

PRIME Wi-Fi: Wi-Fi의 멀티링크 효율성을 위한 예측적 리소스 인텔리전스

김지하, 박현희*

명지대학교

{ yaki5896, hhpark*}@mju.ac.kr

PRIME Wi-Fi: Predictive Resource Intelligence for Multi-Link Efficiency in Wi-Fi

Jiha Kim, Hyunhee Park *

Myongji Univ.

요약

Wi-Fi 7의 MLO(Multi-Link Operation)와 Wi-Fi 8의 C-MAP(Coordinated Multi-AP) 기술은 다중 주파수/AP 활용으로 성능을 향상시키지만, 기존 EDCA backoff의 한계로 최적 성능을 달성하지 못한다. 본 논문은 PRIME Wi-Fi backoff mechanism을 제안하며, 이는 (1) EDCA 기반 CW 초기화, (2) CAB(Coordinated AP)를 통한 AP 간 협력적 backoff, (3) MLAB(Multi-Link Adaptive Backoff)를 통한 링크별 적응형 backoff, (4) PBO(Predictive Backoff Optimization)를 통한 예측 최적화, (5) 주파수 대역간 균형 관리의 5단계 통합 접근법을 사용한다. 시뮬레이션 결과 PRIME Wi-Fi는 기존 DCF 대비 약 14배 처리량 향상, 0.79 QoE 점수, 0.58 backoff 효율성을 달성한다. 또한, 5-6GHz STR 제약 조건에서도 안정적인 성능을 유지하여 차세대 Wi-Fi의 효율적 리소스 관리 솔루션임을 입증한다.

I. 서론

Wi-Fi 기술은 IEEE 802.11be (Wi-Fi 7)와 IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8)으로 개선되어 갔다. Wi-Fi 7[1]은 MLO(Multi-Link Operation)를 이용하여 단일 STA가 2.4, 5, 6GHz를 동시에 사용할 수 있게 되었다. Wi-Fi 8[2]은 C-MAP(Coordinated Multi-AP) 기술을 이용하여 여러 AP 간 협력을 가능하게 한다. 하지만 기존 EDCA(Enhanced Distributed Channel Access) backoff mechanism은 단일 링크 환경으로 설계되어 MLO 환경에서의 backoff 비효율성이 존재한다. C-MAP 환경에서는 동기화 문제, 5-6GHz에서는 STR(Simultaneous Transmit and Receive) 제약[3]이 고려되지 않은 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 독립 backoff[4], ML/MAP C-JT[5], 적응형 backoff 조정[6]이 제안되었다. 하지만 멀티 링크와 MAP 환경의 복잡한 상호 작용을 종합적으로 고려한 QoE(Quality of Experience) 최적화에 대한 연구가 부족하다. 따라서 본 논문에서는 이동 환경에서 멀티 링크와 MAP 간 상호작용을 통한 QoE 최적화와 backoff 효율성 향상을 목표로 한다.

II. 본론

PRIME Wi-Fi(Predictive Resource Intelligence for Multi-Link Efficiency in Wi-Fi)는 MLO와 C-MAP 환경에서의 backoff mechanism을 최적화하기 위해 5단계 통합 접근법을 제안한다. 시스템은 복수의 AP와 STA로 구성되며, 각 AP는 여러 주파수 대역(2.4, 5, 6GHz)에서 동작하고, Partial-STR 제약을 고려한 링크 관리를 수행한다.

EDCA 기반 CW 초기화 단계에서는 IEEE 802.11 표준의 EDCA 메커니즘[7]을 기반으로 TC(Traffic Class)별 QoS 요구사항에 맞춰 초기화한다. CAB(Coordinated AP Backoff) 단계에서는 C-MAP 환경에서 AP 간 우선순위에 따른 협력적 백오프를 제공한다. AP의 우선순위 점수 $P_{score}(a)$ 는 트래픽 부하,

링크 품질, AP별 특성을 고려하여 계산된다. 여기서 α, β, γ 는 가중치 계수를 의미한다.

$$P_{score}(a) = \alpha \cdot L_{avg}(a) + \beta \cdot \frac{D(a, s)}{R_{coverage}} + \gamma \cdot \frac{N_{load}(a)}{N_s}$$

MLAB(Multi-Link Adaptive Backoff)에서는 각 링크의 특성을 반영한 적응형 백오프를 제공한다. 링크별 백오프는 채널 상태, 충돌 확률, 링크 품질을 종합적으로 고려한다.

$$S_{link}(l) = (1 - P_{loss}(l)) \cdot W_{freq}(f_l) \cdot \frac{1}{1 + (1 - U_{rate}(l)) \cdot \omega_1}$$

