

전이중통신에서 단말 간 협력을 이용한 효율적인 패킷 전송 요청 기법

안형태*, 이하림^o

Efficient Packet Transmission Request Scheme Using Inter-Node Cooperation in Full-Duplex Communications

Hyeongtae Ahn*, Harim Lee^o

요약

최근 급격히 증가하는 무선 통신의 트래픽에 비해, 무선랜의 가용 주파수 대역은 현저히 부족하다. 따라서 주파수 대역의 효율성을 증가시킬 수 있는 전이중(full-duplex) 라디오 기술이 주목받고 있다. 전이중 라디오는 송신 중에 발생하는 자기 간섭 신호를 잡음단계까지 제거함으로써, 같은 주파수 대역에서 신호를 동시에 송수신할 수 있는 무선 기술이다. 하지만 기존 무선랜은 반이중 라디오를 기반으로 설계되었기 때문에, 전이중 라디오를 활용할 수 없다. 따라서 전이중 라디오를 활용하기 위해 새로운 MAC(media access control) 프로토콜들이 제안되고 있으며, 많은 연구에서 스케줄링(scheduling) 기반의 동작 방식을 채택했다. 스케줄링 기반 MAC 프로토콜에서 access point(AP)는 각 단말에 슬롯(slot)을 할당하고, 단말은 할당된 슬롯에서 패킷 전송을 요청한다. 이를 통해 AP는 단말들의 패킷 전송 요청을 파악하여 각 단말의 패킷 전송을 스케줄링하여 통보하면, 단말들은 스케줄링에 따라 패킷을 전송한다. 따라서 충돌 등 단말 간의 채널 접근 경쟁으로 낭비되는 채널 시간 없이 효율적으로 패킷을 전송할 수 있다. 하지만 단말의 숫자가 증가할수록, 단말의 패킷 전송 요청을 확인하기 위한 슬롯의 시간도 비례해서 증가하는 문제가 있다. 본 연구는 이러한 스케줄링 기반 MAC 프로토콜의 문제를 해결하고자, 단말 간 협력을 이용하여 전송 요청 확인에 필요한 슬롯을 절반으로 감소시키는 기법을 제안한다. 본 논문은 가장 대표적인 스케줄링 기반 MAC 프로토콜인 Janus를 기반으로 제안된 기법의 동작 방식을 설명하고, 분석 모델과 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 성능을 평가한다.

키워드 : MAC 프로토콜, 무선랜, 무선 통신, 전이중 라디오

Key Words : MAC protocol, WLAN, wireless communication, full-duplex radio

ABSTRACT

In contrast to the rapidly increasing wireless communication traffic, the available frequency spectrum for wireless local area networks(WLANs) is significantly limited. Therefore, full-duplex radio technology that can increase the efficiency of the frequency spectrum is attracting attention. Full-duplex radio is a wireless technology that can transmit and receive signals simultaneously in the same frequency spectrum by eliminating

* 이 연구는 금오공과대학교 대학 학술연구비로 지원되었음(2021)

[•] First Author : Kumoh National Institute of Technology, Department of Computer Engineering, anten@kumoh.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Kumoh National Institute of Technology, School of Electronic Engineering, hrlee@kumoh.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202308-068-A-RN, Received August 30, 2023; Revised November 28, 2023; Accepted December 27, 2023

self-interference signals that occur during transmission. However, because existing WLANs are designed based on half-duplex radio, they cannot utilize full-duplex radio. Therefore, to utilize full-duplex radio in WLANs, a new medium access control(MAC) protocol is required. Several full-duplex MAC protocols have been proposed, and many studies have adopted a scheduling-based operation. In scheduling-based MAC protocols, an access point(AP) assigns a slot to each node, and a node having data to transmit requests packet transmission through the assigned slot. The AP realizes which nodes have data to transmit and schedules their packet transmission, and the nodes transmit packets according to the scheduling. This allows efficient packet transmission without wasting channel time, such as collisions. However, as the number of nodes increases, the slot time to confirm a node's packet transmission request also increases proportionally. To solve this problem, we propose a scheme to halve the number of slots required to confirm packet transmission requests by exploiting inter-node cooperation. This paper describes the operation of the proposed scheme based on Janus, the most representative scheduling-based MAC protocol, and evaluates the performance of the proposed scheme through analytical models and simulations.

I. 서 론

최근 급격히 증가하는 무선 통신의 트래픽에 비해, 가용 주파수 대역이 현저히 부족하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 mmWave 등 고주파수 대역을 활용한 무선 통신이 활용되고 있지만, 고주파수 대역의 전파 특성 때문에 전송 거리가 제한되어 많은 기지국 설치가 요구된다. 따라서 기존 주파수 대역의 효율성을 증가시키는 무선 통신 기술의 필요성이 증가하고 있다.

전이중(full-duplex) 라디오는 주파수 대역의 효율성을 증가시킬 수 있는 대표적인 차세대 무선 통신 기술이다. 기존 반이중(half-duplex) 라디오는 신호 송신으로 발생하는 자기 간섭(self-interference) 신호의 세기가 너무 강력하여 같은 주파수 대역에서 송신 중에 다른 신호를 정상적으로 수신할 수 없었다. 따라서 같은 주파수 대역에서 신호의 송신과 수신을 별도의 시간에 수행하는 반이중통신만 가능했다. 하지만 자기 간섭 제거 기술들이 점차 발전하면서 자기 간섭 신호를 잡음(noisy) 단계까지 제거할 수 있는 전이중 라디오 기술이 현실화하였다^{1,2)}. 전이중 라디오를 활용하면, 같은 주파수 대역에서 신호를 동시에 송수신할 수 있는 전이중통신은 가능해지므로, 기존 반이중통신에 비해 주파수 대역의 잠재적인 용량이 두 배가 된다. 이러한 전이중 라디오의 이점 때문에 IEEE 802.11에서 무선랜(wireless local area network) 표준에 전이중통신을 적용하기 위한 타당성 연구를 진행하였다³⁾. 2018년에 IEEE 802.11be의 전신인 Extreme High Throughput의 Study Group에서 전이중통신을 무선랜에 적용하기 위해 Task Interest Group을 조직하였다. 그 결과, 아직 표준화가 진행 중인 IEEE 802.11be에

서는 전이중통신이 표준으로 채택될 가능성은 적지만, IEEE 802.11에서 무선랜용 전이중통신 시스템의 활용 방향이 점차 명확해지고 있으며, IEEE 802.11be 다음 무선랜 표준에서 채택이 유력한 무선 통신 기술로 여전히 주목받고 있다.

