

IEEE 802.11ax 무선랜 상향링크 큐잉 지연 감소를 위한 스케줄링 자격 유지 기법

김태희, 권람, 박은찬

동국대학교 - 서울

wanghope@dgu.ac.kr, lamk@dgu.edu, ecpark@dgu.ac.kr

Scheduling Eligibility Retention Method for Reducing Queuing Delay in Uplink IEEE 802.11ax WLANs

TaeHee Kim, Lam Kwon, Eun-Chan Park

Dongguk University-Seoul

요약

IEEE 802.11ax 무선랜 표준은 OFDMA를 통해 다중 사용자의 동시 전송을 지원한다. AP는 단말로부터 수신한 BSR(Buffer Status Report) 정보를 기반으로 상향링크 자원을 스케줄링한다. 이를 위해 전체 RU(Resource Unit)를 RA-RU(Random Access-RU)와 SA-RU(Scheduled Access-RU)로 구분하여 운용한다. AP는 BSR 정보의 보유 여부에 따라 단말을 구분하여 자원을 할당한다. BSR 정보를 보유하지 않은 단말은 UORA 경쟁을 통해 RA-RU를 점유하여 BSR을 전달하는 요청 기반 방식을 사용한다. 반대로 BSR 정보를 보유한 단말은 SA-RU를 할당받아 데이터를 전송하면서 BSR을 피기백하는 비요청 기반 방식을 사용한다. 비포화 네트워크 환경에서는 단말의 버퍼가 빈번하게 비워지면서 반복적인 UORA 경쟁이 발생하고, 이로 인해 큐잉 지연이 증가한다. 본 논문에서는 버퍼가 비워진 후에도 일정 시간 동안 스케줄링 자격을 유지함으로써 UORA 재경쟁을 회피하는 SERM(Scheduling Eligibility Retention Method) 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안 기법이 다양한 트래픽 환경에서 큐잉 지연을 효과적으로 감소시키면서도 자원 활용 효율과 시스템 공정성을 유지함을 확인하였다.

I. 서론

IEEE 802.11ax 표준은 상향링크 다중 사용자 전송 효율을 향상시키기 위해 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 방식을 도입하였다. AP(Access Point)는 TF(Trigger Frame)을 통해 단말에 자원을 할당하며, 단말로부터 수신한 BSR(Buffer Status Report) 정보를 기반으로 상향링크 자원을 스케줄링하며, 이를 통해 다수의 단말이 동시에 데이터를 전송할 수 있도록 제어한다.

패킷이 간헐적으로 발생하는 비포화 네트워크 환경에서는 버퍼가 빈번하게 비워지며 반복적인 UORA(Uplink OFDMA-based Random Access) 경쟁이 발생한다. 이러한 경쟁 과정은 실제 데이터 전송과 무관한 제어 오버헤드를 증가시키며, 결과적으로 상향링크 큐잉 지연을 악화시키는 주요 원인이 된다. 선행 연구에서는 UORA 경쟁 빈도를 줄이기 위해 단말이 보고하는 BSR 값을 인위적으로 조정하는 기법을 제안하였으나[1], 이는 실제 버퍼 상태를 왜곡하여 AP의 스케줄링 정확도를 저하시킬 수 있고, 트래픽 특성에 따라 파라미터 최적화가 어렵다는 한계를 가진다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, BSR 정보를 왜곡하지 않으면서 버퍼가 비어 있는 상태에서도 일정 시간 동안 스케줄링 자격을 유지함으로써 UORA 재경쟁을 회피하는 SERM(Scheduling Eligibility Retention Method) 기법을 제안한다. 제안 기법은 자원 할당 전략에 따라 SERM-∞, SERM-N, SERM-P의 세 가지 세부 기법으로 구분된다. 모의실험 결과, SERM-P는 SA-RU 활용률을 90% 이상 유지하면서 평균 큐잉 지연을 최대 68% 감소시켰다.

II. 문제 분석

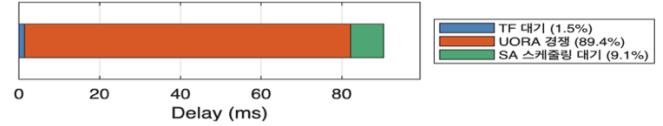
1. BSR 기반 상향링크 자원 할당 절차

IEEE 802.11ax 상향링크에서 RU(Resource Unit)는 RA-RU(Random Access-RU)와 SA-RU(Scheduled Access-RU)로 구분되어 운용된다. AP는 단말로부터 수신한 BSR 정보를 기반으로 SA-RU 할당 대상을 결정하며, BSR 정보를 보유한 단말을 스케줄링 대상으로 설정한다.

