

시간 자원 재활용을 통한 IEEE 802.11ax UORA 성능 향상 기법

이동규*, 백호기[°]

IEEE 802.11ax UORA Performance Enhancement through Temporal Resource Recycling

Dongkyu Lee^{*}, Hoki Baek[°]

요약

본 논문에서는 IEEE 802.11ax 기반 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 환경의 UORA(Uplink OFDMA Random Access) 메커니즘에서 UL TXOP(Uplink Transmission Opportunity)의 효율적 재활용 방안을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 메커니즘은 802.11ax 표준과는 달리 단말의 데이터 전송이 UL TXOP에 할당된 시간보다 일찍 완료되거나 충돌이 발생한 경우, 해당 자원을 다른 단말에 추가적인 전송 기회로 제공함으로써 성능을 향상시킨다. 시뮬레이션 결과, 제안 메커니즘은 기존 표준 방식과 비교하여 처리량과 채널 활용률 측면에서 높은 성능을 보였으며, 특히 UL TXOP 구간이 길수록 성능 향상 폭이 크게 나타났다.

키워드 : IEEE 802.11ax, OFDMA, UORA, 시간 자원 재사용, 처리량, 채널 활용률, 다중 접속

Key Words : IEEE 802.11ax, OFDMA, UORA, Resource reuse, Throughput, Channel utilization, Multiple access

ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient reuse method for UL TXOP(Uplink Transmission Opportunity) in UORA(Uplink OFDMA Random Access) mechanism within IEEE 802.11ax-based OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) environments. Unlike 802.11ax standard, our proposed mechanism enhances performance by providing additional transmission opportunities to other stations when data transmission completes earlier than the allocated UL TXOP time or when collisions occur, effectively reallocating these resources. Simulation results demonstrate that the proposed mechanism exhibits superior performance compared to the standard method in terms of throughput and channel utilization, with particularly significant performance improvements as the length of the UL TXOP interval increases.

I. 서 론

최근 지속적으로 늘어나는 Wi-Fi의 트래픽을 감당하기 위해 고효율을 목표로 IEEE 802.11ax 표준이 제

정되었다. 기존 IEEE 802.11ac과 가장 큰 차이점은 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)의 도입인데, 이는 하나의 채널을 여러 개의 작은 주파수 단위인 RU(Resource Unit)로 나누어 디수의

* 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2022-00156389)

◆ First Author : Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, dlee@knu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Kyungpook National University, School of Computer Science and Engineering, neloyou@knu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : 202504-079-C-RU, Received April 4, 2025; Revised April 15, 2025; Accepted April 20, 2025

단말기가 동시에 데이터를 송수신할 수 있게 한다. OFDMA를 통해 다중 사용자 환경에서 발생하는 충돌을 줄이고, 채널 접근 지연을 감소시킴으로써 전반적인 처리량을 높일 수 있다.

IEEE 802.11ax OFDMA 환경에서의 UL (Uplink) 채널 접근 방식은 크게 SA(Scheduled Access) 방식과 RA(Random Access) 방식으로 나뉜다. 먼저 SA는 AP(Access Point)가 사전에 STA(Station)의 자원 요청 정보를 수집하고, 이를 바탕으로 각 STA에 적절한 RU를 할당하는 방식이다^[1]. 이 방식은 AP가 각 STA로부터 정보를 수신해 트래픽 특성과 요구사항을 고려하여 최적의 자원 할당을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 또한, SA는 사전 할당을 통해 STA 간의 충돌을 원천적으로 방지하고 예측 가능한 성능을 제공한다. 그러나 이 방식은 새로운 STA가 네트워크에 참여하거나, 비활성 상태였던 STA에서 갑작스럽게 트래픽이 발생하는 경우에 능동적으로 대응하기 어렵다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 IEEE 802.11ax에서는 STA가 임의로 RU에 접근을 시도하는 UORA(Uplink OFDMA Random Access) 방식 또한 지원한다. 이는 AP가 특정 RU를 어떠한 STA에도 할당하지 않는 방식으로, 여러 STA들이 경쟁을 통해 접근할 수 있도록 한다. 이처럼 UORA는 SA에 비해 유연성이 높아 다양한 네트워크 상황에 효과적으로 대응할 수 있다.

UORA 방식에는 앞서 언급한 장점과 더불어 한계점 역시 존재한다. 표준 UORA 환경에서는 CSMA/CA (Carrier Sensing Multiple Access/Collision Avoidance)와 같은 충돌 방지 메커니즘이 도입되지 않아, 이론상 전송률이 37%에 불과하다^[2]. 또한 STA가 AP가 정한 UL TXOP (Uplink Transmission Opportunity) 구간을 맞추기 위해 실제 데이터 전송 후에 패딩 비트를 추가하거나 충돌이 발생했을 때 해당 구간 내에서 추가적인 전송을 시도하지 않기 때문에 대역폭 효율성이 떨어진다^[3].