무선랜에서 전이중통신을 활용하기 위해서는 상향링크 단말(uplink node)과 하향링크 단말(downlink node)이 결정되는 전이중링크 설정 과정이 필요하다. 여기서 상향링크 단말은 Access Point(AP)에게 데이터를 송신하는 단말이고, 하향링크 단말은 AP로부터 데이터를 수신받는 단말이다. 기존 반이중통신은 Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance(CSMA/CA) 기반으로 동작하면서, 채널 접근 경쟁에서 승리한 단말이 데이터 패킷을 바로 전송했다. 하지만, 전이중통신은 일반적으로 상향링크 단말과 하향링크 단말의 짝(fair)이 결정되는 전이중링크 설정 과정 후에 데이터 패킷을 전송한다. 전이중링크는 상향링크 단말과 하향링크 단말의 관계에 따라 대칭 전이중링크(symmetric full-duplex link)와 비대칭 전이중링크(asymmetric full-duplex link)로 구분된다. 대칭 전이중링크(그림 1a)는 상향링크 단말과 하향링크 단말이 같으며, 단말과 AP는 전이중 라디오로 자기 간섭 신호를 제거하면서, 동시에 서로에게 데이터 패킷을 전송한다. 대칭 전이중링크 설정은 비교적 간단하지만, AP와 단말이 서로에게 전송할 데이터가 있는 경우에만 설정할 수 있다. 대조적으로 비대칭 전이중링크(그림 1b)는 상향링크 단말과 하향링크 단말이 다르다. 상향링크 단말이 AP에게 데이터 패킷을 전송하는 동안, AP는 전이중 라디오로 자기 간섭 신호를 제거하면서 하향링크 단말에게 데이터 패킷을

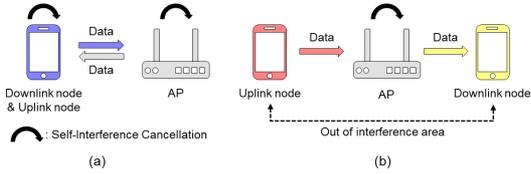


그림 1. 전이중링크의 두 가지 분류:(a) 대칭 전이중링크,(b) 비대칭 전이중링크
Fig. 1. Two categories of full-duplex links:(a) A symmetric full-duplex link.(b) An asymmetric full-duplex link.

전송한다. 이때 하향링크 단말이 정상적으로 데이터가 수신되기 위해서는, AP가 전송하는 데이터 패킷의 신호 크기가 상향링크 단말의 데이터 패킷 전송으로 발생하는 간섭 신호의 크기보다 충분히 커야 한다. 즉, 하향링크 단말은 상향링크 단말의 간섭 영역 (interference area) 밖에 존재해야 한다. 전이중링크 설정 확률을 높이기 위해서 대칭 전이중링크와 비대칭 전이중링크 설정이 모두 가능해야 한다. 따라서 AP는 자신의 버퍼 정보, 단말들의 버퍼 정보, 단말 간의 간섭 정보를 파악하고, 이를 바탕으로 적절한 상향링크 단말과 하향링크 단말의 짝을 결정할 수 있어야 한다.

기존 무선랜의 Medium Access Control(MAC) 프로토콜은 반이중통신을 기반으로 설계되었으므로, 전이중링크를 설정할 수 없다. 따라서 전이중링크를 설정할 수 있도록 설계된 새로운 MAC 프로토콜이 필요하다.

II. 관련 연구

이미 여러 연구에서 전이중링크 설정을 위한 전이중 MAC 프로토콜들이 제안되었다. 제안된 MAC 프로토콜들은 크게 경쟁 기반의 분산형(distributed) MAC 프로토콜과 스케줄링 기반의 중앙집중형(centralized) MAC 프로토콜로 분류할 수 있다^{4,5}. 경쟁 기반의 MAC 프로토콜은 단말은 CSMA/CA 기반으로 동작하며 기존 단말에 하위호환성을 제공할 수 있고, 비교적 동작이 간단하다는 장점이 있다.

하지만 단말이 점차 밀집되고 있는 현재 무선랜 환경에서는 단말 간의 과도한 경쟁으로 충돌이 많이 발생하여 채널이 낭비된다. 특히 IEEE 802.11ax부터 밀집된 단말이 존재하는 경기장 환경이 주요 무선랜 시나리오에서는 채택되면서, AP마다 100~200개의 단말에 무선랜 서비스를 제공해야 한다^{6,8}. 또한, AP는 전이중링크 설정에 필요한 정보들을 제한적으로만 수집

할 수 있으므로, 효율적인 전이중링크 설정이 어려워 반이중링크가 설정될 가능성이 높다⁵.

이러한 경쟁 기반 방식 MAC 프로토콜의 단점들을 해결하기 위해 스케줄링 방식의 MAC 프로토콜이 제안되었다⁹⁻¹². 스케줄링 기반의 MAC 프로토콜에서 AP는 각 단말에 슬롯(slot)을 할당하고, 단말은 할당된 슬롯에서 데이터 패킷 전송을 요청한다. 이를 통해 AP는 단말들의 데이터 패킷 전송을 파악하고 패킷 전송 순서를 스케줄링하여 통보하면, 단말들은 스케줄링 정보에 따라 데이터 패킷을 전송한다. 따라서 충돌 등 단말 간의 채널 접근 경쟁으로 낭비되는 채널 시간 없이 효율적으로 패킷을 전송할 수 있다. 또한, AP가 주기적으로 모든 단말로부터 버퍼 정보와 간섭 정보를 수집하므로 매우 효율적으로 전이중링크를 설정할 수 있다. 하지만 단말의 숫자가 증가할수록, 단말의 전송 요청을 확인하는 슬롯의 시간도 비례해서 증가하는 문제가 있다.

