

차세대 무선랜 Wi-Fi7의 다중 링크 동기화 전송 성능 분석

권 람, 서호준, 박은찬
동국대학교 정보통신공학과

lamk@dongguk.edu, hojun145@dongguk.edu, ecpark@dongguk.edu

Performance Analysis of Multi-link Synchronous Transmission in Next-Generation Wireless LAN Wi-Fi7

Lam Kwon, Ho Jun Seo, Eun-Chan Park

Department of Information and Communication Engineering, Dongguk University-Seoul

요 약

차세대 무선랜 표준으로 개발한 Wi-Fi7은 처리율 향상과 지연 감소를 위해 다중 링크에서 동시에 송신과 수신을 할 수 있는 채널 접속 방식 STR(Simultaneous Transmission and Reception)을 정의하였다. 그러나 전송 전력 누설 문제로 링크에서 전송할 때 인접 링크가 채널을 감지할 수 없는 Blindness 현상이 발생하여 STR 동작을 수행할 수 없는 경우를 NSTR(Non-STR)로 정의하고 채널을 효율적으로 이용하기 위해 다중 링크 동기화 전송 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는 Wi-Fi7의 표준화 과정에서 제안한 몇 가지 동기화 전송 알고리즘을 살펴보고 모의실험을 통해 다중 링크 동기화 전송 성능을 분석하여 채널 효율성과 공정성 관련 문제점을 확인한다.

I. 서론

차세대 무선랜 표준 Wi-Fi7은 EHT(Extreme High Throughput)로 처리율 향상과 지연 감소를 위해 MAC(Medium Access Control) 계층에서 다중 링크 동작을 제안하였다. 다중 링크 동작은 하나의 기기에서 동시에 2개 이상의 무선 링크를 활용하여 처리율을 높이고 전송 지연을 감소시킬 수 있는 핵심 기술이다. 다중 링크 동작에서는 동시에 송신과 수신을 할 수 있는 채널 접속 방식인 STR(Simultaneous Transmission and Reception)을 사용한다. 하지만 기기의 물리적 또는 비용의 한계로 하나의 링크에서 전송하는 동안 전력 누설이 발생하여 이웃 링크는 채널을 감지할 수 없는 Blindness 상태가 되는 문제가 발생하고 결과적으로 채널을 효율적으로 사용할 수 없는 문제가 발생한다[1]. 이때, Blindness 발생으로 STR을 수행할 수 없는 채널 접속 방식을 NSTR(Non-STR)로 정의하고 채널을 효율적으로 사용하여 처리율 향상과 지연 감소 목표를 달성하기 위해 다중 링크 동기화 전송 알고리즘들을 제안하였다. 다중 링크 동기화 전송 알고리즘은 2개 이상의 링크에서 전송 시작과 끝을 정렬하여 전송을 시도하는 전송 방법으로 본 논문에서는 Wi-Fi7 표준화 과정에서 제안된 몇 가지 다중 링크 동기화 전송 알고리즘의 동작을 살펴보고 모의실험을 통해 각 알고리즘의 성능을 분석하여 다중 링크 동기화 전송에서 발생하는 채널 효율성과 공정성 관련 문제점을 확인한다.