최근 연구들은 이러한 UORA의 한계점을 개선하려는 다양한 시도를 보여주고 있다. [2]에서는 캐리어 센싱, 보조 백오프 메커니즘을 결합한 연구를 통해 IEEE 802.11ax 환경에서 처리량을 향상시켰으며, [4]에서는 재전송 횟수에 기반한 동적 채널 접근 방식을 통해 지연 시간을 감소시키는 성과를 거두었다. 또한 [5]와 [6]은 새로운 OBO (OFDMA Backoff) 제어 방식을 통해 처리량을 개선하는 방안을 제시하였다. 추가로 [7]에서는 셀룰러 환경에서 QP(Quiet Period)를 활용해 현재 RU가 사용 중인지 판단하고 남은 구간을 추가로 활용하려는 연구가 진행되었다. 그러나 이러한 연구들은 대부분

파라미터의 새로운 조정 방안을 통해 충돌 가능성을 줄이거나 처리량을 향상하는 데 초점을 맞추고 있으며, UORA 환경에서의 미사용 자원을 효과적으로 재활용하는 방안에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

본 논문에서는 UORA 환경을 기반으로 UL TXOP 구간의 활용률을 높이는 메커니즘인 Multi-UORA를 제안한다. Multi-UORA는 표준 UORA를 보완하여, 패딩 비트를 붙이는 대신, 전송을 종료해 추가로 생기는 시간 자원을 다른 STA가 재사용함으로써 전송 기회를 극대화하는 것을 목표로 한다. 이 메커니즘은 기존 UORA 방식을 일부 수정해 보완하는 형태로 구현하여 복잡도가 높지 않은 동시에 UL TXOP 구간을 효율적으로 활용함으로써 전체적인 성능 향상을 기대할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IEEE 802.11ax 표준에서 정의하는 UORA를 상세히 설명하고 한계점을 분석한다. 3장에서는 Multi-UORA를 제안하고, 이에 대한 동작 과정과 알고리즘을 상세히 기술한다. 4장에서는 다양한 환경에서의 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 메커니즘의 처리량 및 채널 활용률 측면에서의 성능 우수성을 표준 UORA와 비교해 검증한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 표준 UORA 메커니즘

본 장에서는 IEEE 802.11ax 표준에서 정의하는 UORA를 설명하고 한계점을 제시한다. UORA는 다수의 단말이 UL 자원에 효율적으로 접근할 수 있도록 하는 메커니즘으로, SA와 달리 사전 할당 없이 임의 접근을 통해 채널 사용이 이루어진다.

UORA는 AP가 전송한 TF(Trigger Frame) 내의 RA-RU(Random Access RU)를 통해 이루어지며, 각 STA는 OBO 카운터를 사용하여 전송 시점을 결정한다. AP는 사전에 채널을 여러 개의 RU로 분할하고, 이를 SA-RU(Scheduled Access RU)와 RA-RU로 구분하여 지정한다. 초기 전송 시 STA는 0에서 최소 OCW(OFDMA Contention Window) 값인 OCW_{min} 사이 임의의 값으로 OBO 카운터를 초기화하고, TF를 수신할 때마다 식 $(1) \leq i \leq n_{RU}$ RA-RU의 수인 n_{RU} 만큼 OBO 값인 OBO_i 를 감소시킨다. $OBO_i \leq 0$ 되면 해당 STA는 사용할 수 있는 RA-RU 중 하나를 선택하여 전송을 시도한다^[8].

$$OBO_i \leftarrow OBO_i - n_{RU} \quad (1)$$

UORA의 구체적인 동작 과정의 예시는 다음과 같다. 먼저, AP는 각 주기마다 TF를 전송하며, 이 TF에는 RA-RU의 수와 위치, 그리고 UL TXOP의 지속 시간 등의 정보가 포함된다. 표 1과 같이 만약 네트워크 내에 있는 6개의 STA가 각각 OBO_i 값을 $\{3, 2, 5, 2, 1, 7\}$ 로 설정했다면, TF를 수신한 직후 OBO_i 값은 식 (1)에 의해 각각 $\{-1, -2, 1, -2, -3, 3\}$ 이 된다. 이 중 OBO_i 값이 0 이하인 STA 4개만이 전송 기회를 얻게 된다. 전송 기회를 얻은 STA의 집합을 S 라 정의하고, S 에 속한 STA는 표 1의 세 번째 열인 RU_{sel} 과 같이 RA-RU 중 임의로 하나를 선택한다. 만약 특정 RA-RU를 선택한 STA가 하나인 경우, 전송에 성공한다. 반대로 둘 이상의 STA가 동시에 같은 RA-RU를 선택한 경우, 해당 RA-RU를 선택한 STA는 전송에 실패한다.

