

Wi-Fi 7에서 비대칭 링크의 다중 링크 동기화 전송 성능 분석 및 개선 방안

권 람, 박은찬

동국대학교 정보통신공학과

lamk@dongguk.edu, ecpark@dongguk.edu

Performance Analysis and Improvement of Multi-Link Synchronous Transmission of Asymmetric Link in Wi-Fi 7

Lam Kwon, Eun-Chan Park

Department of Information and Communication Engineering, Dongguk University-Seoul

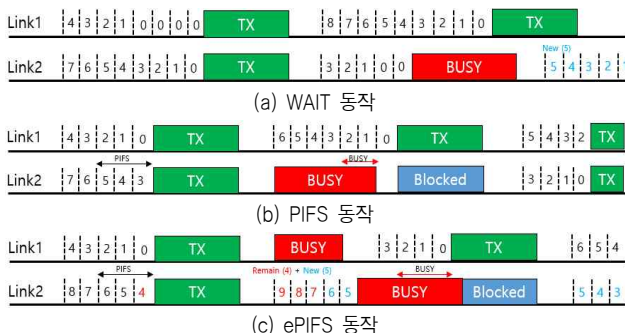
요약

차세대 무선랜 표준으로 개발한 Wi-Fi 7에서 성능 향상을 위해 도입한 다중 링크 동작의 채널 접속 방식에서 동시 송수신이 가능한 방식인 STR(Simultaneous Transmission and Reception)로 정의하였다. 하지만 기저적 한계와 비용 문제로 인해 전력 누설이 발생하여 하나의 링크에서 전송하는 동안 다른 링크에서 전송하지 못해 동시 송수신을 적용하지 못하는 경우가 발생하고 이를 NSTR(Non-STR)로 정의하였다. NSTR은 이웃 링크의 전송 결과에 영향을 받기 때문에 혼잡도가 비대칭인 링크에서 성능이 저하되는 문제가 발생하는데, IEEE 802.11be 표준에서는 이를 해결하기 위해 동기화 전송을 제안하였다. 본 논문에서는 Wi-Fi 7의 표준화 과정에서 제안한 몇 가지 동기화 전송 알고리즘의 동작을 살펴본 후 모의실험을 통해 비대칭 링크에서 비동기화 전송과 동기화 전송을 문제점을 확인하고 기존 동기화 전송의 처리를 저하 또는 단일 링크 단말과 다중 링크 단말 간의 형평성 문제를 완화하는 동기화 전송 방법을 제안한다.

I. 서론

IEEE 802.11be 기반의 Wi-Fi 7은 다수의 무선랜 기기들에게 만족할 만한 서비스 제공을 위해 중점을 두었던 Wi-Fi 6에서 충족하지 못한 높은 전송 속도와 짧은 지연 시간을 보장하기 위해 연구를 시작해 2024년 표준화가 완료될 예정이다[1]. Wi-Fi 7에서 제안한 기술 중 하나인 다중 링크 동작(Multi-Link Operation)은 기기에서 여러 링크를 동시에 사용해 높은 전송 속도와 짧은 지연 시간을 보장하기 위한 기술이다. 다중 링크 동작 방식에서 각 링크가 독립적으로 작동하여 송신과 수신에 동시에 가능한 경우를 STR(Simultaneous Transmission and Reception)로 정의하였다. 하지만 기기의 물리적 크기와 비용의 한계로 인해 하나의 링크에서 전송을 하는 경우 이웃 링크에서 채널을 감지할 수 없는 경우가 발생하는데 이 경우 동시 송수신이 제한되는데 이를 NSTR(Non-STR)로 정의하였다. IEEE 802.11be 표준에서는 NSTR의 송수신을 보호하고 채널 효율을 높이기 위해 몇 가지 동기화 전송 방식을 제안하고 있다. NSTR은 이웃 링크의 전송에 영향을 받기 때문에, 각 링크의 혼잡도가 비대칭인 링크에서 NSTR-MLD(Multi-Link Device)의 성능이 저하되는 문제점이 발생한다. 본 논문에서는 동기화 전송 알고리즘 동작을 간단히 살펴보고 모의실험을 통해 비대칭 링크가 NSTR-MLD에 끼치는 영향으로 인해 발생하는 성능 저하 문제와 MLD와 SLD(Single-Link Device)의 처리율 형평성 문제점을 확인하고 동기화 전송의 문제점을 개선할 수 있는 방법을 제안한다.