II. 본론

1. 시작 시각 정렬과 종료 시각 정렬

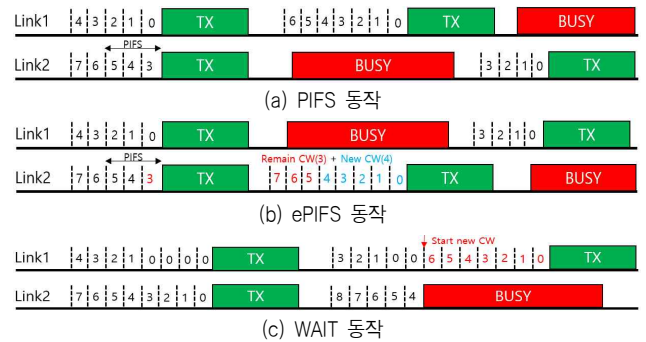


[그림1] NSTR 링크에서 Blindness로 인한 ACK 수신 문제

[그림1]은 NSTR 링크에서 Blindness로 인한 ACK(Acknowledgement) 수신 문제를 보여준다. [그림1]에서 (A)는 두 링크 간 전송 시작 시각이 다른 경우, (B)는 전송 종료 시각이 다른 경우이다. NSTR 링크에서는 하나의 링크에서 전송을 하는 동안 이웃 링크에서 Blindness로 인해 채널을 감지할 수 없어 ACK를 성공적으로 수신할 수 없다. 따라서 NSTR 링크의 경우 전송 시작 시각과 종료 시각을 맞춰 다중 링크에서 송신과 수신이 겹쳐 일어나는 것을 방지하기 위해 송수신 시간을 정렬한다. 정렬 방법에는 동시에 송신

을 시작하는 전송 시작 시각 정렬과 동시에 끝내는 종료 시각 정렬이 있다 [2].

2. 다중 링크 동기화 전송 알고리즘



[그림2] 다중 링크 동기화 전송 알고리즘

[그림2]는 NSTR 링크에서 세 가지 다중 링크 동기화 전송 알고리즘의 동작 방식을 보여준다[3]. 다중 링크 동기화 전송 알고리즘은 Blindness로 인한 손실을 막기 위해 동기화 전송의 시작 시점을 정렬하는 방법을 제안한다. 그리고 전송 종료 시점 정렬은 같은 전송 기간을 사용하여 맞춘다. 먼저, (a) PIFS(Point Coordination Function Inter Frame Space) 알고리즘은 어느 한쪽의 링크에서 채널 접속 경쟁 (백오프 절차)이 끝났을 때 이웃 링크가 PIFS 시간 동안 유휴 하면 다중 링크 동기화 전송을 시도한다. 채널 경쟁이 먼저 끝난 링크에서 채널 경쟁이 끝나지 않은 링크의 전송을 이끌기 때문에 MLD(Multi-Link Device)가 SLD(Single-Link Device)보다 채널 접속 경쟁에서 유리해 공정성을 저해할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 (b) ePIFS(Enhanced PIFS) 알고리즘이 고안되었다. ePIFS는 PIFS와 동일하게 먼저 경쟁이 끝난 링크에서 이웃 링크가 PIFS 시간 동안 유휴 하면 다중 링크 동기화 전송을 시도한다. 하지만 경쟁이 끝나지 않은 링크에 남아 있는 백오프 값을 다음 채널 접속 경쟁에 반영해 백오프 시간을 연장한다. 이 경우 연속적으로 채널 경쟁을 마치지 않고 이웃 링크의 전송에 덧붙여 전송하게 되면 추가되는 백오프 시간이 누적되어 채널 접속 경쟁에서 불리해진다. (c) WAIT 알고리즘은 채널 접속 경쟁이 끝난 링크는 이웃 링크의 채널 접속 경쟁이 끝날 때까지 전송을 미루고 대기하여 모든 링크의 백오프 절차가 완료되면 동시에 전송한다. 이 과정에서 한 링크의 채널 경쟁이 종료되었지만 이웃 링크가 전송 불가능한 상황이 되면 채널 경쟁이 종료된 링크에서

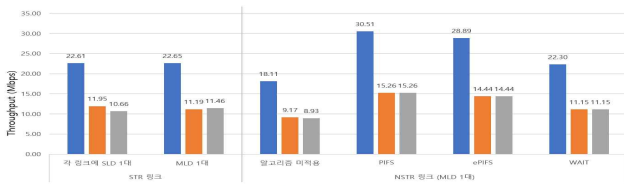
새로운 백오프 값을 뽑아 채널 경쟁을 한 번 더 수행한다. WAIT 알고리즘은 다중 링크 가운데 백오프 시간이 가장 긴 링크를 기준으로 전송이 결정되고, 채널 경쟁 중에 전송 불가능하게 되면 충돌에 대비해 새로운 백오프 값을 뽑아 채널 경쟁하기 때문에 PIFS나 ePIFS에 비해 MLD의 채널 점유가 보수적으로 이루어지고 SLD와의 채널 경쟁 공정성을 향상시킬 수 있다.