PBO(Predictive Backoff Optimization)에서는 슬라이딩 윈도우 만큼 시간적 특성을 기반으로 예측한 동적 백오프 최적화를 수행한다. 시간적 특성을 고려한 예측 함수 $\theta(a)$ 는 $0.5 + 0.5 \cdot Prediction(a)$ 로 계산한다. 이를 통해 적응 계수 $F_{adapt}(a)$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$F_{adapt}(a) = \begin{cases} 1 + \lambda_1 \cdot \theta(a) \\ 1 - \lambda_2 \cdot \theta(a) \\ 1 + \lambda_3 \cdot (C_{avg}(a) - 0.5) \cdot \theta(a) \end{cases}$$

최종적으로 주파수 균형 관리 과정에서 링크간 로드 밸런싱을 위해 주파수 대역별 사용률을 모니터링하고, 균형 계수 $B_{factor}(l)$ 을 통해 최종 CW 범위를 조정한다.

$$B_{factor}(l) = 1 - \mu \cdot \frac{U_{total}(f_l)}{\max_{f'} U_{total}(f')}$$

III. 실험 결과

본 논문에서는 PRIME Wi-Fi의 성능 검증을 위해 5가지 백오프 메커니즘을 비교 분석한다. 기준은 IEEE 802.11 표준의 Distributed Coordination Function (DCF) 백오프를 사용한다. Wi-Fi 7의 Basic MLO는 주파수 대역을 동시에 활용하되 각 링크가 독립적으로 백오프를 수행한다. Wi-Fi 8의 C-MAP은 가장 가까운 AP를 우선적으로 선택하는 기본 협력 메커니즘을 사용한다. 또한, 5, 6GHz 간 STR 제약을 고려한 STR-Aware 백오프 메커니즘을 비교한다. 표 1은 각 단계별로 시뮬레이션에서 설정한 상수 값을 나타낸다.

