

단말별 전송 이력 기반 IEEE 802.11ax UORA 적응형 접속 제어

윤수빈, 박은찬
동국대학교

yoonsoobin01@gmail.com, ecpark@dgu.ac.kr

Adaptive Access Control for IEEE 802.11ax UORA Based on Per-Station Transmission History

Soobin Yoon, Eun-Chan Park
Dongguk Univ.

요 약

IEEE 802.11ax 상향링크 OFDMA 무작위 접속(Uplink OFDMA Random Access, UORA) 환경에서 다수 단말이 무작위 접속용 자원 단위(random access resource unit, RA-RU)에 경쟁적으로 접근할 때, 표준의 이진 지수 백오프(binary exponential backoff, BEB) 기반 OFDMA 경쟁 윈도우(OFDMA contention window, OCW) 갱신 규칙은 혼잡도 변화에 둔감하여 충돌 억제와 자원 활용도 확보를 동시에 만족시키기 어렵다. 본 논문은 각 단말이 충돌 확률과 접근 보류(미시도) 확률을 추정하고, 이를 시그모이드 정규화한 보정계수로 접근 제어 파라미터와 OFDMA 경쟁 윈도우를 적응적으로 갱신하는 기법을 제안한다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 성능을 평가한다. 제안한 기법에서는 OFDMA 백오프 카운터(OFDMA backoff counter, OBO) 감소와 자원 단위(resource unit, RU) 무작위 선택 등 채널 접근 절차를 표준 UORA와 동일하게 따른다. 또한 전역 통계는 사용하지 않는다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 표준 대비 처리량을 평균 약 15.1%, (OCWmin, OCWmax)가 (31, 511)과 (63, 1023) 설정에서 각각 최대 약 50.0%, 약 56.8% 향상시켰다.

1. 서 론

IEEE 802.11ax는 상향 링크OFDMA에서 트리거 프레임(trigger frame, TF)을 통해 일부 자원 단위(resource unit, RU)를 무작위 접속용 RU(random access resource unit, RA-RU)로 할당하고, 단말이 상향링크OFDMA 무작위 접속(Uplink OFDMA Random Access, UORA) 방식으로 경쟁 접근하도록 한다. UORA에서 각 단말은OFDMA 백오프 카운터(OFDMA backoff counter, OBO)를 감소시키다가 접근 조건을 만족하면RA-RU를 무작위로 선택해 전송하며, 동일RA-RU를 둘 이상의 단말이 동시에 선택해 전송하는 경우 해당RA-RU에서 충돌이 발생한다. 표준은 이진 지수 백오프(binary exponential backoff, BEB)에 따라 충돌 시 OFDMA 경쟁 윈도우(OFDMA contention window, OCW)를 약2배 증가시키고, 성공 시OCW를 초기값으로 재설정하여 경쟁 강도를 조절한다. 그러나 표준BEB는 혼잡도 변화가 빠르거나 단말 수가 증가하는 상황에서 충돌 억제와RU 활용도 확보를 동시에 만족시키기 어려울 수 있다. 본 연구는 최근W회의 접근 기회(각각TF에 의해 개시됨)에서 단말이 관측한 RA-RU 충돌 및 접근 보류 이력을 이용해 관련 확률을 추정하고, 시그모이드 정규화 기반 보정계수를 통해 접근 제어 파라미터와OCW를 적응적으로 갱신하는 기법을 제안한다. 또한 저부하에서 RA-RU 유희가 증가할 때 RU 활용도를 회복하는 방향으로 제어를 조정하여 처리량 향상을 도모한다.