III. 모의실험

NSTR 링크에서 다중 링크 동기화 전송 알고리즘들의 성능을 살펴보고 각 알고리즘에서 발생하는 문제점을 확인한다. <표1>은 모의실험에서 사용한 주요 파라미터와 값을 보여준다. 모의실험에서는 두 개의 링크를 고려하는데, 모든 링크에서 동작하는 MLD 1대와 링크2에서만 동작하는 SLD를 0에서 10대까지 2대씩 증가시키면서 처리율을 확인하였다. 모든 단말은 서로를 감지할 수 있는 이상적인 채널 상태를 가정하였다. 데이터 전송은 상향링크 전송만 존재하며 AP는 비콘 프레임만 전송한다. 모든 단말은 항상 보낼 데이터가 있으며 데이터 프레임의 크기는 1000 byte로 설정하였다.

<표1> 모의실험 환경

파라미터	값
모의실험 시간	10 sec
주파수 대역	5 GHz
다중 링크 수	2개
링크 1 단말 수	MLD 1대
링크 2 단말 수	MLD 1대/ SLD 0~10대
MCS	24 Mb/s (QPSK3/4)
프레임 크기	1000 bytes
대역폭	20 MHz
SIFS	18 μ sec

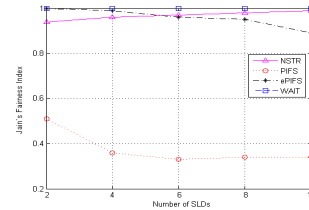


[그림3] 다중 링크 동기화 알고리즘 처리율

[그림3]은 여러 가지 상황에서의 다중 링크 접속 알고리즘의 처리율을 보여준다. 왼쪽의 2개의 그래프는 성능 비교를 위한 STR 링크이다. STR 링크에서 MLD는 SLD를 각각의 링크에 접속한 경우와 비슷한 처리율을 보인다. 오른쪽 4개 그래프는 NSTR 링크이고 NSTR 링크에서 동기화 전송 알고리즘을 미적용한 경우 전체 처리율은 18.11Mbps였는데, 이는 STR 링크에서 MLD의 전체 처리율 22.65Mbps에 비해 대략 20% 감소한 수치이다. PIFS, ePIFS, WAIT 알고리즘의 경우, 동기화 전송 알고리즘을 적용하지 않은 경우보다 각각 69% 증가한 30.51Mbps, 60% 증가한 28.89Mbps, 23% 증가한 22.3Mbps이며, STR 링크의 MLD에 비해 각각 35% 증가, 28% 증가, 2% 감소하였다. 따라서 다중 링크 동기화 전송 알고리즘을 적용하는 경우 NSTR 링크에서 처리율 향상에 기여함을 확인할 수 있다.