전송 시도 후의 절차는 전송 결과에 따라 달라지는 테, 이는 식 (2)와 같이 정리된다. 전송을 시도한 STA는 전송 결과에 대한 Block ACK(Acknowledgement)를 AP로부터 수신하게 되며, 전송에 성공한 STA_i 의 경우 다음 전송을 위해 새로운 OCW_i 값을 0에서 OCW_{min} 사이에서 무작위로 선택한다. 반대로, 충돌이 발생한 STA_i 는 지수 백오프 알고리즘에 따라 OCW_i 값을 최대 OCW_{max} 범위 내에서 2배로 증가시킨 후, 새로운 OBO_i 값을 0에서 OCW_i 사이에서 임의의 값으로 재설정한다.

$$OCW_i = \begin{cases} OCW_{min}, & \text{if successful} \\ \min(2 \times OCW_i + 1, OCW_{max}), & \text{if collided} \end{cases} \quad (2)$$

UORA의 전체 전송 시간은 수식 (3)과 같이 표현된다.

표 1. 표준 UORA의 진행에 따른 파라미터 변동값 예시 ($n_{STA} = 6$, $n_{RU} = 4$)

Table 1. Example of parameter changes according to progress of Standard UORA ($n_{STA} = 6$, $n_{RU} = 4$)

| i (STA) | OBO_i ($n_{RU} = 4$) | RU_{sel} | Result |
|--------------|-----------------------------|------------|-----------------------|
| 1 | $3 \rightarrow -1$ | 1 | Collision (STA_4) |
| 2 | $2 \rightarrow -2$ | 2 | Success |
| 3 | $5 \rightarrow 1$ | | |
| 4 | $2 \rightarrow -2$ | 1 | Collision (STA_1) |
| 5 | $1 \rightarrow -3$ | 4 | Success |
| 6 | $7 \rightarrow 3$ | | |

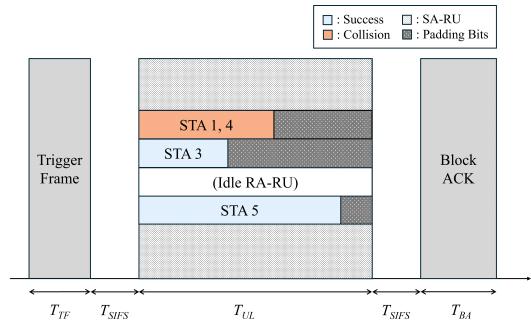


그림 1. 표준 UORA 동작방식의 예
Fig. 1. Example of standard UORA operation

다. 여기에서 T_{UL} 는 UL TXOP 구간의 길이로, 사전에 AP에 의해 할당되기 때문에 STA가 전송하려는 데이터 양에 따라 실시간으로 조정하는 데 어려움이 있다. 따라서 프레임 길이를 일정하게 유지하기 위해 그림 1과 같이 UL 데이터 뒤에 패딩 비트를 추가하게 된다.

$$T_{total} = T_{TF} + T_{UL} + T_{BA} + 2T_{SIFS} \quad (3)$$

이처럼 데이터 크기에 상관없이 한 UL TXOP 구간에 한 STA만 특정 RA-RU를 점유하게 되면서, 채널 활용 측면에서 비효율성을 보인다. 특히 전송할 데이터가 적은 경우, 많은 부분이 패딩 비트로 채워져 자원 낭비가 발생한다. 유사하게 전파 지연이 긴 환경에서 제어 프레임 간격이 넓어지는 경우에도 늘어난 T_{UL} 길이에 맞추기 위해 패딩 비트가 더 많이 덧붙여져 추가적인 오버헤드를 유발할 수 있다.

III. 제안하는 Multi-UORA 메커니즘

본 장에서는 무선랜 환경에서 UL 전송 시 발생하는 비효율성 문제를 해결하기 위한 Multi-UORA를 제안한다. 제안하는 메커니즘은 그림 2와 같이 표준 UORA에서 남은 UL TXOP 구간을 패딩 비트로 채우는 대신 다른 단말에 추가적으로 전송 기회를 부여함으로써 채널 활용률을 향상시키는 것을 목적으로 한다. Multi-UORA는 STA_i 를 OBO_i 값에 따라 식 (4)와 같이 분류하고, 각 유형에 따라 서로 다른 접근 방식을 적용하는 것이 특징이다.

$$STA_i = \begin{cases} S_{main}, & \text{if } OBO_i \leq 0 \\ S_{sub}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

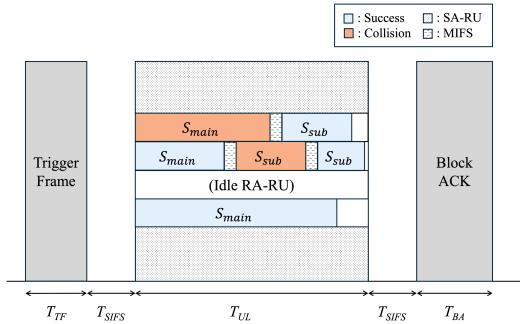


그림 2. 제안하는 Multi-UORA 동작방식의 예
Fig. 2. Example of proposed Multi-UORA operation

S_{main} 은 표준 UORA와 동일한 방식으로 RA-RU에 접근을 시도하는 단말의 집합이고, S_{sub} 는 임의의 RA-RU를 선택하여 캐리어 센싱을 수행하는 도중 일정한 조건을 만족할 때 해당 RA-RU에 접근을 시도하는 단말의 집합이다.

