

데이터 처리량과 에너지 효율 향상을 위한 채널 인지 트래픽 클러스팅 및 어그리게이션 전송 기법

지승하¹, 이일구²

¹ 성신여자대학교 융합보안공학과 석사과정

² 성신여자대학교 융합보안공학과 교수

220256039@sungshin.ac.kr, iglee19@sungshin.ac.kr

Channel-Aware Traffic Clustering and Aggregation for Enhanced Throughput and Energy Efficiency in IoT Networks

Seung-Ha Jee, Il-Gu Lee

Dept. of Convergence Security Engineering, Sungshin Women's University

요약

반도체 집적 기술과 무선통신 기술의 발전으로 IoT (Internet of Things) 디바이스가 전송하는 데이터의 용량과 속도가 증가하고 있다. IoT 디바이스는 무선 네트워크 환경에서 데이터를 송수신하므로 한정적인 네트워크 채널을 효율적으로 활용하는 것이 중요하다. 또한 IoT 디바이스는 경량화된 배터리를 사용함으로 전력을 효율적으로 사용하는 것 또한 중요하다. 기존 연구들은 IoT 트래픽을 클러스터링하여 네트워크 성능을 최적화하고자 하였으나, 제안기법으로 인한 추가적인 전력 소모에 대해서 고려하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 IoT 트래픽을 채널 점유율에 따라 분류하여 클러스터링하는 A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit) 기반의 데이터 집계 기법을 제안한다. 실험 결과에 따르면, 제안하는 방법은 종래모델 대비 처리량은 평균 799.73%, 효율성은 15.68 배 증가했으며 전력 소모량은 최대 평균 91.45% 개선되었다.

1. 서론

최근 반도체 집적 기술과 무선통신 기술의 발전으로 IoT (Internet of Things) 디바이스가 전 산업에 널리 활용되면서 무선 네트워크 트래픽과 데이터의 용량이 증가하고 있다. IoT Analytics의 보고서(2024)에 따르면, 2030년도까지 IoT 디바이스는 400 억대까지 증가할 것으로 예측된다 [1]. 따라서 네트워크 혼잡과 충돌 확률이 빈번하게 발생할 수 있으며, 이를 해결하고자 국제 표준기구인 IEEE 802.11 표준화 그룹은 효율적인 네트워크를 위한 다양한 기술을 표준화하고 있다 [2][3]. 802.11n은 MAC (Media Access Control) 계층에서 효율적인 데이터 전송을 위한 집계 방식을 표준으로 제정했으며, 802.11ax에서는 집계 방식에 대해 세부적인 정의했다. 그러나 IoT 네트워크 환경에 특화된 기법이라 할 수 없으며, 이에 IoT 네트워크 환경에 특화된 클러스터링 기법들이 연구되고 있다.

IoT 디바이스는 경량화된 배터리를 사용함으로 전력 효율성을 고려해야 하지만 [4], 종래의 기법들은 제한된 네트워크 대역폭을 효과적으로 활용하기 위해

적용한 클러스터링하는 기법에 의한 IoT 노드의 추가적인 전력 소모를 고려하지 않아서 전력 방전과 같은 심각한 문제를 초래할 수 있다 [5][6][7]. 따라서 본 논문에서는 IoT 네트워크 환경에서 전력 소비를 최소화하고 처리량을 향상시키기 위한 동적 A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit)기반의 CATEIN (Channel-Aware Traffic Clustering and Aggregation for Enhanced Throughput and Energy Efficiency in IoT Networks)을 제안한다.

2. 선행 연구

Ibrahim, A. S. [5]는 IoT 트래픽 유형을 분석하고, 각 트래픽 패턴에 맞춰 동적으로 위치 기반과 시간 기반 집계 방법 중 최선의 집계 방법을 선택하여 동작하는 적응형 집계 기법을 제안했다. Azevedo, R. D. [6]은 데이터 그리드 기반 요약 기법을 사용한 후, gCluster 클러스터링 알고리즘을 적용하여 데이터를 그룹화하는 기법을 제안했다.