그림 2는 가장 대표적인 스케줄링 기반의 전이중 MAC 프로토콜인 Janus⁹의 동작 방식을 나타낸다. 먼저 AP는 Probe Request(PR) 패킷을 전송하여 단말들에 새로운 전송 라운드가 시작됐음을 알린다. 전송할 데이터를 가진 단말들은 PR 패킷에 대한 응답으로 자신에게 할당된 슬롯에서 signal tone 기반의 요청 플래그(request flag)를 각각 전송한다. 이 동작 예제에서 20개의 단말이 Association ID(AID) 순서대로 슬롯을 하나씩 할당받았고, 5번, 6번, 12번, 17번 단말은 전송할 데이터를 가졌다. 따라서 해당 단말들은 자신에게 할당된 5번, 6번, 12번, 17번 슬롯에서 요청 플래그 신호를 전송하였고, 슬롯마다 요청 플래그를 전송할 단말이 유일하게 할당되어 있으므로, AP는 5번,

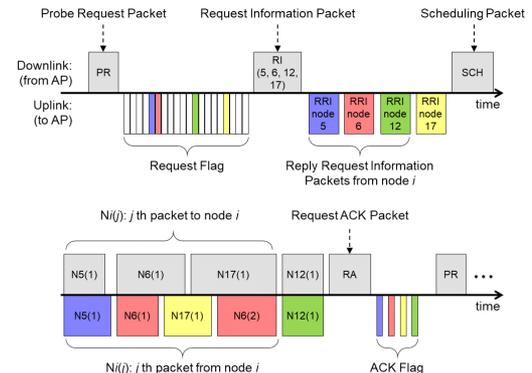


그림 2. 한 라운드 동안의 Janus MAC 프로토콜 동작 예
Fig. 2. An example of Janus MAC protocol operation during one round.

6번, 12번, 17번 단말에서 전송할 데이터가 있음을 파악한다. AP는 요청 플래그를 전송한 단말들에 Request Information(RI) 패킷을 전송하여, 해당 단말들의 응답 순서를 지정한다. RI 패킷을 수신받은 단말들은 지정된 응답 순서에 따라 Reply Request Information(RRI) 패킷을 전송한다. RRI 패킷에는 단말이 전송할 데이터양과 AP가 PR 패킷을 전송할 때 측정된 Received Signal Strength Indicator(RSSI) 정보, 다른 단말들이 요청 플래그를 전송할 때 측정된 RSSI 정보가 포함되어 있다. 따라서 AP는 응답한 단말이 전송할 데이터양과 다른 단말과 간섭 정보를 Signal-to-Interference Ratio(SIR)로 파악할 수 있다. 수집된 SIR 정보는 비대칭 전이중링크 설정에서 상향링크 단말과 하향링크 단말의 짝을 결정할 때 활용되며, SIR을 기반으로 적절한 변조와 코딩 방식(modulation and coding scheme)을 선택하여 데이터 패킷을 전송한다¹³⁾. AP는 수집한 정보와 지연시간(latency), 단말 간의 공정성(fairness) 등을 고려하여 데이터 패킷 전송 순서를 스케줄링하고, 스케줄링 패킷을 전송하여 스케줄링 정보를 단말들에 통보한다. 이후 AP와 단말들은 스케줄링 정보에 따라 전이중링크를 설정하면서 연속적으로 데이터 패킷들을 전송한다. 이때 데이터 패킷을 정상적으로 수신받더라도 즉각적인 acknowledgement(ACK)는 보내지 않고, 모든 데이터 패킷 전송이 완료될 때까지 기다린다. 이후 AP는 Request ACK(RA) 패킷을 전송하여, 정상적으로 수신 받은 상향링크 데이터 패킷에 대한 ACK 정보를 전송하고, 하향링크 단말들에게 ACK 플래그를 전송할 순서를 지정한다. 하향링크 단말들은 RA 패킷에서 지정한 순서에 따라서 signal tone 기반의 ACK 플래그를 전송한다. AP는 각 단말의 응답 순서를 알고 있으므로, 하향링크 단말들이 데이터 패킷을 정상적으로 수신 받았는지를 ACK 플래그를 통해 파악할 수 있다. 이처럼 Janus 전이중 MAC 프로토콜은 단말 간의 경쟁 없이 연속적으로 전이중링크를 설정하여 다수의 데이터 패킷을 전송할 수 있다. 하지만 단말의 숫자는 많지만, 전송할 데이터를 가진 단말이 소수인 상황에서도, 모든 단말에 슬롯을 할당하고 요청 플래그 전송 여부를 하나씩 확인해야 하므로 많은 시간이 소모된다. 그림 2의 예제에서 20개의 단말만 AP와 연결되어 있으므로, 라운드마다 20개의 슬롯에서 요청 플래그 전송 여부를 확인했지만, 경기장 등 단말이 밀집된 무선랜 환경에서는 라운드마다 100개 이상의 슬롯에서 요청 플래그 전송 여부를 확인해야 한다.

본 연구는 이러한 스케줄링 기반 MAC 프로토콜의

문제를 해결하고자, 단말 간의 협력을 활용하여 단말들의 패킷 전송 요청 확인에 필요한 슬롯을 절반으로 감소시키는 기법을 제안한다.

III. 본 론

3.1 제안된 패킷 전송 요청 기법

본 연구에서 제안하는 기법은 하나의 슬롯에 2개의 단말을 할당한다. 같은 슬롯에 할당된 두 단말은 서로의 간섭 영역 안에 있으며, 단말 간의 우선순위도 존재한다. 그림 3a처럼 단말이 요청 플래그를 전송할 때, 전이중 라디오를 활용하여 자신의 송신으로 발생하는 자기 간섭 신호를 잡음 수준까지 제거하면서, 같은 슬롯에 할당된 다른 단말의 요청 플래그 전송 여부를 파악한다. AP는 슬롯 시간 동안 수신되는 신호의 에너지를 탐지하면서 해당 슬롯에서 전송된 요청 플래그를 쉽게 파악할 수 있다. 이후 AP는 요청 플래그가 감지된 슬롯들에 대한 RI 패킷을 보내면, 해당 슬롯에 할당된 한 단말이 RRI 패킷으로 응답한다.