Multi-UORA 메커니즘의 동작은 크게 초기화 단계, S_{main} 전송 단계, S_{sub} 전송 단계로 구성된다. 첫 번째로 그림 3에 알고리즘 형태가 제시되어 있는 초기화 및 RU 분류 단계에서는 먼저 AP가 TF를 브로드캐스트하면, 각 STA_i 는 자신의 경쟁 원도우 OCW_i 를 OCW_{min} 으로 초기화하고, $[0, OCW_i]$ 범위 내에서 임의의 OBO_i 값을 선택한다. 이후 AP가 n_{RU} 개의 RA-RU를 할당하면, 각 STA_i 는 자신의 OBO_i 값을 식 (1)를 이용해 갱신한다. 갱신된 OBO_i 값을 식 (4)에 적용해 각 STA_i 의 유형을 S_{main} 또는 S_{sub} 로 결정한다.

그림 4에 알고리즘 형태가 제시된 S_{main} 전송 단계에서는 S_{main} 에 속한 단말들이 RA-RU 중 하나를 임의로 선택하여 데이터를 전송한다. 전송 과정은 표준 UORA의 방식과 유사하지만, 표준 UORA에서는 한 단

Algorithm 1 Initialization & STA Classification

Input: Channel access parameters for AP and STAs
Output: Sets of S_{main} and S_{sub}

- 1: **Phase 1: Initialization**
- 2: AP broadcasts Trigger Frame (TF)
- 3: Each STA_i initializes $OCW_i = OCW_{min}$
- 4: Each STA_i selects random OBO value $OBO_i \in [0, OCW_i]$
- 5: **Phase 2: STA Classification**
- 6: AP allocates n_{RU} Resource Units
- 7: Each STA_i decrements $OBO_i = OBO_i - n_{RU}$
- 8: STA_i determines its type:
- 9: $S_{main} = \{STA_i | OBO_i \leq 0\}$
- 10: $S_{sub} = \{STA_i | OBO_i > 0\}$

그림 3. 초기화 및 RU 분류 단계를 위한 알고리즘의 순서도
Fig. 3. Flow chart of algorithm for initialization and RU classification phase

Algorithm 2 S_{main} Transmission

Input: Set of S_{main} , available RUs

- Output:** Updated CW and OBO values for S_{main}
- 1: **for** each $STA_i \in S_{main}$ **do**
 - 2: Randomly select RU_j from available RUs
 - 3: Transmit on selected RU_j
 - 4: **if** transmission successful **then**
 - 5: Reset $OCW_i = OCW_{min}$
 - 6: Set new random $OBO_i \in [0, OCW_{min}]$
 - 7: Finish transmission early if data is exhausted
 - 8: **else**
 - 9: $OCW_i = \min(2 \cdot OCW_i + 1, OCW_{max})$
 - 10: Set new random $OBO_i \in [0, OCW_i]$
 - 11: **end if**
 - 12: **end for**

그림 4. S_{main} 전송 단계를 위한 알고리즘의 순서도

Fig. 4. Flow chart of algorithm for S_{main} transmission phase

말이 T_{UL} 을 모두 사용해야 하므로 전송할 데이터가 적을 경우 나머지 구간을 패딩 비트로 채워야 한다. 그러나 제안하는 Multi-UORA에서는 S_{main} 이 전송할 데이터가 없을 경우 해당 주기에서 전송을 종료함으로써 UL TXOP 구간의 효율적 사용이 가능해진다.

마지막으로 그림 5에 알고리즘 형태가 제시된 S_{sub} 전송 단계에서는 먼저 S_{sub} 에 속한 단말들이 캐리어 센싱을 위해 임의의 RA-RU를 선택한다. 해당 RA-RU가 T_{MIFS} 동안 유휴 상태로 감지되면 전송 가능 여부를 판단하는데, 이때 MIFS (Multi-STA Interframe Space)는 Multi-UORA 환경의 UL TXOP 구간 내에서 STA 간 최소한의 간격을 보장하기 위해 도입한 파라미터 종류이다. 이후 UL 구간의 남은 시간 T_{remain} 을 식 (5)를 통해 도출해 전송 가능 여부를 판단한다.