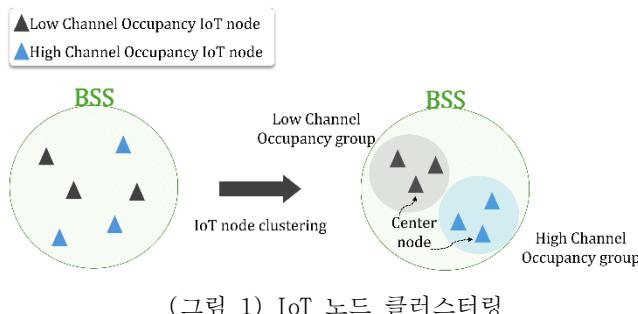
두 연구 모두 IoT 기기의 트래픽 패턴 분석 기반의

클러스터링 기법을 제안하였으나, 집계 방식을 동적으로 계산하는 과정 및 데이터를 처리하는 과정에서 추가적인 전력 소모가 발생하며 이에 대한 성능평가를 진행하지 않았다.

Sivanathan, A. [7]는 개별 디바이스별 클러스터링 모델을 적용하여 IoT 기기의 행동 변화를 감지 및 분류하는 프레임워크를 제안한다. 그러나 모델 학습을 통한 실시간 IoT 기기 분류기법은 모델 학습 과정에서 오버헤드가 발생하는 점을 고려하지 않았다.

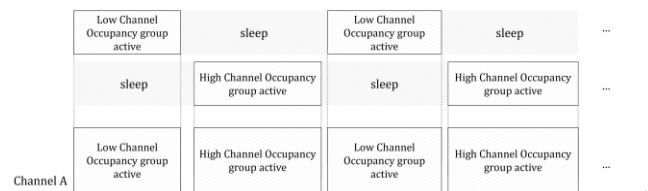
3. 제안 기법

본 장에서는 IoT 네트워크 환경에서 효율적인 데이터 전송을 위한 CATEIN의 동작 방식을 서술한다. 그림 1은 CATEIN 동작 메커니즘을 나타낸 것이다.



(그림 1) IoT 노드 클러스터링

동일한 BSS에 존재하는 IoT 노드에 대해서 채널 점유율을 기준으로 하여, 점유율이 낮은 그룹과 높은 그룹으로 클러스터링한다. 그 다음 각 그룹 내의 노드 간 거리를 기준으로 중앙에 위치한 노드를 중앙 노드로 선정한다. 중앙 노드는 그룹 내의 노드들의 프레임 데이터 MPDU를 수신하고, 이를 A-MPDU 방식으로 MPDU를 집계한다. 그룹 내 거리를 기준으로 가장 중앙에 있는 노드를 중앙 노드로 선정함으로써, 그룹 내에 노드들의 MPDU를 송신 효율성을 높인다. 그림 2는 각 그룹이 동일 채널에서의 송신 스케줄링을 나타낸 것이다.



(그림 2) 그룹 간 채널 스케줄링

먼저, 채널 점유율이 낮은 그룹이 활성화되어 그룹 내 노드들은 중앙 노드에게 MPDU를 송신한다. 이를 수신한 중앙 노드는 MPDU를 집계하여 하나의 A-MPDU를 생성한 후에 AP (Access Point)에게 Block ACK (Acknowledgement)과 함께 송신한다. AP는 Block ACK과 A-MPDU를 수신하여 송신과정에서 누락되거나 일부 손상된 프레임에 한하여 개별 노드로부터