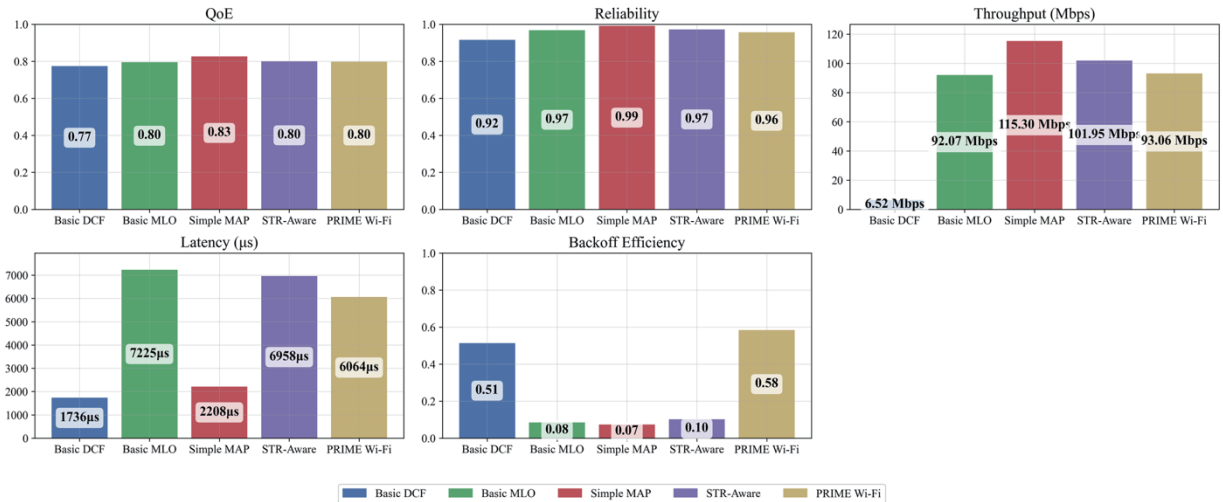


그림 1. Wi-Fi 백오프 메커니즘의 성능 비교

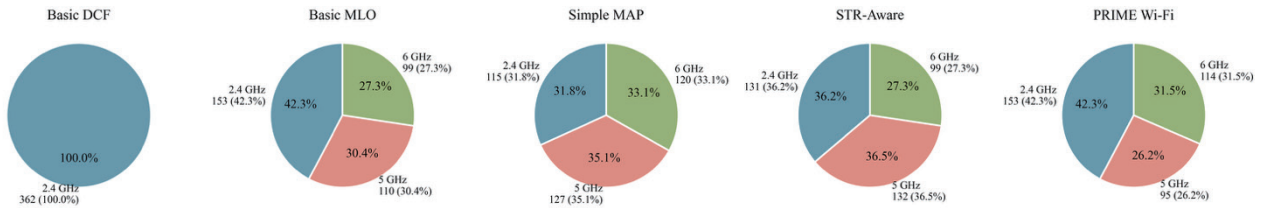


그림 2. 주파수 대역 사용 분포

표 1. PRIME Wi-Fi 단계별 사용 파라미터 및 값

Parameter	Indicator	Value
QoS 우선순위 가중치	α, β, γ	0.5, 0.3, 0.2
CAB 조정 파라미터	$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$	6, 4, 2, 2
MLAB 조정 및 보정항	ω_1, ω_2	0.5, 0.1
MLAB 확장 계수	ψ	4
슬라이딩 윈도우	n	10
주파수 균형 강도 계수	μ	0.8
PBO 트래픽 충돌 가중치	$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	0.2, 0.2, 0.1

그림 1은 각 백오프 메커니즘에 대하여 측정 기간동안 평균 성능을 보여준다. PRIME Wi-Fi는 Basic DCF 대비 약 14 배의 처리량 향상을 보인다. 이동 평균의 분석 결과, 모바일 환경에서도 안정적인 성능을 유지하는 것으로 보인다. 특히, PRIME Wi-Fi는 handover 발생 시에도 처리량 감소폭이 다른 메커니즘 대비 현저히 낮은 것을 확인할 수 있다. 그림 2는 주파수 대역에 대한 사용 비율을 분석한다. PRIME Wi-Fi의 주파수 대역별 사용률은 2.4, 5, 6GHz 각각에 대하여 42.3%, 26.2%, 31.5%로 나타난다. 이는 단일 링크를 사용하는 Basic DCF를 제외한 다른 메커니즘과 유사하게 나타난다. 하지만, 이동 과정에서 생기는 handover 시 측정되는 백오프 효율성이 다른 것을 그림 1에서 알 수 있다. 이는 백오프 효율성을 달성하기 위해 시점에 따라 적절히 분배되는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 차세대 Wi-Fi 환경의 멀티 링크 효율성을 위한 PRIME Wi-Fi 백오프 메커니즘을 제안한다. PRIME Wi-Fi는 5 단계를 걸쳐 최적의 CW 범위를 도출한다. 하지만 PBO 기법에서 과거 통신 기록을 기반으로 CW의 범위를 산출하는 문제점이 존재한다. 이는 기록되는 과거에서의 일관성의 영향을 크게 받으며 필요한 시점에서 즉각적인 대처가 늦어진다는 문제가 있다. 향후 연구에서는 이러한

문제점을 보완하기 위해 기계학습 혹은 딥러닝 기반의 PBO 기법을 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

Put sponsor acknowledgments.

참고 문헌

- [1] C. Deng, X. Fang, X. Han, X. Wang, L. Yan, R. He, Y. Long, and Y. Guo, "IEEE 802.11 be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities," IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 4, pp. 2136–2166, Nov. 2020.
- [2] L. Galati-Giordano, G. Geraci, M. Carrascosa, and B. Bellalta, "What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11 bn ultra high reliability," IEEE Commun. Mag., vol. 62, no. 8, pp. 126–132, Aug. 2024.
- [3] D. Lopez-Perez, A. Garcia-Rodriguez, L. Galati-Giordano, M. Kasslin, and K. Doppler, "IEEE 802.11 be extremely high throughput: The next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11 ax," IEEE Commun. Mag., vol. 57, no. 9, pp. 113–119, Sep. 2019.
- [4] A. Lopez-Raventós and B. Bellalta, "Multi-link operation in IEEE 802.11 be WLANs," IEEE Wireless Commun., vol. 29, no. 4, pp. 94–100, Aug. 2022.
- [5] J. Kim and H. Park, "Multi-Link/Multi-AP Coordination based Joint Transmission for Seamless Roaming in IEEE 802.11 bn (Wi-Fi 8)," in Proc. Int. Conf. Information and Communication Technology Convergence (ICTC 2024), pp. 1–6, Jeju Island, Korea, Oct. 2024.
- [6] K. Huang, L. Huang, Y. Quan, H. Du, C. Luo, L. Lu, and R. Hou, "Multi-link channel access schemes for IEEE 802.11 be extremely high throughput," IEEE Commun. Standards Mag., vol. 6, no. 3, pp. 46–51, Sep. 2022.
- [7] IEEE 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, IEEE Std 802.11–2020, 2021.