요청 플래그가 감지된 슬롯은 다음의 3개 경우로

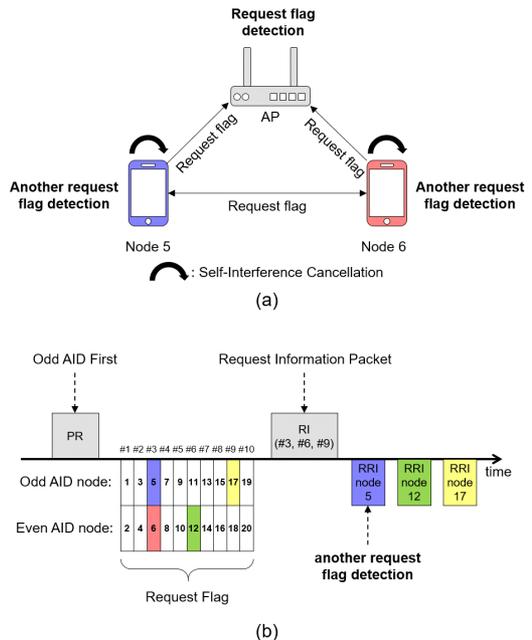


그림 3. 제안된 기법의 동작 방식 예: (a) 같은 슬롯에 할당된 두 단말은 요청 플래그를 전송하면서 전이중 라디오를 활용하여 서로의 요청 플래그를 감지, (b) 슬롯 숫자가 절반으로 줄어듦

Fig. 3. Operation examples of the proposed scheme. (a) Two nodes assigned to the same slot transmit request flags and use full-duplex radio to detect each other's request flag. (b) Number of slots reduced by half.

구분할 수 있다. 첫째, 슬롯에 할당된 두 단말 모두 요청 플래그를 전송한 경우이다. 그림 3a처럼 같은 슬롯에 할당된 5번, 6번 단말이 동시에 요청 플래그를 전송하면, 요청 플래그 간에 충돌이 발생하지만, AP는 슬롯 시간 동안 수신되는 신호의 에너지를 탐지하여 5번과 6번이 속한 슬롯에서 요청 플래그가 전송되었음을 파악할 수 있다. 5번 단말은 요청 플래그를 전송하면서 전이중 라디오를 활용하여 자기 간섭 신호를 제거하여 6번 단말에서 전송된 요청 플래그 감지한다. 6번 단말도 마찬가지로 요청 플래그를 전송하면서 전이중 라디오를 활용하여 5번 단말의 요청 플래그를 감지할 수 있다. 따라서 5번과 6번 단말은 서로의 요청 플래그 전송을 파악할 수 있다. 이후 우선순위가 높은 단말이 AP가 전송한 RI 패킷에 대한 응답으로 RRI 패킷을 전송한다. 해당 RRI 패킷에는 같은 슬롯에 할당된 다른 단말도 요청 플래그를 전송했다는 정보가 포함된다. 만약 5번 단말이 6번 단말보다 우선순위가 높다면, AP가 보낸 RI 패킷에 대한 응답으로 5번 단말은 6번 단말도 요청 플래그를 전송했다는 정보가 포함된 RRI 패킷을 전송한다. 따라서 AP는 해당 슬롯에 할당된 두 단말 모두 요청 플래그를 전송했음을 파악할 수 있다. 요청 플래그가 감지된 슬롯의 두 번째 경우는, 우선순위가 높은 단말만 요청 플래그를 전송한 경우이다. 우선순위가 높은 단말은 요청 플래그를 전송하면서 전이중 라디오로 다른 단말의 요청 플래그 전송을 감지하지 못한다. 따라서 해당 슬롯에서 자신만 요청 플래그를 전송했다는 것을 파악하고, AP에게 RRI 패킷을 전송한다. 세 번째 경우는, 우선순위가 낮은 단말만 요청 플래그를 전송한 경우이다. 우선순위가 낮은 단말은 전이중 라디오를 통해 우선순위가 높은 단말에서 요청 플래그가 전송되지 않았음을 파악한다. 따라서 우선순위가 낮은 단말이 AP가 보낸 RI 패킷의 응답으로 RRI 패킷을 전송한다.

그림 3b는 제안된 기법의 동작 방식을 나타낸다. AP는 라운드 시작을 알리기 위해 PR 패킷을 전송하면서, AID가 홀수인 단말이 우선순위가 있다는 것을 알린다. 공평성을 위해 다음 라운드에는 AID가 짝수인 단말이 우선순위를 가진다. 그림 2의 예제와 마찬가지로, 단말 5번, 6번, 12번, 17번이 전송할 데이터를 가지고 있다. 무선랜에 총 20개의 단말이 있지만, 제안된 기법은 10개의 슬롯으로 모든 단말의 전송 요청을 확인할 수 있다. 단말 5번과 6번은 AID 순서대로 3번 슬롯을 할당받았으며, 단말 12번은 6번 슬롯, 단말 17번은 9번 슬롯을 할당받았다. 단말 5번과 6번은 서로의 간섭 영역 안에 있으며, 3번 슬롯에서 요청 플

래그 신호를 동시에 전송한다. 이때, 단말 5번은 전이중 라디오를 활용하면서 단말 6번이 요청 플래그를 전송했음을 파악하고, 단말 6번도 마찬가지로 단말 5번이 요청 플래그를 전송했음을 파악한다. 이후 6번 슬롯에서 우선순위가 낮은 단말 12번, 9번 슬롯에서 우선순위가 높은 단말 17번이 요청 플래그를 전송한다. 전이중 라디오를 활용하여 단말 12번과 17번은 할당받은 슬롯에서 자신만 요청 플래그를 전송했음을 파악한다. 이후, AP는 요청 플래그가 탐지된 3번, 6번, 9번 슬롯에 대한 RI 패킷을 전송한다. 이번 라운드는 홀수 AID를 가진 단말이 우선순위를 가지므로, 3번 슬롯에서 단말 5번만 RI 패킷의 응답으로 RRI 패킷을 전송한다. 해당 RRI 패킷에는 단말 5번의 전송할 데이터양, AP가 PR 패킷을 전송할 때 측정된 AP의 RSSI 정보, 다른 슬롯들에서 측정된 요청 플래그들의 RSSI 정보, 그리고 단말 6번이 요청 플래그를 전송했다는 정보가 포함된다. 따라서 AP는 단말 6번도 전송할 데이터가 있음을 파악할 수 있다. 이후 RI 패킷이 지정한 6번과 9번 슬롯의 RRI 패킷 전송 시간에 단말 12번과 17번이 각각 RRI 패킷을 전송한다. 모든 RRI 패킷 전송이 종료되면, AP는 단말 5번, 6번, 12번, 17번이 전송할 데이터가 있음을 파악했다. 이를 바탕으로 단말들의 데이터 패킷 전송 순서를 스케줄링하고, 전이중링크를 연속적으로 설정하면서 데이터 패킷들을 전송한다.