프레임 재전송을 요청한다. A-MPDU 기법은 프레임을 집계할 때, 각 프레임의 헤더와 MPDU를 한꺼번에 집계하므로 AP는 개별 노드에게 재전송을 요청할 수 있다. 따라서 데이터 손실 위험을 줄일 수 있으므로 네트워크 처리량을 향상시킬 수 있다. 이후 낮은 채널 점유율 그룹은 노드의 전력 소모량을 줄이기 위해 sleep 상태에 진입한다. 이때, 높은 채널 점유율 그룹이 활성화되어 동일한 방식으로 중앙 노드가 그룹 내 노드 MPDU를 집계하여 AP에게 송신한다. 낮은 채널 점유율 그룹을 먼저 활성화함으로써, 높은 채널 점유율 노드들이 채널을 독점하는 것을 방지한다. 그리고 전체 채널의 처리량을 높이며, 그룹 전송 순서를 sleep 상태를 기준으로 스케줄링하여 IoT 노드의 전력 소모를 최소화할 수 있다.

4. 성능 평가

4.1 실험 환경

본 장에서는 CATEIN의 성능을 검증하기 위한 실험 환경을 설명한다. CATEIN의 성능 비교를 위해 종래 모델은 802.11n 표준인 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 기반의 개별 노드 전송 방식으로 설정하였다 [2].

본 실험은 파이썬으로 제안 모델과 종래 모델을 모델링하여 성능 평가했다. 시뮬레이션 환경은 802.11n 표준을 기반으로 A-MPDU의 최대 길이는 65,535 바이트, A-MPDU 서브 프레임의 MPDU의 최대 길이는 4,095 바이트로 설정하였다. 하나의 BSS (Basic server set)에 총 1000 개의 IoT 노드와 1 개의 AP가 존재하는 환경으로 시뮬레이션 환경을 구현하였으며, 노드 간 통신 과정에서 충돌이 발생할 확률을 적용하였다. 평가 지표로는 처리량, 전력 소비량, 효율성을 사용하였으며, 처리량은 Eq. (1)에 따라 계산하였다.

Throughput (Kbps)

$$= \frac{\text{Data successfully transmitted (bytes)} \times \frac{8}{1000}}{\text{Time interval (seconds)}} \quad (1)$$

전력 소비량의 변수 및 수식은 다음 표 1과 Eq. (2), Eq. (3)와 같다.

<표 1> 변수 정의

Parameter	Meaning
Δt	Time duration in the specific state (seconds)
$E_{node}(i)$	Energy consumption of node i (joules)
E_{total}	The sum of the energy consumed by all N nodes plus the energy consumed by the Access Point

P_{state}	Power consumption rate in a specific state (watts)
P_{rx}	0.05 W (transmission)
P_{idle}	0.03 W (reception)
P_{sleep}	0.01 W (idle)
E_{AP}	0.0001 W (sleep)
$P_{AP,rx}$	0.1 W
$P_{AP,retx}$	0.03 W

$$E_{total} = \sum_{i=1}^N E_{node}(i) + E_{AP} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{Energy Consumption per Successful Transfer (J)} \\ &= \frac{E_{total}}{\text{Number of Successfully Transmitted MPDUs}} \quad (3) \end{aligned}$$

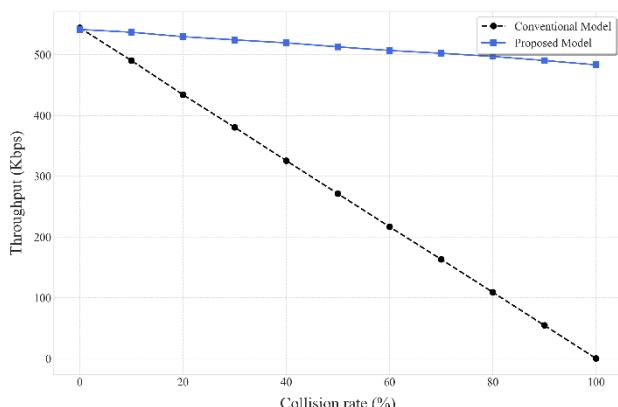
각 노드와 AP의 총 전력 소비량을 구하여 제안 기법과 종래 기법으로 통신했을 때 총 소비되는 전력을 측정하였다. 효율성 수식은 다음 Eq. (4)에 따라 계산하였다.

