Check for updates

Journal of KIIT. Vol. 23, No. 4, pp. 83-91, Apr. 30, 2025. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571 83 http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2025.23.4.83

포화 트래픽 환경에서 전이중링크의 유휴 상향링크 구간을 활용한 버퍼 상태 보고 기법

안 형 태*

Buffer State Reporting Method using Unused Uplink Duration of Full-Duplex Links in Saturated Traffic Environments

HyeongTae Ahn*

이 연구는 국립금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2022~2024)

요 약

전이중 통신은 기존 반이중 통신에 비해 스펙트럼 효율성을 잠재적으로 두 배로 향상시킬 수 있는 무선 통 신 기술이다. 그러나 하향링크와 상향링크 간 데이터 프레임 전송 시간의 차이로 인해 유휴 상향링크 구간 (UUD)이 발생하여 스펙트럼 효율성 향상이 제한될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 UUD를 포화 트래픽 환경 에서도 효과적으로 활용할 수 있는 버퍼 상태 보고 기법을 제안한다. UUD를 여러 슬롯으로 나누고, 노드들은 선택한 슬롯을 통해 자신의 버퍼 상태를 액세스 포인트(AP)에 보고한다. AP는 최대 우도 추정법을 사용해 버 퍼 상태를 보고한 노드 수를 추정하고, 하향링크 노드가 동일한 다음 전이중링크에서 노드들의 버퍼 상태 보 고 확률을 동적으로 조정하여 보고 성공 확률을 높인다. 이를 통해 AP는 포화 트래픽 환경에서도 안정적으로 UUD 동안 버퍼 상태 정보를 수집하고, 전이중링크 설정을 최적화하여 스펙트럼 효율을 극대화할 수 있다.

Abstract

Full-duplex communication is a wireless technology with the potential to double spectral efficiency compared to traditional half-duplex communication. However, differences in transmission durations between downlink and uplink data frames can result in unused uplink duration(UUD), limiting spectrum efficiency. This paper proposes a buffer state reporting scheme designed to utilize UUD in saturated traffic environments. The proposed scheme partitions UUD into slots, enabling nodes to report their buffer states to the access point(AP) through selected slots. The AP uses Maximum Likelihood Estimation to estimate the number of reporting nodes and dynamically adjusts the buffer state reporting probabilities of the nodes in subsequent full-duplex links with the same downlink node to improve reporting success. This method ensures that the AP reliably collects buffer state information during UUD in saturated traffic environments, optimizes full-duplex link configuration, and maximizes spectrum efficiency.

Keywords full-duplex communication, buffer state reporting, WLAN, MLE

* 국립금오공과대학교 컴퓨터공학과 교수 - ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3390-3981	 Received: Dec. 20, 2024, Revised: Jan. 15, 2025, Accepted: Jan. 18, 2025 Corresponding Author: HyeongTae Ahn
	Dept. of Computer Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
	South Korea
	Tel.: 82+54-478-7537, Email: anten@kumoh.ac.kr

I.서 론

지난 수십 년간 무선 통신 기술이 비약적으로 발 전하면서 생활과 산업 전반에 막대한 영향을 미치 고 있다. 특히, Wi-Fi로 대표되는 무선랜(Wireless local area network)이 광범위하게 사용되면서 무선랜 의 트래픽 양도 급격히 증가하고 있다. 그러나 제한 된 가용 주파수 대역으로 인해 이러한 급증하는 트 래픽을 효과적으로 처리하기 어렵다. 따라서 무선랜 주파수 대역의 효율성을 극대화할 수 있는 무선 통 신 기술의 필요성이 점차 증가하고 있다.