3.2 정교한 스케줄링 활용

이처럼 AP는 전송할 데이터를 보유한 단말만 파악해도, 데이터 전송을 위한 전이중링크 설정을 스케줄링할 수 있다. 하지만 그림 3b의 예제에서 단말 6번은 RRI 패킷을 전송하지 않았기 때문에, AP는 단말 6번의 전송할 데이터양과 RSSI 정보들을 정확히 파악할 수 없으므로 최적(optimal)에 근접한 정교한 스케줄링(sophisticated scheduling, SS)을 수행하기 어렵다. 따라서 제안된 기법의 선택사항으로, 그림 4처럼 정교한 스케줄링을 수행하기 위해 AP는 두 번째 RI 패킷을 전송할 수 있다. 두 번째 RI 패킷은 요청 플래그를 전송했지만, 우선순위가 낮아 RRI 패킷을 전송하지 못한 단말들에 전송되며, 그림 4에서 단말 6번은 자신의 보유한 데이터양과 RSSI 정보를 RRI 패킷으로 AP에게 보고한다. 이를 바탕으로 AP는 정교한 스케줄링이 가능하지만, 두 번째 RI 패킷이 추가로 전송되므로 성능은 약간 감소할 수 있다. 하지만 두 번째 RI 패킷 전송에 필요한 시간이 제안된 기법으로 감소한 슬롯의 시간보다 작다면, 여전히 기존의 Janus MAC 프로

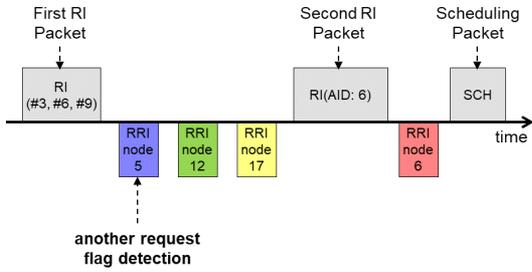


그림 4. 정교한 스케줄링을 사용하는 제안된 기법
Fig. 4. The proposed scheme using sophisticated scheduling.

토콜보다 성능이 우수하다.

새로운 단말이 AP와 결합(association)한다면, 단말은 이전 라운드 전송에서 탐지된 요청 플래그나 ACK 플래그의 RSSI 정보가 포함된 결합 요청 패키지를 AP에게 전송한다. 따라서 AP는 기존 단말 간의 간섭 정보를 파악하여, 새로운 단말에 적절한 AID를 할당한다. 또한, 단말의 이동 등으로 같은 슬롯에 할당된 두 단말이 서로의 간섭 영역 밖으로 벗어날 수 있다. 따라서 서로의 요청 플래그 전송을 감지하지 못하면서, RRI 패킷 전송에서 충돌이 발생할 수 있다. 이러한 충돌이 발생하면, AP는 단말 중 하나와 재결합으로 AID를 변경시켜, 해당 단말이 할당된 슬롯을 변경시킨다.

같은 슬롯에 할당된 두 단말이 동시에 요청 플래그를 전송하면, 다른 슬롯에 할당된 단말은 해당 슬롯의 RSSI 정보를 잘못 파악할 수 있다. 하지만 AP는 해당 슬롯에서 두 단말 모두 요청 플래그를 전송했다는 정보를 파악하고 있으므로, 다른 단말이 보고한 해당 슬롯의 RSSI 정보에 대한 활용 여부를 판단할 수 있다.

IV. 성능분석

제안된 기법의 성능을 분석하기 위해 Janus MAC 프로토콜을 기반으로 성능을 평가했으며, 성능분석의 복잡성을 완화하기 위해 다음과 같이 가정했다. 하나의 AP와 N 개의 단말로 구성된 무선랜이 있으며, 채널에 잡음이 없고 모든 단말과 AP는 자기 간섭 신호를 완벽히 제거할 수 있는 전이중 라디오를 장착하고 있다. 모든 단말은 AP와 직접 통신이 가능하며, 단일 공간 스트림(spatial stream)만 활용한다. N 개의 단말 중 라운드마다 임의로 선택된 A 개의 단말만 활성화(active) 되어 즉시 전송이 가능한 데이터 패킷 하나를 가지고 있으며, AP도 활성화된 단말들에 즉시 전송할 수 있는 데이터 패킷들을 가지고 있는 포화 트래픽

(saturated traffic) 환경이다. 하향링크 데이터 패킷의 크기와 상향링크 데이터 패킷의 크기는 같으며, 모든 단말은 서로의 간섭 영역 안에 존재하여 대칭 전이중 링크만 설정된다.

전체 단말의 숫자가 N 개이고 라운드마다 임의로 선택된 활성화 단말이 A 개가 있으므로, 라운드마다 A 개의 전이중링크가 설정된다. 따라서 제안된 기법을 사용하지 않는 기존의 Janus MAC 프로토콜에서 라운드마다 요구되는 시간(T_{janus})은 다음과 같다.

$$T_{janus} = DIFS + T_{pr} + NT_{slot} + T_{ri} + A(T_{rri} + T_{data} + T_{ack} + 2SIFS) + T_{sch} + T_{ra} + 5SIFS \quad (1)$$

여기서, DIFS(Distributed Inter Frame Space)는 라운드 시작 대기 시간을 나타내며, SIFS(Short Inter Frame Space)는 패킷 간의 간격을 나타낸다. 또한, T_{pr} , T_{ri} , T_{rri} , T_{sch} , T_{ra} 는 각각 PR, RI, RRI, SCH, RA 패킷 전송에 필요한 시간을 나타내며, T_{data} 는 다운링크 또는 업링크 데이터 패킷 전송에 필요한 시간을 나타낸다. T_{slot} 는 하나의 요청 플래그 전송에 필요한 슬롯 시간을 나타내며, T_{ack} 는 하나의 ACK 플래그 전송에 필요한 시간을 나타낸다.

