1 SLD 수	0 대
Link 2 SLD 수	[10, 20, 30, 40, 50, 60]
<i>Center</i>	30
<i>k</i>	0.1

<표 1>은 본 연구의 모의실험에 사용된 주요 파라미터를 나타낸다. 본 연구에서는 Link 2(2.4GHz)는 SLD와 MLD가 공존하는 혼잡한 링크로, Link 1(5GHz)은 MLD만 존재하는 한산한 링크로 설정한 비대칭 혼잡 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 제안 기법의 제어 파라미터는 *Center*=30, *k*=0.1로 고정하였으며, 성능 평가는 크게 두 가지 시나리오로 진행된다. 첫 번째는 총 50대의 단말(MLD 10, SLD 40) 환경에서 트래픽 부하율을 단계적으로 증가시켜 부하 변화에 따른 영향을 분석하며, 두 번째는 트래픽 부하율을 90 packets/s로 고정된 상태에서 Link 2의 SLD 단말 수만을 증가시켜 순수 혼잡도 변화에 따른 성능 추이를 관찰한다. 최종적으로 기존 표준 방식인 WAIT 및 공격적 전송 방식인 PIFS, ePIFS 기법과의 비교를 통해, 비대칭·비대칭 환경에서 제안 기법이 갖는 전송 처리율과 공정성 개선 효과를 검증하고자 한다.



[그림 2] 트래픽 부하율에 따른 Link 2 단말 유형별 평균 처리율

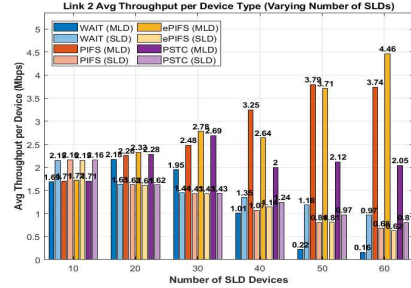
[그림 2]는 혼잡 링크(Link 2)에서 트래픽 부하율 증가에 따른 단말 유형별(MLD, SLD) 평균 처리율 추이를 보여준다. WAIT 기법은 트래픽 부하율이 100인 상황에서 MLD의 처리율이 급격히 저하되는 한계를 보였으며, PIFS 및 ePIFS 기법은 MLD의 성능은 확보했으나 SLD의 전송 기회를 박탈하여 SLD 처리율이 감소하였다. 반면, 제안 기법은 혼잡도 기반의 확률적 제어를 통해 MLD의 과도한 동기화 전송을 억제함으로써, SLD의 성능 저하를 효과적으로 유지하였다.



[그림 3] 트래픽 부하율에 따른 Link 2 공정성 변화

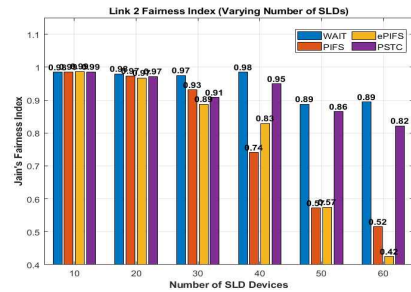
[그림 3]은 핵심 분석 대상인 혼잡 링크의 공정성 지표로서, MLD와 SLD가 공존하는 Link2에서 각 단말의 처리율을 기준으로 계산한 Jain's fairness index값이다. PIFS 및 ePIFS 기법은 혼잡도를 고려하

지 않는 동기화 전송으로 인해 트래픽 부하율이 증가할수록 공정성 지수가 0.66 수준까지 급락한다. 반면, 제안 기법은 트래픽 부하율이 높아져 네트워크가 혼잡해질수록 공정성이 오히려 향상되거나 높은 수준을 유지하는 특징을 보인다. 이는 혼잡할수록 시그모이드 함수에 의해 동기화 전송 확률이 낮아지기 때문이다. 결과적으로 제안 기법은 트래픽 부하량이 90, 100인 고부하 상황에서도 0.94 이상의 우수한 공정성을 달성한다.



[그림 4] SLD 단말 수 변화에 따른 Link 2 단말 유형별 평균 처리율

[그림 4]는 SLD 단말 수 증가에 따른 단말 유형별 평균 처리율 추이를 나타낸다. PIFS 및 ePIFS 기법은 Link 1을 이용한 동기화 전송으로 MLD 성능을 유지했으나, 이로 인해 SLD의 처리율이 급감하는 불공정성을 보였다. 반면, 제안 기법은 단말 수 증가에 따라 동기화 확률을 낮추는 제어를 통해 MLD의 동기화 전송 억제하고 SLD의 처리율을 유지시키는 결과를 보였다.



[그림 5] SLD 단말 수 변화에 따른 Link 2 공정성 지수

[그림 5]는 SLD 단말 수 증가에 따른 공정성 지표 분석 결과이다. Link 2 SLD 단말 수 60 기준 PIFS 기법의 공정성이 0.52, PIFS 기법의 공정성이 0.42까지 하락하였다. 반면, 제안 기법은 Link 2 SLD 단말 수 60인 환경에서도 0.82 이상의 순수한 공정성을 유지하였다. WAIT 기법이 수치상으로는 가장 높으나 효율성을 희생한 결과임을 고려할 때, 제안 기법이 공정성과 효율성 간의 균형을 효과적으로 달성함을 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 Wi-Fi 7 MLO 환경에서 MLD와 SLD 간의 공존성 문제를 해결하기 위해, 링크 혼잡도에 따라 동기화 전송을 확률적으로 제어하는 PSTC 기법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존 WAIT 방식의 낮은 효율성과 PIFS, ePIFS 방식의 불공정성 문제를 극복하고, 혼잡한 환경에서도 MLD와 SLD 간의 균형 잡힌 공존 성능을 달성함을 확인하였다. 결론적으로 본 연구는 이기종 기기가 조화롭게 공존할 수 있는 해법을 제시하였으며, 향후 네트워크의 지능형 채널 접근 제어 연구에 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-학석사연계ICT핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2024-00436744)

참고 문헌

- [1] Lopez-Perez, David, et al. "IEEE 802.11 be extremely high throughput: The next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11 ax." IEEE Communications Magazine 57.9 (2019): 113-119.
- [2] 권람, 박은찬. "Wi-Fi 7 에서 비대칭 링크의 다중 링크 동기화 전송 성능 분석 및 개선 방안." 한국통신학회 학술대회논문집 (2024): 950-951.