II. 표준UORA 분석 및 제안 기법

1. 표준BEB 기반UORA 방식의 한계

IEEE 802.11ax UORA에서 단말은RA-RU에 경쟁적으로 접근하며, 표준은BEB 기반으로OCW를 갱신해 충돌을 완화한다. 그러나 표준BEB는 혼잡 변화가 빠르거나 단말 수가 증가하는 환경에서 경쟁 강도를 상황에 맞게 세밀하게 조정하기 어려워, 충돌 증가 또는RU 유희로 이어지며 처리량 저하가 발생할 수 있다. 또한 본 연구는 현실적인 제약을 반영하여, 각 단말이 다른 단말의 동작이나RU 전체 혼잡도 같은 전역 상태를 관측할 수 없다고 가정하며 전역 통계 없이 자신의 전송 시도/성공/실패에 대한 로컬 이력만 사용한다. 이때 실패 이벤트는 충돌과 물리계층 오류를 완전히 분리하기 어려우므로 분석 단순화를 위해 모든 실패를 충돌로 간주한다. 본 논문에서의 “대기(wait)”는 버퍼에 전송할 정보가 있으나 해당 TF에서 전송을 시도하지 못한 상태로 정의한다.

2. 단말별 전송 이력 기반 IEEE802.11ax UORA 적응형 채널 접속 제어

본 논문은 전역 정보 없이도 각 단말별로 최근 W개의 TF에서의 충돌/대기 이력을 사용하여 확률을 계산하고, 이 확률을 시그모이드 정규화로 스케일링하여 접근 임계값 α 를 갱신한다. 초기 구간($t < W$)에서는 사용 가능한 표본만 평균하도록 $W_t = \min(W, t)$ 로 정의한다. 제안 방안에서는 각 단말이 다른 단말들의 동작이나 RU 전체의 혼잡도와 같은 전역 상태를 관측할 수 없다고 가정하며, 어떠한 전역 통계도 사용하지 않고 자신의 전송 시도, 성공, 그리고 실패 여부 등에 대한 로컬 이력만을 사용한다.

A. 충돌 확률을 고려한 OCW 제어

추정 충돌 확률 $p_i^{\text{충돌}}$ 은 다음 식(1)과 같이 계산된다. 추정 대기 확률 $p_i^{\text{대기}}$ 도 단말이 TF 수신 이후 전송을 시도하지 않고 대기하는 상황을 고려하여 같은 방식으로 계산한다.

$$p_i^{\text{충돌}}(t) = \frac{1}{W_t} \sum_{\tau=\max(1, t-W+1)}^t 1 \text{ (단말 } i \text{가 } \tau \text{번째 접근 기회에서 충돌)} \quad (1)$$

식(1)과 같이 구한 충돌/대기 확률을 식(2)의 시그모이드 함수로 정규화한다. s 는 경사 파라미터로 s 값이 클 경우 임계점 근처에서 급격히 증가하며, s 가 작을 경우 완만하게 증가하며, p 값의 변화에 둔감하게 반응한다. p_0 는 중앙 전이점으로 충돌률이 p_0 에 가까워지면 OCW가 본격적으로 변화한다. p_0 가 클수록 OCW 증가는 더 높은 충돌 확률이 관측될 때에야 본격적으로 발생하며, p_0 가 작을수록 작은 충돌 확률 변화에도 OCW가 빠르게 증가한다. 정규화는 $S(0)$ 과 $S(1)$ 을 기준으로 선형 스케일링한다. 이후 추정 확률 $x \in [0, 1]$ 에 대해 시그모이드 변환 $\tilde{S}(x)$ 을 적용한 뒤, 그 값을 $[0, 1]$ 범위로 정규화한 정규화 민감도 $\tilde{S}(x) \in [0, 1]$ 를 다음 식(2)과 같이 정의한다.

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-s(x-p_0)}}, \quad \tilde{S}(x) = \frac{S(x) - S(0)}{S(1) - S(0)}, \quad (2)$$

$\tilde{S}(x)$ 를 이용해 충돌 기반 보정 계수 K 를 단말 별로 계산한다. k_{\max} 는 최대 배수로 충돌률이 커질 경우, OCW가 초기값 대비 최대 몇 배까지 커질 수 있는지 지정한 값이다. 즉, 상한선이라고 볼 수 있다. S 가 0→1로 갈수록 $1 \rightarrow k_{\max}$ 로 선형 증폭된다. 이때 A절에서는 $x = p_i^{\text{충돌}}$ 로 두며, 대기 확률 $p_i^{\text{대기}}$ 에 대한 정규화는 B절에서 사용한다.