스케줄링 대상이 아닌 단말은 요청 기반(solicited) BSR 방식을 사용한다. 해당 단말은 UORA 경쟁을 통해 RA-RU를 점유한 후 BSR을 명시적으로 전달하며, 이후 AP로부터 SA-RU를 할당받아 데이터를 전송한다. 반면, 스케줄링 대상 단말은 비요청 기반(unsolicited) BSR 방식을 통해 SA-RU를 할당받는다. 이 과정에서 데이터 전송과 함께 BSR을 피기백(piggyback)하므로, 추가적인 경쟁 절차 없이 다음 전송 기회를 유지할 수 있다[2].

2. 비포화 환경에서의 UORA 재경쟁 문제

비포화 환경에서는 데이터 전송 후 단말의 버퍼가 빈번하게 소진되어 스케줄링 대상에서 제외되는 상황이 반복적으로 발생한다. 이 상태에서 새로운 패킷이 도착할 경우, 단말은 비요청 기반 BSR 방식을 사용할 수 없으므로 요청 기반 BSR 전달을 위해 다시 UORA 경쟁을 수행해야 한다. 이러한 과정의 반복은 제어 오버헤드를 누적시키며, UORA 경쟁 지연으로 인해 전체 큐잉 지연을 증가시키는 주요 원인이 된다.



[그림 1] 상향링크 큐잉 지연의 구성 요소별 비중

[그림 1]은 IV절에서 설명하는 실험 환경에서 발생하는 상향링크 큐잉 지연을 구성 요소별로 분석한 결과를 나타낸다. 분석 결과, SA-RU 스케줄링 대기 시간은 전체 큐잉 지연의 약 9.1%에 불과한 반면, UORA 경쟁 과정이 약 89.4%를 차지하였다. 이는 반복적인 UORA 경쟁이 큐잉 지연의 지배적인 원인임을 의미하며, 이를 효과적으로 회피하기 위한 메커니즘의 필요성을 시사한다.

III. 제안하는 SERM 기법

본 논문에서는 UORA 재경쟁으로 인한 큐잉 지연을 완화하기 위해 SERM(Scheduling Eligibility Retention Method) 기법을 제안한다. 제안 기법의 핵심은 단말의 BSR이 0이 되어도 즉시 스케줄링 대상에서 제외하지 않고, 스케줄링 자격 유지 시간 (T_{ret}) 동안 UORA 경쟁 없이 SA-RU를 선제적으로 할당하는 것이다. 이로써 단말은 T_{ret} 이내에 새로운 패킷이 도착할 경우 UORA 경쟁 과정을 생략하고 즉시 SA-RU를 할당받을 수 있다.

그러나 자격 유지 시간 동안 SA-RU가 할당되었음에도 실제 데이터 전송이 발생하지 않는 경우에는 자원 낭비가 발생할 수 있다. 따라서 제안 기법은 큐잉 지연 감소 효과와 자원 활용 효율 간의 상충 관계를 고려하여, 자격 유지 시간 동안의 자원 할당 정책에 따라 세 가지 방식으로 구분된다. 각 기법은 자격 유지 시간 중 단말의 스케줄링 자격을 유지하거나 회수하는 조건이 상이하다.

- SERM-∞ (Infinite) 방식은 T_{ret} 동안 단말의 SA-RU 스케줄링 자격을 제한 없이 유지하여, 새로운 패킷 도착 시 즉각적인 전송을 가능하게 한다. 그러나 실제 전송할 데이터가 없는 경우에도 지속적으로 자원이 할당되어 유휴 할당이 빈번하게 발생할 수 있다.
- SERM-N (N-limited) 방식은 T_{ret} 동안 SA-RU 할당을 유지하되,

유휴 할당 횟수가 N회를 초과하면 스케줄링 자격을 회수하고 단말을 RA 모드로 전환한다. 이를 통해 불필요한 자원 낭비를 제한한다.