Algorithm 3 S_{sub} Transmission

Input: Set S_{sub} , available RA-RUs, UL period timing constraints

- Output:** Updated OCW and OBO values for S_{sub}
- 1: **for** each $STA_i \in S_{sub}$ **do**
 - 2: Randomly select RU_j for carrier sensing
 - 3: Perform carrier sensing on RU_j
 - 4: **if** RU_j is idle for T_{MIFS} period **then**
 - 5: Calculate required transmission time T_{data}
 - 6: Calculate remaining time T_{remain} in UL period
 - 7: **if** $T_{remain} \geq T_{data} + T_{preamble} + T_{BSR}$ **then**
 - 8: Attempt transmission on RU_j
 - 9: **if** transmission successful **then**
 - 10: Reset $OCW_i = OCW_{min}$
 - 11: Set new random $OBO_i \in [0, OCW_{min}]$
 - 12: **else**
 - 13: Mark as ineligible for current UL period
 - 14: **end if**
 - 15: **end if**
 - 16: **end if**
 - 17: **end for**

그림 5. S_{sub} 전송 단계를 위한 알고리즘의 순서도

Fig. 5. Flow chart of algorithm for S_{sub} transmission phase

$$T_{remain} \geq T_{data} + T_{preamble} + T_{BSR} \quad (5)$$

T_{remain} 은 남은 T_{UL} 시간, T_{data} 는 전송할 데이터에 필요한 시간, $T_{preamble}$ 은 물리 계층 프리앰블 전송에 필요한 시간, T_{BSR} 은 BSR(Buffer Status Report) 정보 전송에 필요한 시간이다. 이 중 T_{data} 는 AP로부터 수신한 TF의 신호 세기, SNR 등의 채널 상태를 고려해 결정한 MCS (Modulation Coding Scheme) 값, 현재 RU의 하위 캐리어 개수에 따라 전송에 소요되는 시간을 계산한 값으로, 식 (6)을 기반으로 계산된다.

$$T_{data} = \frac{D \times T_{sym}}{N_{sc} \times \log_2 M \times r} \quad (6)$$

D 는 전송할 데이터의 비트 단위 크기이고 T_{sym} 은 심볼 하나의 지속 시간이다. N_{sc} 는 현재 RU의 하위 캐리어의 개수이고, $\log_2 M$ 은 한 심볼 당 전달할 수 있는 비트 수이다. 여기서 M 은 변조 방식의 모듈레이션 차수이다. r 은 해당 변조 방식에 대응하는 채널 코딩률이다. 위 값을 통해 T_{data} 를 도출하고, T_{remain} 값과 비교해 전송이 가능하다고 판단되면, 데이터 전송을 시도한다. 만약 전송에 성공할 경우, S_{main} 과 동일한 방식으로 OCW_i 및 OBO_i 를 재설정한다. 반대로 충돌이 발생하는 등 전송에 실패할 경우, 파라미터값 수정 없이 충분한 OBO_i 감소 이후 STA_i 가 S_{main} 에 속하는 시점에 다시 접근을 시도한다는 점에서 S_{main} 전송 단계와 차이를 보인다. 또한, 한 RU에서 성공적인 S_{sub} 전송 후에도 남은 시간이 충분하다면, 그림 2와 같이 다른 S_{sub} 단말이 추가로 접근을 시도할 수 있다. 이러한 방식으로 다수의 S_{sub} 단말들이 하나의 RU를 시간에 따라 순차적으로 공유할 수 있으며, 이를 통해 채널 활용률을 높일 수 있다.

IV. 시뮬레이션 환경 및 결과

본 장에서는 앞서 제안한 Multi-UORA의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션 환경을 소개하고, 기존의 표준 UORA와 Multi-UORA를 처리량과 채널 활용률 측면에서 비교 및 분석한다. 시뮬레이션은 IEEE 802.11ax 표준을 기반으로 구현하였으며, MATLAB을 이용하여 수행되었다. 또한 해당 시뮬레이션은 각 STA가 특정 RA-RU의 캐리어 센싱을 통해 다른 STA의 점유 여부를 파악할 수 있다는 전제하에 진행되었다. 본 논문에서

표 2. 시뮬레이터 환경의 파라미터들과 그 값
Table 2. Parameters and their values of the simulation

| Parameter | Value |
|--|--------------------|
| Number of simulations (N_{sim}) | 10,000 |
| Number of stations (n_{STA}) | [10, 70] |
| MCS | 7 |
| RU size (N_{sc}) | 26 tone |
| Payload Size (B) | [800, 1500] octets |
| Number of RA-RUs (n_{RU}) | {4, 8} |
| TF duration (T_{TF}) | 112 μ s |
| PHY preamble duration ($T_{preamble}$) | 56 μ s |
| BSR duration (T_{BSR}) | 80 μ s |
| Minimum OCW (OCW_{min}) | 7 |
| Maximum OCW (OCW_{max}) | 63 |
| SIFS duration (T_{SIFS}) | 16 μ s |
| MIFS duration (T_{MIFS}) | 10 μ s |
| Offered Load | Full buffer |