$$\text{Efficiency (Kbps/J)} = \frac{\text{Throughput (Kbps)}}{\text{Energy Consumption (J)}} \quad (4)$$

효율성은 충돌 확률에 따른 처리량을 총 전력 소모량으로 나눈 값으로 측정하였다. 동일 BSS 내에서 충돌이 존재하는 비율 별 처리량과 전력 소비량을 평가하였으며, 시뮬레이션은 총 1000 회 반복하였다.

4.2 실험 결과

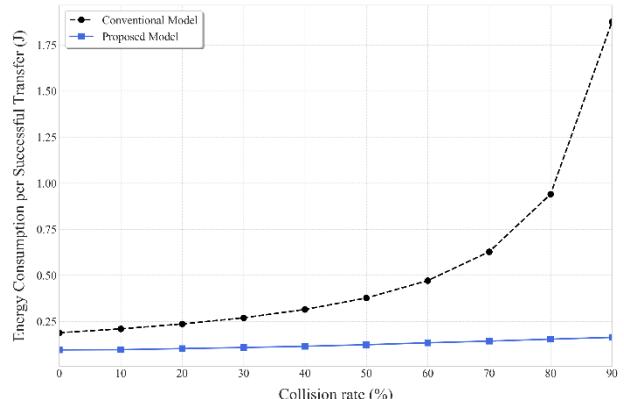
그림 3은 제안하는 CATEIN과 종래모델의 처리량을 비교한 결과이다.



(그림 3) 충돌 확률에 따른 CATEIN의 처리량 성능 평가 결과

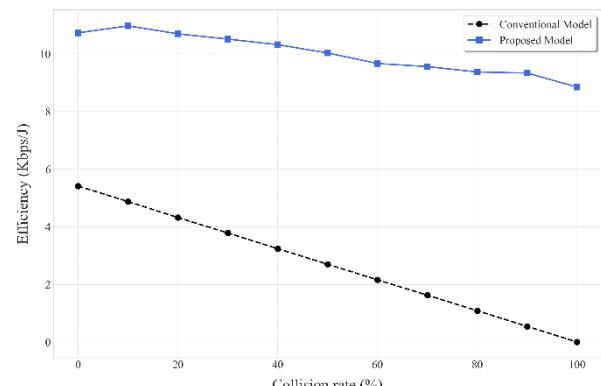
그림 3에 따르면, 종래모델과 제안모델 모두 충돌 확률이 증가함에 따라 처리량이 감소하는 결과를 보였으나, 제안 모델은 충돌이 없을 때의 처리량인 541.45Kbps 부터 483.26Kbps 까지 10.75% 처리량이 감소하였다. 반면, 종래모델은 처리량이 급격하게 감소하였다.

하였으며, 따라서 제안 모델은 충돌 비율 90%일 때 종래 모델보다 처리량을 799.73% 개선하였다. 이는 안 델이 충돌로 인하여 데이터를 손실하더라도 A-MPDU의 서브 프레임 헤더를 유지함으로써 AP가 손실 데이터를 확인하여 재전송을 요청할 수 있기 때문이다. 종래모델의 경우에도 동일하게 재전송 요청 메커니즘이 존재하지만, 1,000 개의 노드가 직접 AP에 데이터를 전송하여 충돌이 빈번하게 발생한다. 그림 4는 제안하는 CATEIN과 종래모델의 전력 소비량을 비교한 결과이다.