- SERM-P (Pending) 방식은 T_{ret} 동안 SA-RU 할당을 보류하고, 자격 유지 시간이 만료되는 시점에 1회의 SA-RU 할당을 통해 단말의 상태를 확인한다. 이는 유휴 할당을 최소화하면서도 UORA 재경쟁 회피 효과를 유지한다.

AP는 BSR이 존재하는 단말에게 SA-RU를 우선 할당하고, 잔여 자원이 존재할 경우에 한해 SERM 적용 단말을 스케줄링한다. SERM-∞와 SERM-N의 경우 자격 만료 시점이 임박한 단말에 우선순위를 부여하며, SERM-P에서는 자격 유지 시간이 만료된 단말을 대상으로 할당을 수행한다. 자원 부족으로 인해 연속된 두 전송 구간에서 SA-RU를 할당받지 못한 단말은 RA 모드로 전환된다.

IV. 모의실험 및 성능 분석

본 장에서는 제안하는 SERM 기법의 성능을 검증하기 위해 모의실험을 수행하고, 큐잉 지연 및 SA-RU 활용률 측면에서 기존 방식(Baseline)과 비교 분석한다. 모의실험 환경은 이상적인 채널을 가정하며, 전송 실패는 오직 RU 충돌로 인해서만 발생한다고 가정한다. 모든 단말은 동일한 데이터 프레임 크기와 MCS를 사용하며, AP는 수신한 BSR 정보를 기반으로 SA-RU를 할당한다. 모의실험은 5회 반복 수행하였으며, 큐잉 지연은 반복 결과를 누적하여 분포를 분석하였다.

<표 1> 모의실험 환경

모의실험 시간	30 sec
단말 수	20
OCWmin, OCWmax	15, 31
대역폭	20MHz
전체 RU 수	9
RA-RU 수	1
SA-RU 수	8
RU 당 전송 속도	6.67 Mb/s
슬롯 시간	9 μsec
SIFS 시간	16 μsec
PHY 헤더 전송 시간	40 μsec
트리거 프레임 전송 시간	100 μsec
Block Ack 전송 시간	68 μsec
데이터 프레임 크기	2000 byte

실제 네트워크 트래픽의 간헐성과 버스트 특성을 반영하기 위해 Pareto On/Off 트래픽 모델을 적용하였다. Pareto 분포는 heavy-tailed 특성을 통해 실제 네트워크 트래픽의 버스트성을 효과적으로 모사하며, 기존의 Poisson 모델이 가지는 한계를 보완한다[3]. 본 실험에서는 shape parameter $\alpha = 1.5$ 를 적용하여 유한한 평균값을 유지하면서도 트래픽의 버스트성을 반영하였다.

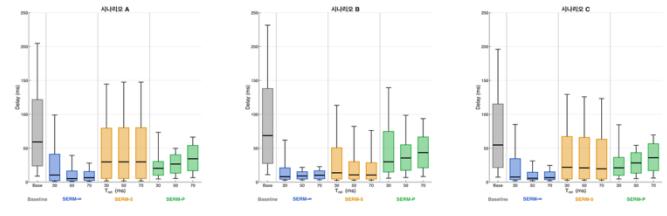
다양한 서비스 환경을 반영하기 위해 <표 2>과 같이 세 가지 시나리오를 구성하였다.

<표2> 실험 시나리오 파라미터

시나리오	ρ	μ_{off} (ms)	μ_{on} (ms)	λ (pkt/s)	시스템 부하
A	0.30	50	21	100	21%
B	0.50	50	50	200	69%
C	0.15	50	9	400	42%

각 시나리오는 단말의 트래픽 상태를 On/Off 모델로 가정하여, On 상태 확률 ρ 와 평균 Off 지속시간 μ_{off} 를 기준으로 설정하였다. 평균 On 지속시간 μ_{on} 은 $\rho = \mu_{on} / (\mu_{on} + \mu_{off})$ 관계로부터 도출되며, 패킷 도착률 λ 는 On 구간 동안에만 적용된다.