제안된 기법은 라운드마다 $N/2$ 개의 슬롯이 필요하며, 임의로 선택된 A 개의 활성화 단말이 요청 플래그를 전송한다면, 요청 플래그가 탐지된 슬롯의 숫자(R_f)는 다음과 같다.

$$R_f = \frac{N}{2} \left(1 - \left(1 - \frac{A}{N} \right) \left(1 - \frac{A}{N-1} \right) \right) \quad (2)$$

따라서 제안된 기법이 정교한 스케줄링을 활용하지 않는다면, 라운드마다 필요한 시간($T_{w/oSS}$)은 다음과 같다.

$$T_{w/oSS} = DIFS + T_{pr} + \frac{N}{2} T_{slot} + T_{ri} + T_{sch} + T_{ra} + 5SIFS + R_f(T_{rri} + SIFS) + A(T_{data} + SIFS + T_{ack}) \quad (3)$$

즉, $(N/2) T_{slot} + (A - R_f)(T_{rri} + SIFS)$ 만큼 기존 T_{janus} 보다 라운드마다 요구되는 시간이 감소한다.

제안된 기법이 정교한 스케줄링을 사용하더라도, 같은 슬롯에 할당된 두 단말이 동시에 요청 플래그를 전송한 슬롯이 전혀 없다면, 두 번째 RI 패킷은 전송

되지 않는다. 요청 플래그가 탐지된 모든 슬롯에서 오직 한 단말만 요청 플래그를 전송할 확률(P_{one})은 다음과 같다.

$$P_{one} = \prod_{i=0}^N (1 - \frac{i}{N-i}) \quad (4)$$

정교한 스케줄링을 사용하는 제안된 기법에서 라운드마다 필요한 시간을 T_{withSS} 라고 하자. T_{withSS} 는 P_{one} 확률로 $T_{w/oSS}$ 와 같으며 $1 - P_{one}$ 확률로 두 번째 RI 패킷이 전송된다. 따라서 T_{withSS} 은 다음과 같다.

$$T_{withSS} = P_{one} T_{w/oSS} + (1 - P_{one}) \times (T_{janus} - \frac{N}{2} T_{slot} + T_{ri} + SIFS) \quad (5)$$

즉, 제안된 기법으로 감소하는 슬롯의 시간($NT_{slot}/2$)이 두 번째 RI 패킷을 전송으로 추가되는 시간($T_{ri} + SIFS$)보다 크다면, T_{withSS} 는 T_{janus} 보다 라운드마다 요구되는 시간이 감소한다.

라운드마다 A 개의 전이중링크가 설정되며, 설정된 전이중링크마다 두 개의 데이터 패킷이 전송된다. 따라서 각 데이터 패킷에 포함될 실제 데이터양을 D 라고 하면, 라운드마다 $A(2D)$ 의 데이터가 전송된다. 기존의 Janus MAC 프로토콜의 포화 처리량(S_{janus}), 정교한 스케줄링을 사용하지 않는 제안된 기법의 포화 처리량($S_{w/oSS}$), 그리고 정교한 스케줄링을 사용하는 제안된 기법의 포화 처리량(S_{withSS})은 $A(2D)$ 데이터양을 라운드마다 요구되는 각각의 시간(T_{janus} , $T_{w/oSS}$, T_{withSS})으로 나눔으로써 계산할 수 있다.

V. 시뮬레이션

제안된 성능분석 모델의 유효성을 평가하기 위해 기존의 Janus MAC 프로토콜, 정교한 스케줄링을 활용하는 제안된 기법, 정교한 스케줄링을 활용하지 않는 제안된 기법 등의 포화 처리량(saturation throughput)을 측정하는 시뮬레이션을 구현하였다. 성능분석 모델의 결과와 시뮬레이션의 결과를 쉽게 비교하기 위해, 시뮬레이션에서도 성능분석 모델과 같은 가정들을 사용하였다. 테이블 1은 시뮬레이션에서 사용한 주요 파라미터를 나타내고 있으며, 기본적으로 IEEE 802.11ac^[14] 기반으로 파라미터들이 설정되었다. RI

패킷은 요청 플래그가 탐지된 슬롯을 지정하기 위해 요청 플래그가 탐지된 슬롯당 2비트씩 증가한다고 가정하였고, RRI 패킷은 다른 슬롯에서 탐지된 요청 플래그의 순서 및 RSSI 정보를 AP에게 보고하기 위해 요청 플래그가 탐지된 다른 슬롯당 2비트씩 증가한다고 가정했다. SCH 패킷은 상향링크와 하향링크의 데이터 패킷 전송을 시작하는 시간과 전송에 걸리는 시간을 지정하기 위해 활성화된 단말 당 8비트씩 증가한다고 가정했고, RA 패킷은 하향링크 단말들의 ACK 플래그 전송 시간을 지정하기 위해 활성화된 단말 당 2비트씩 증가한다고 가정했다.

그림 5는 활성화된 단말이 5개일 때, 전체 단말 숫자의 변화에 따른 측정된 포화 처리량의 결과를 나타낸다. 보라색은 정교한 스케줄링을 활용하지 않는 제안된 기법의 포화 처리량, 파란색은 정교한 스케줄링을 활용하는 제안된 기법의 포화 처리량, 붉은색은 기존의 Janus MAC 프로토콜의 포화 처리량을 나타낸다. 표식은 시뮬레이션의 결과를 나타내며, 점선은 분석 모델의 결과를 나타낸다. 전체 단말의 숫자가 10일 때, 정교한 스케줄링을 활용하는 제안된 기법과 기존의 Janus MAC 프로토콜의 처리량이 거의 같다. 10개의 단말 중에 5개의 단말이 활성화되므로, 같은 슬롯에 할당된 두 단말 모두 활성화될 확률이 높다. 따라서 정교한 스케줄링을 활용하는 제안된 기법에서 두

표 1. 시뮬레이터의 평가 매개변수
Table 1. Evaluation Parameters in the Simulator.

| Parameters | Values |
|--------------------------------|---|
| Data rate | 65 Mbps(64-QAM 5/6) |
| Basic rate | 6 Mbps(BPSK 1/2) |
| legacy PLCP | 20 μ s |
| PLCP of a data packet | 40 μ s |
| DIFS, SIFS | 34, 16 μ s |
| request flag, ACK flag | 9 μ s |
| MAC header and frame check sum | 34 bytes |
| Data payload | 1500 bytes |
| PR packet | 16 bytes |
| RI packet | 15 bytes +(2 bytes \times number of active slots) |
| RRI packet | 18 bytes +(2 bytes \times number of active slots) |
| SCH packet | 16 bytes +(8 bytes \times number of active nodes) |
| RA packet | 16 bytes +(8 bytes \times number of active nodes) |

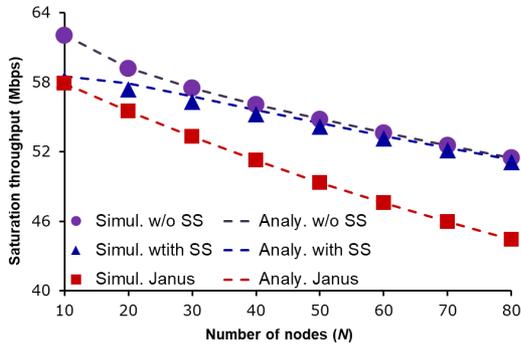


그림 5. 활성 단말의 숫자가 5일 때, 다양한 전체 단말 숫자에 따른 측정된 포화 처리량 결과
Fig. 5. Saturation throughput results according to various the number of nodes when the number of active nodes is 5.