(그림 4) 충돌 확률에 따른 CATEIN의 데이터 전송 당 전력 소비량 성능 평가 결과

그림 4에 따르면, 제안모델과 종래모델 모두 충돌 확률이 증가함에 따라 개별 노드의 MPDU 재전송이 발생하므로 전력 소모량이 증가하였다. 종래모델은 모든 노드가 AP에게 직접 MPDU를 송신하므로 더 많은 충돌로 인한 재전송이 빈번하게 발생하였고, 제안모델보다 활성 상태가 더 오래 유지되면서 더 많은 전력을 소모하였다. 제안모델은 채널 점유율이 낮은 그룹과 높은 그룹 중 한 그룹이 활성화되면, sleep 상태로 들어가기 때문에 종래모델보다 더 적은 전력을 소모할 수 있었다. 그림 5는 CATEIN과 종래모델의 효율성을 비교한 결과이다.



(그림 5) 충돌 확률에 따른 CATEIN의 효율성 평가 결과

그림 5에 따르면, 충돌 확률이 증가하면서 제안모

델과 종래모델 모두 효율성이 감소하는 경향을 보였으나, 제안모델의 효율성이 항상 높게 나타났다. 제안모델은 중앙 노드가 A-MPDU 방식으로 AP에게 전송하여 높은 처리량을 유지하고, 그룹 간 전송 스케줄링을 통해 IoT 노드의 전력 소모를 최소화할 수 있어 종래모델보다 전송 효율성을 높일 수 있다.

5. 결론

IoT의 발전으로 무선 네트워크 상에서 연결되는 IoT 트래픽의 수가 기하급수적으로 증가하였다. 또한 디바이스 종류에 따라 송수신하는 데이터 크기의 범위가 광범위해지면서 IoT 네트워크에서의 효율적인 데이터 처리가 점차 중요해지고 있다. 이에 IoT 트래픽을 효율적으로 처리하기 위한 기법들이 연구되어 왔다. 그러나 네트워크 처리량에만 초점을 맞추어 IoT의 제한된 전력 소모량을 고려하지 않았다는 한계점이 있다. 본 연구에서는 IoT 네트워크 환경에서 채널 상태를 인지하여, 동적으로 A-MPDU를 활용한 데이터 집계 기법인 CATEIN을 제안하였다. 실험 결과에 따르면, CATEIN이 종래모델 대비 처리량은 평균 799.73%, 효율성은 15.68 배 증가했으며, 전력 소모량은 평균 91.45% 개선되었다. 향후 연구에서는 그룹을 세부적으로 클러스터링하여 단일 채널에서의 효율적인 스케줄링에 초점을 맞춘 연구를 진행할 예정이다.

Acknowledgement

본 논문은 2025년도 과학기술정보통신부 및 한국연구재단의 중견연구 사업(RS-2025-00518150)과 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 산업혁신인재성장지원사업(RS-2024-00415520)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT 혁신인재 4.0 사업(IITP-2022-RS-2022-00156310)과 정보보호핵심원천기술개발 사업(RS-2024-00437252)의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

- [1] IoT Analytics. "Connected IoT device market update—Summer 2024." IoT Analytics. 2024. <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- [2] IEEE Std 802.11n-2009. IEEE Standard for Information Technology—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. 2009.
- [3] IEEE Std 802.11ax-2021. 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. 2021.

- [4] Yun, S. W., Park, N. E., & Lee, I. G. "Wake-Up Security: Effective Security Improvement Mechanism for Low Power Internet of Things." Intelligent Automation & Soft Computing, 37(3) (2023): 2897-2917.
- [5] Ibrahim, A. S., et al. "Adaptive aggregation based IoT traffic patterns for optimizing smart city network performance." Alexandria Engineering Journal 61.12 (2022): 9553–9568.
- [6] Azevedo, R. D., et al. "A reduced network traffic method for IoT data clustering." ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data 15.1 (2020): 1–23.
- [7] Sivanathan, A., Gharakheili, H. H., & Sivaraman, V. "Detecting behavioral change of IoT devices using clustering-based network traffic modeling." IEEE Internet of Things Journal 7.8 (2020): 7295–7309.