보정계수 K 는 다음 식(3)과 같이 갱신된다.

$$K_i^{\text{충돌}} = 1 + (k_{\max} - 1) \times \tilde{S}(p_i^{\text{충돌}}) \quad (3)$$

본 설계에서는 K 를 OCW 갱신에 적용하여, 혼잡 시에는 OCW를 확대해 충돌을 억제한다. OCW는 충돌 민감도 기반으로 확장폭을 조절한다. 충돌 시에는 OCW는 다음 식(4)과 같이 갱신된다.

$$OCW_i(t+1) = \min(OCW_{\max}, \lfloor OCW_i(t) \times K_i^{\text{충돌}} + 1 \rfloor) \quad (4)$$

성공 시에는 표준과 동일하게 $OCW_i(t+1) = OCW_{\min}$ 으로 복원한다.

OBO는 각 TF에서 OBO=OBO-(RA-RU 개수)로 감소시키며, 접근 조건(OBO $\leq \alpha$)을 만족하면 전체 RA-RU 중 하나를 균일 확률로 선택해 전송한다. 충돌/성공 후에는 갱신된 OCW 범위 내에서 OBO를 균일 분포로 재설정한다.

B. 대기 확률을 고려한 접근 임계값 제어

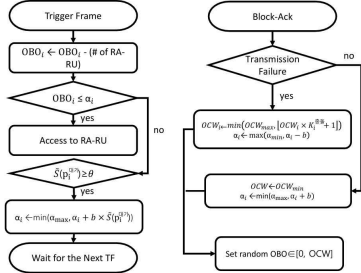
본 기법은 기존의 α 기반 접근 제어[3]를 바탕으로 한다. α 는 단말의 전송 시도 여부를 조절하는 제어 변수로, OBO 값에서 사용가능한 RA-RU 개수를 차감한 값이 α 이하면 전송을 허용하고 그렇지 않으면 대기한다. 이와 같은 방법으로 혼잡도 변화에 따라 충돌 억제와 RU 활용도를 함께 고려하기 위한 추가 제어 자유도를 제공한다. 기존 방식[3]은

성공/충돌 이벤트에 따라 α 를 b만큼 증감하되 범위를 제한하는 갱신 규칙을 사용한다. 접근 임계값 α 는 다음 식(5)으로 갱신한다. 본 연구의 기여는 (i) 단말의 관측으로부터 충돌 및 접근 오류(미시도) 확률을 추정하고 이를 시그모이드 정규화하여 민감도 $S(p_i^{\text{대기}})$ 를 정의한 뒤, (ii) 접근 오류(미시도) 상태에서 계산되는 대기 민감도 $\tilde{S}(p_i^{\text{대기}})$ 가 임계값 θ 를 초과하는 경우($\tilde{S}(p_i^{\text{대기}}) > \theta$ 일 때)에만 α 를 $\tilde{S}(p_i^{\text{대기}})$ 에 비례하여 증가시키고, 그렇지 않으면($\tilde{S}(p_i^{\text{대기}}) \leq \theta$ 일 때) α 갱신을 생략하는 임계값 기반 갱신 규칙을 추가한 점이다.

$$\alpha_i(t+1) = \begin{cases} \max(\alpha_{\min}, \alpha_i(t) - b), & \text{충돌} \\ \min(\alpha_{\max}, \alpha_i(t) + b), & \text{성공} \\ \min(\alpha_{\max}, \alpha_i(t) + b \times \tilde{S}(p_i^{\text{대기}})), & \text{접근 오류이고 } \tilde{S}(p_i^{\text{대기}}) > \theta \\ \alpha_i(t), & \text{접근 오류이고 } \tilde{S}(p_i^{\text{대기}}) \leq \theta \end{cases} \quad (5)$$

C. 제안 기법의 전체 흐름 및 효과

이 전체 절차는 [그림1]에 요약한다.