번째 RI 패킷을 전송할 확률도 높아진다. 또한, 제안된 기법으로 감소하는 슬롯의 숫자도 5개뿐이므로, 기존의 Janus MAC 프로토콜과 비교했을 때 얻을 수 있는 처리량 이득도 적다. 하지만 점차 단말이 증가하면서, 정교한 스케줄링을 사용하는 제안된 기법의 처리량이 정교한 스케줄링을 사용하지 않는 제안된 기법과 처리량이 거의 근접한다. 전체 단말의 숫자가 80일 때, 5개의 단말만 활성화되므로, 같은 슬롯에 할당된 두 단말이 모두 활성화될 확률이 낮아서, 두 번째 RI 패킷을 전송할 확률도 낮아진다. 또한, 40개의 슬롯이 제안된 기법으로 감소하므로, 기존의 Janus MAC 프로토콜과 비교했을 때 얻을 수 있는 처리량 이득이 많다. 기존의 Janus MAC 프로토콜과 비교했을 때, 제안된 기법이 정교한 스케줄링을 활용하지 않는다면, 최대 15.8%, 평균적으로 10.6% 성능이 향상되었고, 정교한 스케줄링을 활용한다면, 최대 15.1%, 평균적으로 8.4% 성능 향상되었다. 성능분석 모델의 결과와 시뮬레이션의 결과 간의 상대오차(relative error)가 1%를 초과하는 결과는 없었다. 따라서 시뮬레이션을 통해 성능분석 모델의 정확도를 검증할 수 있었다.

그림 6은 단말의 숫자가 50일 때, 활성화된 단말 숫자의 변화에 따른 측정된 포화 처리량의 결과를 나타낸다. 전체 단말의 숫자가 50일 때, 활성화된 단말의 숫자가 5이면, 같은 슬롯에 할당된 두 단말이 동시에 요청 플래그를 전송할 확률이 낮다. 따라서 정교한 스케줄링을 활용하는 제안된 기법에서 두 번째 RI 패킷을 전송할 확률이 낮으므로, 정교한 스케줄링을 활용하지 않는 제안된 기법과 처리량이 거의 같다. 정교한 스케줄링을 활용하지 않는 제안된 기법은 활성화된 단말이 증가할수록 전송 라운드마다 실제 데이터 패킷 전송에 활용되는 시간의 비율도 증가하기 때문

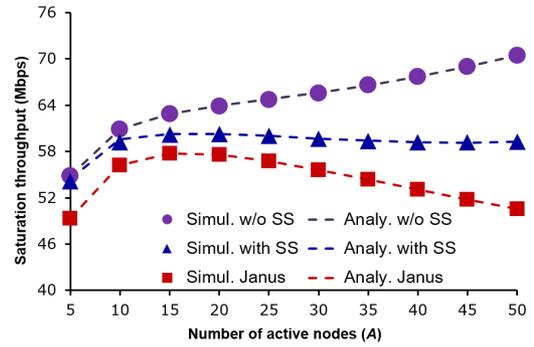


그림 6. 단말의 숫자가 50일 때, 다양한 활성 단말 숫자에 따른 측정된 포화 처리량 결과
Fig. 6. Saturation throughput results according to various the number of active nodes when the number of nodes is 50.

에 처리량이 계속 증가한다. 반면, 정교한 스케줄링을 활용하는 제안된 기법은 활성화된 단말의 숫자가 10부터 점차 처리량 증가가 정제된다. 이는 활성화된 단말의 숫자가 증가함에 따라서 두 번째 RI 패킷을 전송할 확률도 증가하기 때문이다. 기존의 Janus MAC 프로토콜은 활성화된 단말의 숫자가 20부터 오히려 성능이 감소한다. 원인을 분석하면, 활성화된 단말이 증가할수록 요청 플래그가 탐지된 슬롯의 숫자도 증가한다. 각 단말은 RRI 패킷을 보낼 때, 요청 플래그가 탐지된 다른 슬롯의 순서와 RSSI 정보를 포함하여 전송하는데, 요청 플래그가 탐지된 슬롯이 증가함에 따라서 RRI 패킷의 길이가 점차 길어진다. 또한, 매 라운드에서 이처럼 길이가 증가한 RRI 패킷이 한번이 아닌 활성 노드 숫자만큼 전송되면서, 모든 RRI 패킷 전송에 필요한 시간이 급격하게 증가하였다. 또한, RI, SCH, RA 패킷의 길이도 활성 단말의 숫자가 증가하면서 점차 길어진다. 따라서 활성화된 단말의 숫자가 임계 숫자를 초과하면, 라운드마다 더 많은 데이터 패킷을 전송으로 얻는 이득보다, 전체 RRI 패킷 전송에 필요한 시간이 더 증가하면서, 오히려 처리량이 감소하였다. 정교한 스케줄링을 활용한 제안된 기법에서도 같은 원인으로 활성화된 단말의 숫자가 25부터 처리량이 약간씩 감소하였다. 기존의 Janus MAC 프로토콜과 비교했을 때, 제안된 기법이 정교한 스케줄링을 활용하지 않는다면, 최대 39.5%, 평균적으로 19.4% 성능이 향상되었고, 정교한 스케줄링을 활용한다면, 최대 17.2%, 평균적으로 8.9% 성능이 향상되었다.