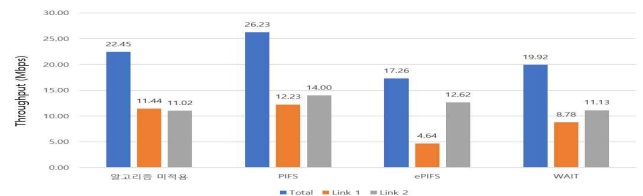
[그림4]는 두 개의 링크를 가진 NSTR 링크에 MLD 1대와 링크2에 접속한 SLD가 2대씩 증가하는 경우 링크2의 MLD 처리율과 SLD들의 처리율을 이용해 구한 Jain's Fairness index 값을 보여준다. 이 실험에서는 링크의 혼잡도가 비대칭적인 상황과 혼잡도가 점점 높아지는 상황에서 SLD와 MLD 간의 공정성을 확인할 수 있다. PIFS 알고리즘은 가장 낮은 공정성 지표값을 가지는데 모든 구간에서 0.5 이하의 값을 보여주었다. 또한, PIFS 알고리즘을 적용하는 경우 링크2의 SLD가 증가함에 따라 공정성이 더욱 저하되는 경향을 확인할 수 있다. 이 실험에서 PIFS 알고리즘을 적용한 경우 링크2에서 MLD의 처리율이 SLD의 처리율 대비 최소 8배에서

최대 11.2배까지 높았다. PIFS 알고리즘을 제외한 다른 경우는 모두 공정성 지표값이 0.9 이상을 보이며 SLD의 변화에 따른 공정성 지표값의 변화도 PIFS 알고리즘에 비해 크지 않았다. 따라서 MLD와 SLD간의 공정성은 혼잡도에 따른 링크의 비대칭성보다 동기화 전송 알고리즘에 크게 영향을 받으며 ePIFS 또는 WAIT 알고리즘을 통해 공정성 문제를 개선할 수 있음을 확인할 수 있다.



[그림4] 링크2에서 SLD 증가에 따른 공정성 지표값

[그림5]는 링크2에 SLD가 10대 접속한 경우 다중 링크 동기화 전송 알고리즘의 처리율이다. PIFS, ePIFS, WAIT 알고리즘은 동기화 전송 알고리즘 미적용한 경우에 비해 전체 처리율이 각각 17% 증가, 23% 감소, 11% 감소하였다. ePIFS 알고리즘의 경우 링크 1의 처리율이 링크 2의 처리율에 비해 현저히 감소하였는데, 전체 처리율 대비 27% 수준에 불과하였다. WAIT 알고리즘의 경우 링크 1의 처리율이 향상되어 전체 처리율 대비 44% 수준에 이르렀다. 링크 1에는 MLD 1대만 접속하여 충돌 확률이 낮음에도 불구하고 링크 2보다 낮은 처리율을 보여주는 것은 다중 링크 동기화 전송 알고리즘으로 인해 링크 1의 MLD 단말의 채널 접속 경쟁에 패널티를 준 영향으로 생각할 수 있다. [그림4]와 [그림5]의 결과를 비교하면 다중 링크 동기화 전송 알고리즘에 따라 채널 효율성과 공정성 사이의 상충 관계를 확인할 수 있다.



[그림5] 비대칭 링크 혼잡도 상황의 다중 링크 동기화 전송 처리율

IV. 결론

본 논문에서는 다중 링크 동기화 전송 알고리즘들의 특징을 비교하고 모의 실험을 통해 각 알고리즘에서 발생할 수 있는 문제점들을 확인하였다. 실험 결과 다중 링크 동기화 전송으로 인한 처리율 향상과 공정성 사이의 상충 관계를 확인할 수 있었다. 향후 MLD와 SLD간의 처리율 공정성을 유지하면서 전송 효율을 향상시킬 수 있는 전송 기법에 대해 연구를 진행하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2021R1F1A1046959)

참 고 문 헌

- [1] 권관, 김효경, 박은찬, “차세대 무선랜 Wi-Fi7에서 다중 링크 동작의 제한 요인 분석”, 한국통신학회 학술대회논문집 (2022), pp859-860.
- [2] IEEE Std 802.11be/2.0 “Draft Standard for information technology - Telecommunications and information exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. -Amendment 8: Enhancements for extremely high throughput (ETH)”, Jan 2023
- [3] Dmitry Akhmetov, Laurent Cariou, Dibakar Das, “Discussion on methods for synchronous ML operation”, IEEE 802.11-20/993r7, Aug 2022