II. 본론



[그림1] 다중 링크 동기화 전송 알고리즘 예시

[그림1]은 IEEE 802.11be 표준에서 제안하고 있는 몇 가지 동기화 전송

알고리즘의 동작을 간략하게 보여준다[2]. NSTR-MLD의 경우 하나의 링크에서 전송을 시작하면 이웃 링크에서 채널을 감지할 수 없다. 따라서 모든 링크에서 전송 시작을 같은 시점으로 정렬하여 전송을 시도하는 동기화 전송을 제안하였다. [그림 1.(a)]에 표현한 WAIT 알고리즘에서는 어느 하나의 링크에서 채널 경쟁이 끝나더라도 이웃 링크에서 채널 접속 경쟁 중인 경우 전송을 지연하였다가 모든 링크에서 채널 경쟁이 끝나면 동기화 전송을 시도한다. 채널 경쟁이 끝나 대기하던 도중 채널 점유가 감지되면 다시 새로운 백오프 값을 뽑아 채널 경쟁을 시도한다. 만약 채널 접속이 끝난 시점에서 이웃 링크가 점유된 상태인 경우 단독 전송을 시도한다. [그림 1.(b)]에 나타난 PIFS(Point Coordination Function Inter Frame Space) 알고리즘은 하나의 링크에서 채널 경쟁이 끝나려고 할 때, 이웃 링크를 PIFS 동안 동시에 감지하여 두 링크 모두 유희하면 전송을 시도하고 그렇지 않으면 단독 전송을 시도한다. 이 때, 채널 경쟁을 마치지 않고 동기화 전송을 시도한 링크의 백오프 값은 그대로 유지한다. [그림 1.(c)]의 ePIFS(Enhanced PIFS) 알고리즘에서는 동기화 전송 시도 기준은 PIFS 알고리즘과 같다. 하지만 PIFS 알고리즘에서 채널 경쟁을 마치지 않고 동기화 전송을 시도한 링크 백오프 값을 그대로 유지하는 것과는 다르게 ePIFS 알고리즘에서는 경쟁을 마치지 못한 링크의 남은 백오프 값에 새로운 백오프 값을 뽑아 더한 후 채널 경쟁에 사용한다. 즉, ePIFS는 무임승차한 링크에 채널 점유에 불이익을 줘 다중 링크 점유의 형평성을 향상시키고자 한다.

NSTR-MLD는 하나의 링크에서 전송을 하는 동안 이웃 링크는 채널을 감지할 수 없어 SLD에 비하여 채널 경쟁을 할 수 있는 시간이 이웃 링크의 NSTR-MLD의 점유율에 따라 상대적으로 짧아진다. 따라서 한산한 링크에서 NSTR-MLD의 점유율이 많은 비대칭 링크의 경우 혼잡한 링크에서 NSTR-MLD의 채널 점유를 어렵게 한다. 이러한 링크 혼잡도의 비대칭성은 동기화 전송에 영향을 미칠 수 있는데, 이것은 각 동기화 전송 알고리즘의 특성에 따라 다르게 적용된다. WAIT 알고리즘은 채널 경쟁을 하는 링크 중 가장 긴 백오프 값을 기준으로 동작하기 때문에 한산한 링크에서 빠르게 전송할 수 있어도 혼잡한 비대칭 링크의 긴 백오프 값으로 인해 성능이 저하될 확률이 높다. PIFS와 ePIFS 알고리즘의 경우 혼잡한 링크와 관계없이 한산한 링크에서 채널 경쟁이 끝나는 경우 혼잡한 링크도 점유할 수 있어 긴 백오프 값을 가지고 경쟁하는 SLD보다 NSTR-MLD가 혼잡한 링크에서 무임승차할 확률이 높아 채널 경쟁에서 NSTR-MLD가 SLD보다 더 유리하기 때문에 형평성 문제를 야기할 수 있다.

본 논문에서는 혼잡한 링크에서 비동기화 전송방식 대비 처리율을 향상하면서 SLD와 NSTR-MLD 사이의 형평성 문제를 완화하는 것을 목적으로 한