[그림1] 제안 방안의 동작 순서도

제안 기법은 단말의 로컬 관측으로부터 충돌 및 접근 오류 확률을 추정하고, 이를 정규화한 민감도에 따라 접근 제어와 경쟁 윈도우 갱신을 분리·연동하여 수행한다. 접근 오류가 지속되어 RA-RU 유희가 증가하는 구간에서는 접근 임계값을 상향 조정해 전송 시도를 유도하고, RA-RU 활용도를 높여 처리량 향상을 유도한다. 반대로 충돌이 빈번한 구간에서는 표준 BEB의 구조를 유지하되 충돌 민감도 기반 보정계수 K로 OCW 최대 폭을 가변화하여 경쟁을 완화하고, 충돌을 억제함으로써 처리량을 안정적으로 개선한다.

III. 시뮬레이션 환경 및 성능 평가

1. 시뮬레이션 환경

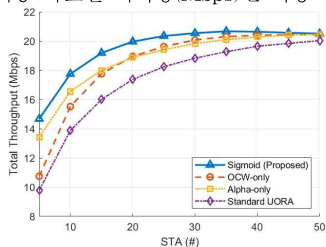
본 기법에서 사용하는 주요 파라미터는 [표1]로 정리한다.

파라미터 명	값
시뮬레이션 시간	60 s
단말 수	5, 10, ..., 50
(OCWmin, OCWmax)	(31, 511), (63, 1023)
RA-RU 개수(N _{RU})	9
SIFS	16 μs
PHY 헤더 길이	40 μs
프레임 크기	2000 bytes
대역폭	20 MHz
RU당 데이터 전송률	6.67 Mbps
슬라이딩 윈도우 길이 (W)	100 TF
α 갱신 스텝 (b)	0.1
α 범위 (α _{min} , α _{max})	(-0.5 × N _{RU} , 2 × N _{RU})
시그모이드 경사 (s)	5
시그모이드 중심 (p0)	0.15
최대 보정 배수 (kmax)	3
임계값 (θ)	0.8

[표1] 주요 변수 및 기본값

2. 시뮬레이션 성능 평가

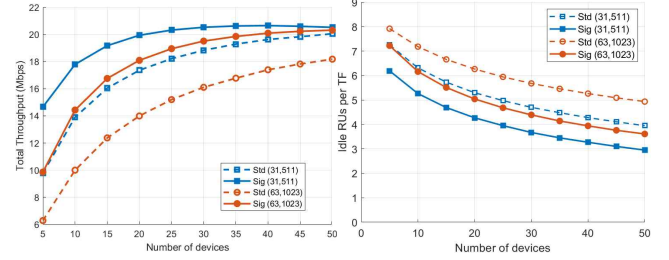
제안 기법의 구성요소별 기여도를 확인하기 위해, α 보정만 적용한 Alpha-only, OCW 보정만 적용한 OCW-only, 두 보정을 모두 적용한 제안 방안을 비교하였으며, 추가로 표준 UORA(BEB)와의 비교를 수행하였다. 성능 지표는 최종 목표인 처리량(Mbps)만 사용하였다.



[그림2] 처리량 비교 그래프 (Alpha-only/OCW-only/제안 방안/표준 UORA)

먼저 구성요소 기여도 비교 결과를 [그림 2]에 제시한다. [그림 2]에서 제안 기법은 Alpha-only, OCW-only, 그리고 표준 UORA(BEB) 대비 전 반적으로 더 높은 처리량을 나타내며, 두 보정이 결합될 때 성능 이득이 가장 크게 나타난다. 단말 수 5~50 구간에서 제안 기법의 처리량은 Alpha-only 대비 평균 4.3%, OCW-only 대비 평균 7.4% 향상되었고, 표준 UORA 대비 평균 15.13% 향상되었다. 단말 수가 5인 저부하 구간에서 결합 효과가 두드러져, 제안 기법은 표준 대비 약 50.0%, OCW-only 대비 36.5%의 최대 향상을 보였다. 반면 단말 수가 증가하여 처리량이 포화되는 구간에서는 개선 폭이 감소하지만, 단말 수 50에서도 표준 대비 2.38%의 이득이 유지된다. 이는 단일 보정만 적용할 경우 특정 구간에서 개선 효과가 제한될 수 있으나, 제안 기법은 α 보정(접근성 회복)과 OCW 보정(혼잡 시 충돌 완화)을 결합함으로써 다양한 단말 수 조건에서 처리량을 일관되게 향상시킴을 의미한다.