전이중(Full-duplex) 통신은 동일한 주파수 대역에 서 신호를 동시에 송·수신할 수 있는 무선 통신 기 술로, 기존 반이중(Half-duplex) 통신보다 스펙트럼 효 율이 두 배가 된다. 기존 무선 노드(Node)는 자신의 송신 신호가 수신 안테나로 강하게 유입되는 자기 간섭 문제 때문에, 신호의 송신과 수신을 동시에 할 수 없는 반이중 통신만 가능했다. 하지만 안테나 기 술의 발전과 정교해진 아날로그와 디지털 신호 처리 기술 등으로 자기 간섭 제거(SIC, Self-Interference Cancellation) 기술이 발전하면서 전이중 통신 기술이 현실화하였다[1][2]. 따라서 5G-Advanced 표준 및 무 선랜 표준에서 전이중 통신 기술의 활용이 고려되었 으며[3][4], 무선랜에서 전이중 통신을 활용하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

무선랜에서 노드와 AP(Access Point)는 채널에 접 근하기 위해 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 방식으로 경쟁한다[5][6]. 기존 반이중 통신에서는 단순히 채널 접근 경쟁에 서 승리한 노드나 AP가 데이터 프레임을 전송했다. 그러나 전이중 통신에서는 노드나 AP가 경쟁에서 승리하더라도, AP로부터 데이터 프레임을 수신하는 하향링크(Downlink) 노드나 AP로 데이터 프레임을 송신하는 상향링크(Uplink) 노드를 결정하는 전이중 링크(Full-duplex link) 설정이 필요하다.

전이중링크는 상향링크 노드와 하향링크 노드의 관계에 따라 대칭(Symmetric) 전이중링크와 비대칭 (Asymmetric) 전이중링크로 구분된다. 대칭 전이중 링크는 그림 1(a)과 같이 상향링크 노드와 하향링크 노드가 동일한 경우로, 노드와 AP가 각각 자기의 간섭 신호를 상쇄하면서 서로가 전송한 데이터 프 레임을 성공적으로 수신할 수 있다. 상향링크 노드 와 하향링크 노드가 동일하므로 전이중링크 설정이 간단하지만, 노드와 AP가 서로에게 전송할 데이터 가 있는 경우에만 대칭 전이중링크를 설정할 수 있 다. 비대칭 전이중링크는 그림 1(b)처럼 상향링크 노드와 하향링크 노드가 다른 경우이다. 예를 들어, AP는 노드 B로 데이터 프레임을 전송하면서 발생 하는 자신의 간섭 신호를 상쇄하면서 노드 A가 전 송한 데이터 프레임을 성공적으로 수신할 수 있다. 이때 노드 A와 B는 서로의 간섭 영역 밖에 있어야 한다. 본 논문에서는 노드 A와 B처럼 서로의 간섭 영역 밖에 있는 두 노드의 관계를 비간섭 관계라고 정의한다. 전이중 통신 기회를 최대화하기 위해 AP 는 노드들의 버퍼 상태 정보(데이터 전송 가능 여 부)를 확인하고, 노드 간의 비간섭 관계를 파악하여 상황에 따라 대칭 전이중링크 또는 비대칭 전이중 링크를 설정할 수 있어야 한다. 전이중링크가 설정 되어 전이중 통신이 수행되더라도 유휴 상향링크 구간(UUD, Unused Uplink Duration)으로 인해 스펙 트럼 효율이 저하될 수 있다. 일반적으로 인터넷에 서는 하향링크 트래픽 양이 상향링크 트래픽 양보 다 많으므로 하향링크와 상향링크 간 데이터 프레 임 전송 시간 차이가 발생한다[7].



(a) 대칭 전이중링크, (b) 비대칭 전이중링크, (c) 유휴 상향링크 구간

Fig. 1. Classification of full-duplex links and unused uplink period (a) Symmetric full-duplex link, (b) Asymmetric full-duplex link, (c) Unused uplink duration

즉, 그림 1(c)과 같이 상향링크와 하향링크에서 데이터를 동시에 전송하더라도, 전송할 데이터 양이 상대적으로 적은 상향링크 데이터 프레임이 먼저 전송을 완료하게 된다. 이로 인해 하향링크 데이터 프레임 전송이 완료될 때까지 상향링크는 유휴 상 태가 되어 스펙트럼 효율이 저하된다.