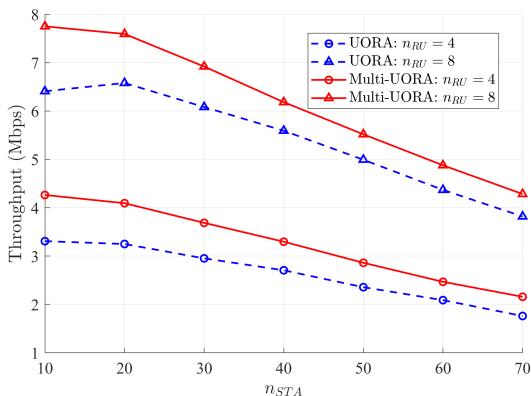
수행한 시뮬레이션의 파라미터는 표 2에 정리되어 있다. 본 시뮬레이션에서는 RU tone 26과 MCS 7 환경에서 전송이 이루어졌다고 가정했다. 따라서 데이터 전송에 활용되는 하위 캐리어 수인 N_{sc} 는 26이고, MCS 7에서 사용되는 변조 방식인 64-QAM에서는 $M = 64$ 로 $\log_2 M = 6$ 비트가 된다. 채널 코딩률 r 은 MCS 7에서 $\frac{5}{6}$ 이며, OFDM 심볼 지속 시간인 T_{sym} 은 12.8 μ s다^[9]. 시뮬레이션에서는 UL TXOP 시간 (T_{UL})을 3 ms와 6 ms의 두 가지 경우로 설정하여 T_{UL} 길이에 따른 성능 변화를 관찰하였다. 또한 RA-RU 수 (n_{RU})는 4개와 8개의 두 가지 경우로 나누어 RA-RU의 개수에 따른 성능 변화도 함께 분석했다. 단말의 수는 10개부터 70개까지 10개 단위로 증가시키며 혼잡도에 따른 영향을 평가하였다. 페이로드 크기는 실제 네트워크 환경을 반영하기 위해 800~1,500 octets 사이에서 균일 분포를 따라 무작위로 생성하였으며, 15%의 단말은 제어 프레임만 전송하도록 설정하였다. 모든 과정은 Monte Carlo 시뮬레이션을 활용해 10,000회 반복 수행되었다.

먼저 처리량 R 은 식 (7)과 같이 단위 시간당 성공적으로 전송된 데이터의 양을 통해 계산된다. 아래 식에서 N_{sim} 은 시뮬레이션 반복 횟수, $N_{s,i}$ 는 i 번째 시뮬레이션에서 성공적으로 전송된 STA 수, B_j 는 STA_j 가 전송

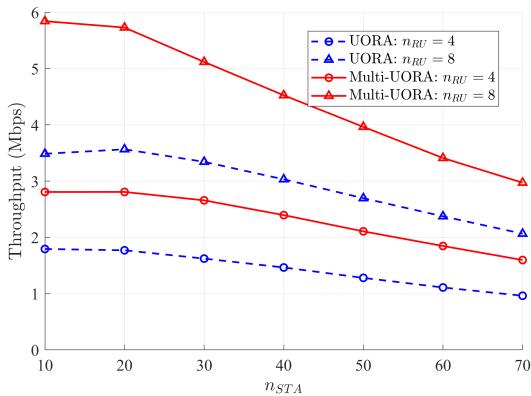
한 비트 수이다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sim}} \sum_{j=1}^{N_{s,i}} B_j}{N_{sim} \times T_{total}} \quad (7)$$

그림 6(a)과 같이 $T_{UL} = 3$ (ms) 인 경우, $n_{RU} = 4$ 일 때 Multi-UORA는 표준 UORA 대비 최대 32.8%의 처리량 향상을 보였으며, 단말 수가 증가함에 따라 두 방식의 성능 차이는 점차 감소하였다. $n_{RU} = 8$ 인 경우에도 유사한 경향을 보였으나, 전체적인 처리량은 $n_{RU} = 4$ 일 때보다 높게 나타났다. $T_{UL} = 6$ (ms)로 증



(a) Throughput comparison with standard UORA and proposed Multi-UORA at $T_{UL} = 3$ (ms)



(b) Throughput comparison with standard UORA and proposed Multi-UORA at $T_{UL} = 6$ (ms)