다음으로 표준 대비 성능 비교는 [그림3]에 제시한다. 여기서 Std(x,y)와 Sig(x,y)는 각각 표준(BEB)과 제안 기법을 의미하며, (x,y)는 (OCWmin, OCWmax)이다.



[그림3] UORA 표준(BEB) vs 제안방안 비교 그래프 (좌)처리량, (우)평균 Idle RU 개수

[그림 3]에서 제안 기법은 두 설정 모두에서 표준 대비 처리량을 향상시켰다. (OCWmin, OCWmax) = (31, 511) 설정에서 처리량은 단말 수 5에서 9.78 → 14.66 Mbps로 약 50.0% 향상되었고, 전 구간 평균으로 +2.19 Mbps로 약 15.1% 개선되었다. 단말 수가 증가할수록 향상 폭은 감소하였으나, 단말 수 50에서도 약 2.34%의 이득이 유지되었다. (OCWmin, OCWmax) = (63, 1023) 설정에서도 처리량이 일관되게 향상되었으며, 단말 수 5에서 6.29 → 9.86 Mbps로 약 56.8% 향상되었고, 최대 절대 향상은 단말 수 10에서 10.00 → 14.44 Mbps로 44.3% 향상된 것으로 관측되었다. 전 구간 평균으로는 기존 대비 약 27.1% 향상되었으며, 단말 수 50에서도 약 11.8%의 개선 효과가 유지되었다.

평균 유희 RA-RU 개수는 두 설정 모두에서 감소하여 RU 활용도가 개선됨을 확인할 수 있다. (31, 511)에서는 전 구간 평균 유희 RA-RU가 평균 1.03개(약 20.8%) 줄었고, (63, 1023)에서도 평균 1.19개(약 20.6%) 감소했으며 단말 수 50에서 4.93 → 3.61개로 26.8% 감소하는 등 혼잡 구간에서 개선이 더 뚜렷했다.

또한 공정성(Jain's fairness index)은 모든 단말 수에서 0.99 이상으로 유지되어, 본 실험 조건에서는 표준과 제안 기법 간 공정성 측면의 유의미한 차이는 관찰되지 않았다.

IV. 결론

본 논문은 IEEE 802.11ax UORA에서 표준 BEB 기반 경쟁 제어가 혼잡도 변화에 둔감하여 충돌 억제와 자원 활용도 확보를 동시에 만족시키기 어렵다는 점에 주목하였다. 이를 개선하기 위해 각 단말이 전역 정보 없이 로컬 관측 이력만으로 충돌/접근 오류 확률을 추정하고, 시그모이드 정규화 민감도에 기반해 접근 제어 파라미터 α와 경쟁 윈도우(OCW)를 적응적으로 갱신하는 기법을 제안하였다. 특히 선행연구[3]의 α 제어를 기반으로, 접근 오류 상태에서 민감도에 임계값 θ를 초과할 때만 α를 보정하는 임계값 기반 규칙을 추가하여 과도한 반응을 억제하면서 저부하 구간에서 RA-RU 활용도 회복을 유도하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 UORA 표준 대비 처리량을 평균 약 15.1%, 최대 약 56.8% 향상시켰으며, 평균 유희 RA-RU 개수를 약 20% 정도 감소시켰다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1F1A1A046959).

참고 문헌

- [1] 손주형, 안우진, 고건중, 박진삼, "IEEE 802.11ax 차세대 무선랜 표준화 동향," 한국통신학회지(정보와통신), vol. 33, no. 10, pp. 3-9, 2016.
- [2] Youngboon Kim, LamKwon, Eun-ChanPark, "OFDMA Backoff Control Scheme for Improving Channel Efficiency in the Dynamic Network Environment of IEEE 802.11ax WLANs," Sensors, vol. 21, Art. no. 5111, Jul. 2021.
- [3] 구희모, 권람, 김효경, 박은찬, "IEEE 802.11ax 무선랜에서 UORA 효율 향상을 위한 적응적 채널 접속 기법," 한국통신학회 학술대회논문집, pp. 1217-1218, 2024.