다. 이를 위해 PIFS 알고리즘을 개선하여 채널 경쟁이 먼저 끝났을 때, PIFS 동작에 동기화 전송 조건을 추가하는 cPIFS (Conditional PIFS) 알고리즘을 제안한다. cPIFS는 PIFS 전송 조건을 만족했을 때, NSTR-MLD에서 무조건 동기화 전송을 시작하지 않고 동기화 전송 토권을 가지고 있는 경우 전송을 허용한다. NSTR-MLD가 토권을 얻는 기준은 다음과 같다. (전송 시간)×(혼잡한 링크의 단말 수)×(한산한 링크의 NSTR-MLD의 수)로 해당 시간이 지날 때마다 NSTR-MLD는 토권이 하나씩 증가하고 동기화 전송을 시도할 때마다 토권이 하나씩 감소한다. (혼잡한 링크의 단말 수)는 SLD와 형평성 문제를 고려해 SLD의 최소 전송 구간을 보장하기 위한 간격이고 (한산한 링크의 NSTR-MLD의 수)는 자신의 이웃 링크에서 전송하는 경우만 백오프를 할 수 없는 기간에 대한 보상을 위한 간격으로 일정 수의 동기화 전송 수를 보장하면서 SLD와의 형평성을 유지할 수 있다. 각 링크의 접속한 단말 수는 접속 단계에서 AP가 단말에 알려주고 더 많은 단말이 접속한 링크를 혼잡한 링크로 결정한다.

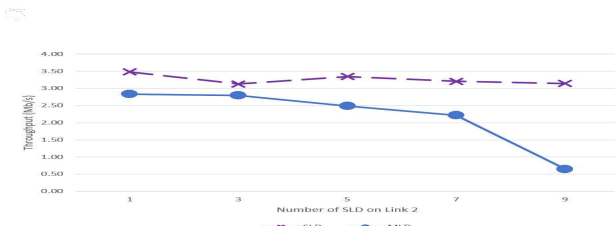
III. 모의실험

<표1> 모의실험 환경

파라미터	값
모의실험 시간	10 sec
주파수 대역	5 GHz
다중 링크 수	2개
링크 1 단말 수	MLD 9~1대
링크 2 단말 수	10대 (MLD 9~1대, SLD 1~9대)
MCS	256 QAM (98 Mb/s)
프레임 크기	1000 bytes
대역폭	20 MHz
SIFS	18 μsec

<표1>은 모의실험에서 사용한 주요 파라미터와 값을 보여준다. 모의실험에서는 두 개의 링크를 고려하고 링크1에는 NSTR-MLD가 9대에서 1대까지 2대씩 줄어들고 링크2에서는 줄어든 NSTR-MLD 만큼 SLD가 1대에서 9대까지 2대씩 증가시키면서 (즉, 링크2에서의 전체 단말수는 10대로 고정된 상태) 처리율을 확인하였다. 모든 단말은 서로를 감지할 수 있는 이상적인 채널 상태와 항상 보낼 데이터가 있는 상태를 가정하였으며 상향링크 전송만 고려하였다. 데이터 프레임의 크기는 1000 bytes로 설정하였으며, MCS (Modulation and Coding Scheme)는 모든 단말에서 동일하다고 가정하였다.

1. 비동기화 전송에서의 링크 혼잡도 비대칭성 영향



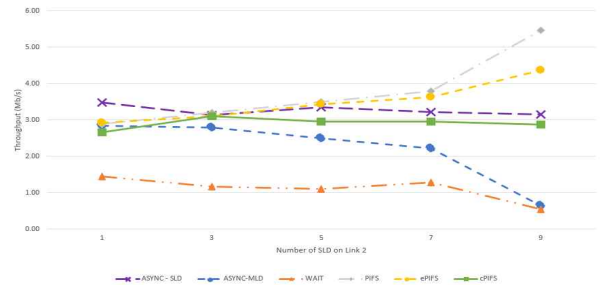
[그림2] 링크 혼잡도 변화에 따른 비동기화 전송 평균처리율

[그림2]는 링크2에서 NSTR-MLD의 수를 9대에서 2대씩 SLD로 교체하면서 링크1과 링크2의 혼잡도를 비대칭으로 만들었을 때, 링크2의 SLD 평균처리율과 NSTR-MLD의 평균처리율을 비교한 그래프이다. SLD의 수가 늘어날수록 링크 1에서 동작하는 단말의 수는 줄어들고 링크2에서 동작하는 단말의 수는 10대로 유지된다. 비대칭성이 가장 낮을 때 (즉, 링크2의 SLD 수가 1일 때), SLD와 NSTR-MLD의 처리율 차이는 0.65 Mb/s 정도에 불과하지만 비대칭성이 가장 높을 때 (즉, 링크2의 SLD 수가 9일 때), 그 차이는 2.50 Mb/s 이상으로 증가하였다. 또한 SLD수가 1에서 9로 증가함에 따라 SLD의 평균처리율은 9.7% 소폭 감소했지만, NSTR-MLD의 평균처리율은 77.1% 대폭 감소하였다.