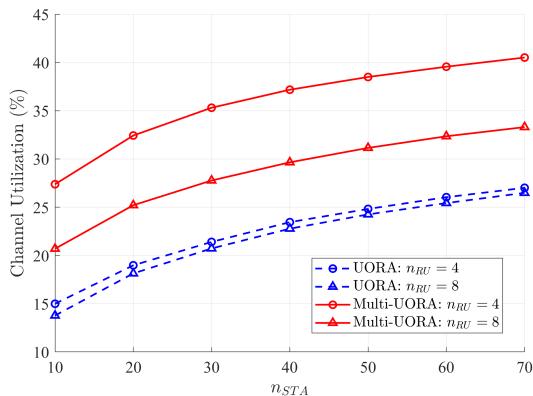
그림 6. n_{RU} 에 따른 표준 UORA와 제안하는 Multi-UORA의 처리량 비교 ($n_{RU} = 4$, $n_{RU} = 8$)

Fig. 6. Throughput comparison with standard UORA and proposed Multi-UORA according to n_{RU} ($n_{RU} = 4$, $n_{RU} = 8$)

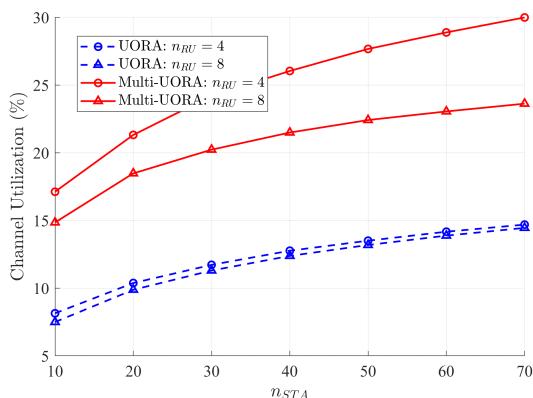
가한 그림 6(b)의 경우, 성능 향상 폭이 더욱 두드러졌다. $n_{RU} = 4$ 일 때 Multi-UORA는 표준 UORA 대비 최대 66.4%의 처리량 향상을 보였으며, 단말 수가 많아져도 여전히 높은 성능 향상률을 유지하였다. $n_{RU} = 8$ 환경에서는 전체적인 처리량이 더 높았으며, 단말 수가 증가함에도 성능 향상이 지속해서 유지되었다. 특히 주목할 점은 T_{UL} 이 길어질수록 Multi-UORA의 성능 향상 폭이 커진다는 것이다. 이는 전송 주기가 길수록 표준 UORA에서 발생하는 자원 낭비가 더 크고, Multi-UORA가 이러한 자원을 효과적으로 재활용할 수 있음을 시사한다. 채널 활용률 U 은 전체 채널 사용 가능 시간 대비 실제로 데이터 전송에 사용된 시간의 비율로, 식 (8)과 같이 계산된다. 이 식에서 $T_{occ}(i,r)$ 는 i 번째 시뮬레이션에서 r 번째 RU의 실제 점유 시간을 나타낸다.

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sim}} \sum_{r=1}^{N_{RU}} T_{occ}(i,r)}{N_{sim} \times T_{UL} \times N_{RU}} \times 100 \quad (8)$$

그림 7은 동일한 조건에서 표준 UORA와 Multi-UORA의 채널 활용률을 비교한 그래프이다. $T_{UL} = 3$ (ms)의 환경인 그림 7(a)에서 $n_{RU} = 4$ 일 때, Multi-UORA의 채널 활용률은 $n_{STA} = 10$ 에서 27.7%, $n_{STA} = 70$ 에서 40.5%로 측정되었다. 반면, 표준 UORA는 동일 조건에서 각각 14.8%와 27.0%의 채널 활용률을 보였다. 이는 Multi-UORA가 표준 UORA와 대비해 평균 61.8%의 채널 활용률 향상을 달성했음을 의미한다. $T_{UL} = 6$ (ms)의 환경인 그림 7(b)에서는 표준 UORA의 채널 활용률이 현저히 감소했지만, Multi-UORA는 상대적으로 높은 채널 활용률을 유지하였다. 특히 $n_{RU} = 4$ 일 때 $n_{STA} = 70$ 인 조건에서 Multi-UORA는 30.1%의 채널 활용률을 달성하였으며, 이는 동일 조건의 표준 UORA 대비 약 2배에 해당하는 수치이다. n_{RU} 에 따른 영향을 분석한 결과, $n_{RU} = 8$ 일 때 전체적인 채널 활용률은 $n_{RU} = 4$ 일 때보다 낮게 나타났다. 이는 RA-RU 수 증가에 따라 전송 기회는 증가하지만, 동시에 충돌 가능성도 높아져 전체적인 채널 활용률이 감소하기 때문으로 해석된다. 그러나 이러한 상황에서도 Multi-UORA는 표준 UORA 대비 일관되게 높은 채널 활용률을 보였다. 또한, 두 방식 모두 단말 수 증가에 따라 채널 활용률이 향상되는 경향을 보였으나, Multi-UORA에서 그 증가 폭이 더 크게 나타났다.