유휴 상향링크 구간 동안, 비대칭 전이중링크처 럼 현재 하향링크 노드와 비간섭 관계에 있는 노드 들은 AP로 프레임을 전송할 수 있다. 예를 들어, 그림 1(b)에서 노드 C와 D가 노드 B와 비간섭 관계 이면, 노드 B가 하향링크 노드일 때 발생하는 유휴 상향링크 구간 동안 노드 C와 D는 AP로 프레임을 전송할 수 있다. 따라서 전이중 통신의 스펙트럼 효 율을 높이기 위해서는 이러한 유휴 상향링크 구간 을 적극 활용할 수 있는 방안이 필요하다.

본 연구에서는 전이중 통신의 스펙트럼 효율을 극대화하기 위해 유휴 상향링크 구간을 활용한 버 퍼 상태 보고 기법을 제안한다. 제안된 기법은 기존 연구[8][9]와 마찬가지로 유휴 상향링크 구간을 여 러 슬롯(Slot)으로 나눈다. 현재 하향링크 노드와 비 간섭 관계를 가지며 전송할 데이터를 가진 노드들 은 임의로 하나의 슬롯을 선택해 버퍼 상태 정보가 포함한 프레임을 AP로 전송하도록 한다. 이를 통해 AP는 노드들의 버퍼 상태와 비간섭 관계를 파악하 여 효율적으로 전이중링크를 설정할 수 있다.

기존 연구와의 차별점은 AP가 버퍼 상태를 보고 하는 노드 수를 사전에 예측하고, 노드들의 버퍼 상 태 보고(Buffer state reporting) 확률을 동적으로 제어 한다는 점이다. 이를 통해 포화 트래픽(Saturated traffic) 환경에서도 노드들은 효과적으로 버퍼 상태 를 AP에게 보고할 수 있다.

Ⅱ. 관련 연구

기존 전이중 통신 연구에서 유휴 상향링크 구간 을 활용하는 몇 가지 기법이 제안되었다. 첫 번째 기법은 스케줄링에 기반한 방식이다[10]-[12]. AP는 각 노드에 슬롯을 할당하고, 할당된 슬롯을 통해 순 차적으로 노드들의 버퍼 상태 정보를 수집한다. 수 집된 정보를 바탕으로 노드들의 데이터 프레임 전 송을 스케줄링하여 연속적으로 전이중링크를 설정 한다. 이때 하나의 하향링크 데이터 프레임을 전송 하는 동안 여러 상향링크 데이터 프레임을 전송하 여 유휴 상향링크 구간을 감소시킬 수 있다. 이 기 법은 CSMA/CA 방식을 사용하지 않기 때문에 노드 간의 경쟁 없이 데이터 프레임을 전송할 수 있지만, 전송 라운드마다 모든 노드로부터 버퍼 상태 정보 를 수집하는 슬롯 시간이 추가로 필요하다. 두 번째 기법[13][14]은 폴링 방식을 활용한다. 하향링크의 일부 부반송파(Subcarrier)를 노드들의 ID를 전송하 는 제어 채널로 활용한다. 만약 유휴 상향링크 구간 이 발생하면 AP는 제어 채널을 통해 노드 ID를 포 함한 제어 신호를 폴링 방식으로 전송하여 여러 노 드에게 데이터 프레임 전송 기회를 제공한다. 하지 만 해당 기법은 채널 설계의 변경이 필요하며, 하향 링크의 처리량(Throughput)이 감소하는 한계가 있다. 세 번째 기법은 유휴 상향링크 구간을 노드들의 버 퍼 상태 보고에 활용한다[8][9]. 슬롯 알로하(Aloha) 방식처럼 유휴 상향링크 구간을 노드들의 버퍼 상 태 보고를 위한 슬롯들로 나눈다. 하향링크 노드와 비간섭 관계를 맺으면서 전송할 데이터를 가진 노 드는 임의로 한 슬롯을 선택하여, 선택한 슬롯에서 자신의 버퍼 상태 정보가 포함된 프레임을 전송한 다. 만약 한 슬롯을 한 노드만 선택하여 프레임을 전송하면 해당 노드의 버퍼 상태 보고는 성공이고, 한 슬롯을 두 개 이상의 노드가 선택하면 프레임 간 충돌로 버퍼 상태 보고에 실패한다.