VI. 결 론

같은 주파수 대역에서 동시에 신호를 송수신할 수 있는 전이중 라디오 기술이 현실화하였지만, 무선랜의 기존 MAC 프로토콜은 반이중 라디오를 기반으로 설계되었기 때문에 전이중 라디오 기반의 새로운 MAC 프로토콜이 필요하다. 단말 간의 경쟁 없이 효율적으로 전이중링크 설정이 가능한 다수의 스케줄링 기반의 전이중 MAC 프로토콜이 제안되었지만, 단말의 숫자가 증가함에 따라 단말의 전송 요청을 파악하는 시간도 증가하는 문제가 있다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하고자, 단말 간 협력을 이용하여 전송 요청 파악에 필요한 슬롯을 절반으로 감소시키는 기법을 제안했다. 슬롯당 두 개의 단말을 할당하고, 단말이 전송을 요청할 때 전이중 라디오를 활용하여 같은 슬롯에 할당된 다른 단말도 전송을 요청했는지 파악한다. 만약 두 단말이 모두 전송을 요청했으면, 그중에서 우선 순위가 높은 단말이 AP에게 전송 정보를 보고하면서, 같은 슬롯에 있는 다른 단말도 전송을 요청했다고 알려준다. 따라서 AP는 절반의 슬롯으로 전체 단말의 전송 요청을 확인할 수 있다. 가장 대표적인 스케줄링 기반의 전이중 MAC 프로토콜인 Janus에서 제안된 기법의 동작 방식을 설명하였으며, 시뮬레이션과 성능 모델 평가를 통해 Janus에 비해 최대 39.5% 처리량 증가를 확인했다. 제안된 기법은 Janus뿐만 아니라, 다른 스케줄링 기반의 전이중 MAC 프로토콜에서도 적용할 수 있다.

References

- [1] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katt, "Full duplex radios," in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 375-386, Hong Kong, China, Aug. 2013. (<https://doi.org/10.1145/2486001.2486033>)
- [2] K. E. Kolodziej, B. T. Perry, and J. S. Herd, "In-band full-duplex technology: Techniques and systems survey," *IEEE Trans. Microw. Theory and Techniques*, vol. 67, no. 7, pp. 3025-3041, Jul. 2019. (<https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2896561>)
- [3] Y. Xin, et al., "Technical report on full duplex for 802.11," IEEE 802.11-18/0498r8(2018), Retrieved Aug. 30, 2023, from <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-0498-08-00fd-fd-tig-report.docx>.
- [4] M. R. Amin, M. S. Hossain and M. Atiquzzaman, "In-band full duplex wireless LANs: Medium access control protocols, design issues and their challenges," *Information*, vol. 11, no. 4, pp. 1-26, Apr. 2020. (<https://doi.org/10.3390/info11040216>)
- [5] H. Ahn and Y.-J. Suh, "Full-duplex MAC protocol using buffer status reports during unused uplink periods in WLAN," *Ad Hoc Netw.*, vol. 94, pp. 1-11, Nov. 2019. (<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101950>)
- [6] Q. Qu, et al., "Survey and performance evaluation of the upcoming next generation WLAN Standard-IEEE 802.11ax," *Mobile Netw. and Appl.*, vol. 24, pp. 1461-1474, May 2019. (<https://doi.org/10.1007/s11036-019-01277-9>)
- [7] J. Soder, F. Mestanov, E. Sakai, K. Sakoda, and K. Agardh, "Stadium scenario for hew," IEEE, doc. IEEE 802.11-14/0381r0(2014), Retrieved Aug. 30, 2023, from <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0381-00-0hew-stadium-scenario-for-hew.ppt>.
- [8] H. Persson, et al., "Text proposal of a stadium scenario to ax," doc. IEEE 802.11-14/0860r2 (2014) Retrieved Aug. 30, 2023, from <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0860-02-00ax-text-proposal-of-a-stadium-scenario-to-ax.docx>
- [9] J. Kim, O. Mashayekhi, H. Qu, M. Kazandjjeva, and P. Levis, "Janus: A Novel MAC protocol for full duplex radio," in *Proc. CSTR*, pp. 1-12, Jan. 2013.
- [10] W. Zhou, K. Srinivasan, and P. Sinha, "RCTC: Rapid concurrent transmission coordination in full duplex wireless networks," in *Proc. 21st IEEE ICNP*, Gttingen, Germany, pp. 1-6, Oct. 2013. (<https://doi.org/10.1109/ICNP.2013.6733590>)
- [11] H. Ahn, J. Lee, C. Kim, and Y. Suh, "Frequency domain coordination MAC protocol for full-duplex wireless networks," *IEEE Commun. Lett.* vol. 23, no. 3, pp. 518-521, Mar. 2019.

(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2894151>)

- [12] A. Alim, S. Saruwatari, and T. Watanabe, "Asym-FDMAC: In-band full-duplex medium access control protocol for asymmetric traffic in wireless LAN," *Wirel. Netw.* vol. 26, pp. 807-822, Feb. 2020.

(<https://doi.org/10.1007/s11276-018-1827-8>)

- [13] J.-K. Kim, W.-J. Lee, and J.-H. Kim, "Performance analysis of full duplex MAC protocol in a WLAN system with variable MCS level," *J. IEIE*, vol. 56, no. 9, pp. 853-859, Sep. 2019.

(<https://doi.org/10.5573/jeie.2019.56.9.3>)

- [14] *Part 11: wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer(PHY) specifications: enhancements for higher throughput amendment 4: enhancements for very high throughput for operation in bands below 6 GHz*, IEEE 802.11 Std., Dec. 2013.

이 하 립 (Harim Lee)



2013년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사

2015년 2월 : POSTECH IT융합공학과 석사

2020년 8월 : UNIST 전기전자컴퓨터공학부 박사

2020년 9월~2021년 8월 : POSTECH 박사 후 연구원

2021년 9월~현재 : 금오공과대학교 전자공학부 조교수
<관심분야> 딥러닝 기반 지능형 시스템, 목소리 감정생성모델, 목소리-얼굴잠재벡터정렬연구, 차세대통신

[ORCID:0000-0001-8758-3250]

안 형 태 (Hyeongtae Ahn)



2013년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 학사

2020년 2월 : POSTECH 컴퓨터공학과 박사

2020년 3월~2021년 8월 : 한국전자통신연구원 연구원

2021년 9월~현재 : 금오공과대학교 컴퓨터공학과 조교수

<관심분야> 무선랜, AIOT, 빅데이터, 스마트팜

[ORCID:0000-0002-3390-3981]