(a) Channel utilization comparison with standard UORA and proposed Multi-UORA at $T_{UL} = 3$ (ms)



(b) Channel utilization comparison with standard UORA and proposed Multi-UORA at $T_{UL} = 6$ (ms)

그림 7. n_{RU} 에 따른 표준 UORA와 제안하는 Multi-UORA의 채널 활용률 비교 ($n_{RU} = 4$, $n_{RU} = 8$)

Fig. 7. Channel utilization comparison with standard UORA and proposed Multi-UORA according to n_{RU} ($n_{RU} = 4$, $n_{RU} = 8$)

이는 제어 프레임 간격이 넓은 환경에서 Multi-UORA 가 제한된 무선 자원을 더욱 효율적으로 활용할 수 있음을 시사한다.

V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.11ax 기반 OFDMA 환경의 UORA 메커니즘에서 UL TXOP 구간의 재사용 방안을 적용한 Multi-UORA를 제안하였다. 제안된 메커니즘은 STA의 데이터 전송이 일찍 완료되거나 충돌이 발생한 경우, 남은 시간 자원을 다른 STA에게 추가적인 전송 기회로 제공함으로써 채널 자원의 낭비를 최소화한다. 시뮬레이션 결과, Multi-UORA는 채널 활용률

측면에서 표준 UORA 대비 평균 38.7%의 향상을 보였으며, 특히 UL TXOP 구간이 긴 환경에서는 최대 2배 까지 성능이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

References

- [1] D. Bankov, A. Didenko, E. Khorov, and A. Lyakhov, “OFDMA uplink scheduling in IEEE 802.11ax networks,” in *Proc. IEEE ICC 2018*, pp. 1-6, Kansas City, MO, USA, May 2018. (<https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422767>)
- [2] L. Lanante, C. Ghosh, and S. Roy, “Hybrid OFDMA random access with resource unit sensing for next-gen 802.11ax WLANs,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 20, no. 12, pp. 3338-3350, Dec. 2021. (<https://doi.org/10.1109/TMC.2020.3000503>)
- [3] S. M. Kim, “MAC protocol for reducing collision probability of uplink channel in IEEE 802.11ax WLANs,” *J. KIIT*, vol. 20, no. 6, pp. 77-84, Jun. 2022. (<https://doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.6.77>)
- [4] Y. Zheng, J. Wang, Q. Chen, and Y. Zhu, “Retransmission number aware channel access scheme for IEEE 802.11ax based WLAN,” *Chin. J. Electr.*, vol. 29, no. 2, pp. 351- 360, Mar. 2020. (<https://doi.org/10.1049/cje.2020.01.014>)
- [5] G. H. Hwang, “Multuser OFDMA-based random access scheme for throughput enhancement in dense wireless LANs area,” *J. KICIS*, vol. 42, no. 12, pp. 2304-2306, Dec. 2017. (<https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.12.2304>)
- [6] Y. Kim, L. Kwon, and E. C. Park, “OFDMA backoff control scheme for improving channel efficiency in the dynamic network environment of IEEE 802.11ax WLANs,” *Sensors*, vol. 21, no. 15, p. 5111, Jul. 2021. (<https://doi.org/10.3390/s21155111>)
- [7] D. Tsolkas, E. Lioutou, N. Passas, and L. Merakos, “A graph-coloring secondary resource allocation for D2D communications in LTE networks,” in *Proc. IEEE 17th Int.*

- Wkshp. Comput. Aided Model. Design Commun. Links Networks (CAMAD 2012)*, pp. 56-60, Barcelona, Spain, Sep. 2012.
(<https://doi.org/10.1109/CAMAD.2012.633537>)
- [8] W. Yin, P. Hu, J. Indulska, M. Portmann, and Y. Mao, "MAC-layer rate control for 802.11 networks: A survey," *Wireless Netw.*, vol. 26, pp. 3793-3830, 2020.
(<https://doi.org/10.1007/s11276-020-02295-2>)
- [9] IEEE, "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 amendment 1: Enhancements for high-efficiency WLAN," IEEE Std 802.11ax-2021 (Amendment to IEEE Std 802.11-2020), pp. 1-767, May 2021.
(<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.944242>)

이동규 (Dongkyu Lee)



2025년 8월 : 경북대학교 컴퓨터학부 학사
2025년 9월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 석사과정
<관심분야> Wi-Fi 7/8, 5G/6G, UAV networks
[ORCID:0009-0002-1592-3425]

백호기 (Hoki Baek)



2006년 2월 : 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학 학사
2008년 2월 : 아주대학교 정보 통신공학 석사
2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학 박사
2014년 3월~2015년 2월 : 아주대학교 장위국방연구소 전임연구원
2015년 3월~2021년 2월 : 아주대학교 국방디지털융합학과 강의교수
2021년 3월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 부교수
<관심분야> 5G/6G, Wi-Fi 7/8, Non-terrestrial networks, UAV networks, Covert Communications, Tactical networks, IoT, V2X, Positioning
[ORCID:0000-0001-9213-7845]