2. 링크 혼잡도 비대칭성의 동기화 전송 영향

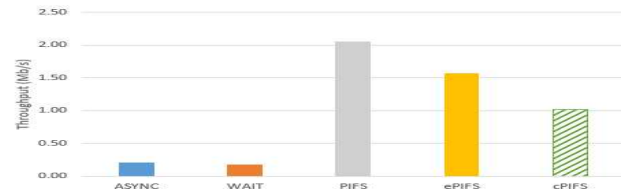
[그림3]은 [그림2]와 동일한 환경에서 동기화 전송을 적용해 링크2의 NSTR-MLD 처리율을 비교한 그래프이다. [그림3]의 ASYNC-SLD와 ASYNC-MLD는 [그림2]의 그래프와 같다. WAIT는 동기화 전송 알고리즘 가운데 가장 낮은 처리율을 보여주며 링크2의 SLD가 1~5일 때

ASYNC-MLD 대비 1/2 이하 수준으로 상당한 성능 저하를 보인다. 반면, PIFS와 ePIFS는 모든 구간에서 비동기화 전송(ASYNC-MLD)보다 높은 처리율을 보여주는데 혼잡한 링크에서 NSTR-MLD의 성능 저하 문제는 해결했다고 볼 수 있다. 그러나 링크 혼잡도의 비대칭성이 높아질수록 ASYNC-SLD의 처리율보다 NSTR-MLD의 처리율이 높아지는데, 특히 SLD가 9대인 경우, PIFS와 ePIFS의 NSTR-MLD 처리율은 ASYNC-SLD 처리율보다 각각 57.7%, 72.1% 높아 SLD와 NSTR-MLD의 형평성 문제가 발생했다고 볼 수 있다.



[그림3] 링크 혼잡도 변화에 따른 비동기화/동기화 전송 평균처리율

[그림 3]에서 보듯이 cPIFS는 이러한 형평성 문제를 크게 완화시킨다. SLD 단말수가 1에서 9로 증가함에 따라 비대칭성이 높아져 ASYNC-MLD 경우 처리율이 77.1% 감소한데 반해, cPIFS의 경우 처리율이 거의 일정한 값을 가지며, cPIFS의 NSTR-MLD 처리율은 SLD의 처리율 대비 최대 10.6%에서 최소 2.0% 차이로 큰 차이를 보이지 않는다.



[그림4] 비대칭 링크에서 SLD 평균처리율 대비 NSTR-MLD 평균처리율

[그림4]는 링크2의 SLD가 9대일 때 (가장 비대칭성이 높은 경우), SLD의 평균처리율 대비 NSTR-MLD 평균처리율 비율이다. WAIT는 ASYNC와 비슷한 수준으로 NSTR-MLD의 처리율이 SLD 대비 0.17배 정도에 그치는데 반해 PIFS와 ePIFS의 경우 NSTR-MLD의 처리율이 SLD에 비해 2배, 1.5배 이상이었다. cPIFS의 경우 조건부적인 동기화 전송으로 인해 SLD와 NSTR-MLD가 거의 비슷한 처리율을 가지고 있어 형평성이 유지됨을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 링크 혼잡도의 비대칭성이 동기화 전송에 끼치는 영향을 분석하고 이로 인해 발생하는 MLD와 SLD의 형평성 저하 문제를 해결할 수 있는 방법을 제안하였다. 모의실험 결과 링크 비대칭성이 증가할수록 WAIT 알고리즘의 경우 NSTR-MLD의 처리율이 SLD 대비 현저히 낮게 나타나며, PIFS와 ePIFS의 경우 반대로 NSTR-MLD의 처리율이 SLD 대비 1.5~2배 정도 높게 나타나 형평성이 저하되었다. 제안한 cPIFS는 이러한 형평성 저하 문제를 효과적으로 해소함을 확인하였다. 향후 차세대 무선 통신 표준인 Wi-Fi 7에서 다중 링크 동작을 이용하여 데이터 속도 증가와 지연 감소를 최대화할 수 있도록 다중 링크를 효율적으로 이용할 수 있는 채널 접속 방법에 대해 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

[1] 손주형, et al. "7 세대 무선랜 IEEE 802.11 be 표준화 동향." *한국통신학회지 (정보와통신)* 38.7 (2021): 40-45.
 [2] 권람, 서호준, 박은찬. "차세대 무선랜 Wi-Fi 7의 다중 링크 동기화 전송 성능 분석." *한국통신학회 학술대회논문집*(2023): 661-662.