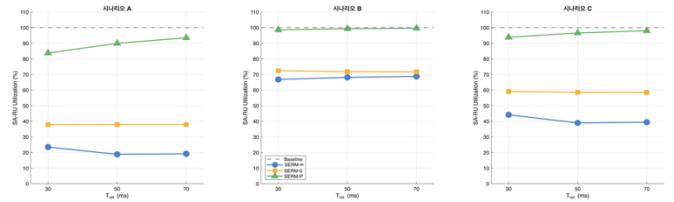
시나리오 A는 상태 전환이 빈번한 저부하(VoIP), 시나리오 B는 지속적인 전송이 이루어지는 고부하(Video), 그리고 시나리오 C는 일시적인 데이터 폭증이 발생하는 버스트(IoT) 환경의 특성을 반영한다. 스케줄링 자격 유지 시간 T_{ret} 은 단말이 Off 구간에서 버퍼가 비어질 가능성을 고려하여 평균 Off 지속시간($\mu_{off}=50\text{ms}$)을 기준으로 30, 50, 70ms로 설정하여 모의실험을 진행하였다. SERM-N에서 유휴 할당 제한 횟수 N은 5로 설정하였다.



[그림 2] 큐잉 지연 분포 박스플롯

[그림 2]는 시나리오별 큐잉 지연 분포를 박스플롯으로 나타낸 결과이다. 모든 시나리오에서 제안하는 SERM 기법들은 Baseline 대비 유의미한 지연 감소 효과를 보였다. 시나리오 A에서 기존 방식의 평균 큐잉 지연은 88.8ms로 나타났으나, T_{ret} 이 50ms인 조건에서 SERM-∞는 15.6ms로 약 82%의 지연 감소를 달성하였다. SERM-P 역시 동일 조건에서 28.8ms의 평균 큐잉 지연을 기록하며 68%의 감소 효과를 보였다.

꼬리 지연을 나타내는 90% 값에서 Baseline은 206.4ms에 달하며 큰 지연 변동성을 보인 반면, SERM-P는 49.9ms로 150ms 이상의 지연 단축 효과를 나타냈다. 이러한 결과는 비포화 환경에서 빈번하게 발생하는 UORA 재경쟁에 따른 지연 불확실성이 SERM-P를 통해 효과적으로 완화될 수 있음을 시사한다.



[그림 3] SA-RU 활용률 (%)

[그림 3]은 T_{ret} 에 따른 시나리오별 SA-RU 활용률 추이를 나타낸다. SA-RU 활용률은 할당된 SA-RU 중 실제 데이터 전송이 발생한 비율로 정의한다. SERM-∞ 방식은 버퍼가 비어 상태에서도 지속적으로 자원을 할당하므로, 시나리오 A에서 약 19%로 가장 낮은 SA-RU 활용률을 보였다. 반면, SERM-P는 T_{ret} 만료 시점에 1회의 SA-RU 할당만을 수행하여 불필요한 자원 낭비를 최소화하고, Baseline에 근접한 높은 활용률을 유지하였다.

한편, 모든 기법의 처리율(Throughput)은 비포화 환경 특성상 Baseline과 대등한 수준을 유지하였으며, Jain's Fairness Index 또한 전 시나리오에서 0.95 이상을 기록하여 제안 기법으로 인해 단말 간 공정성이 저하되지 않음을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 비포화 네트워크 환경에서 UORA 재경쟁으로 인한 큐잉 지연을 완화하기 위해 SERM 기법을 제안하였다. 제안 기법은 버퍼가 비어 있는 상태에서도 일정 시간 동안 스케줄링 자격을 유지하여 반복적인 UORA 경쟁을 회피한다. 모의실험 결과, SERM-P는 SA-RU 활용률 저하를 최소화하면서 큐잉 지연을 효과적으로 감소시켰으며, 지연 성능과 자원 활용 효율 간의 균형을 달성하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-학석사연계 ICT 핵심인재양성 지원을 받아 수행된 연구임. (IITP-2024-00436744)

참 고 문 헌

- [1] 김태희, 유연우, 권람, 박은찬, "IEEE 802.11ax 무선랜의 상향링크 큐잉 지연 감소를 위한 버퍼 상태 보고 기법", 한국통신학회 학술대회 논문집, 2025.
- [2] Kim, Youngboo, Lam Kwon, and Eun-Chan Park, "OFDMA backoff control scheme for improving channel efficiency in the dynamic network environment of IEEE 802.11ax WLANs," *Sensors* 21.15 (2021): 5111.
- [3] Sarkar, N. I., "Impact of Traffic Arrival Distributions on an 802.11 Ad Hoc Network: Modeling and Performance Study," *JSAT*, 2012.