그림 2(a)에서 노드 C, D, G의 버퍼 상태 보고에 성공했고, 노드 E, F, J, H, I는 버퍼 상태 보고에 실패했다. 따라서 AP는 노드 C, D, G가 전송할 데 이터가 있고, 노드 B와 비간섭 관계를 맺는다는 것 을 확인했다. 이처럼 AP는 유휴 상향링크 구간 동 안 여러 노드로부터 버퍼 상태 정보와 하향링크 노 드와 비간섭 관계 여부를 파악할 수 있다. 이를 바 탕으로 효율적인 전이중링크 설정을 할 수 있으며, 그림 2(b)와 같이 노드들의 데이터 프레임 전송을 스케줄링할 수 있다. 하지만 포화 트래픽 환경처럼 많은 노드가 전송할 데이터를 가지면, 슬롯 수에 비 해 버퍼 상태를 보고하는 노드 수가 지나치게 많아 지므로, 프레임 간 충돌로 보고에 실패할 확률이 매 우 높아진다. 따라서 많은 노드가 전송할 데이터를 가진 포화 트래픽 환경에서도 유휴 상향링크 구간 을 통해 효율적으로 버퍼 상태를 보고할 수 있는 기법이 필요하다.



그림 2. 유휴 상향링크 구간을 활용한 노드들의 버퍼 상태 보고 (a) 버퍼 상태 보고 예시, (b) 수집된 정보를 활용한 전이중링크 설정

Fig. 2. Buffer state reporting by nodes utilizing the UUD (a) Example of buffer status reporting, (b) Full-duplex link configuration based on the collected information

Ⅲ. 제안된 버퍼 상태 보고 기법

제안된 버퍼 상태 보고 기법에서 AP는 하향링크 노드가 동일한 지난 전이중링크에서 버퍼 상태를 보고한 노드 수를 기반으로 현재 전이중링크에서 버퍼 상태를 보고할 노드 수를 예측한다. 만약 유휴 상향링크 구간에서 생성되는 슬롯에 비해 많은 노 드가 버퍼 상태 보고를 시도할 것으로 예측되면, 노 드의 버퍼 상태 보고 확률(P_{BSR})을 낮추어 포화 트 래픽 환경에서도 노드들의 버퍼 상태 보고 성공 확 률을 높인다. 노드 수를 예측하는 계산은 AP에서만 수행되고, 각 노드는 단순히 AP에 의해 주어진 P_{BSR}에 따라서 버퍼 상태 보고 여부를 결정한다.

3.1 비간섭 관계 파악

유휴 상향링크 구간을 활용하기 위해 각 노드는 현재 하향링크 노드와의 비간섭 관계 여부를 확인 하고, 유휴 상향링크 구간의 시작 및 종료 시점을 정확히 파악해야 한다. 이를 위해 기존 전이중 통신 연구[8][9]처럼 RTS(Request-to-Send)/CTS(Clear-to-Send) 프레임 교환[5]을 활용한다. 각 노드는 AP와 다른 노드 간에 교환되는 RTS와 CTS 프레임을 수신하면 서, 위에서 언급한 정보를 파악할 수 있다. 예를 들 어, 그림 1(b)에서 노드 A, C, D가 노드 B와 비간섭 관계를 맺는다면, 노드 B가 경쟁에서 승리하여 RTS 프레임을 전송할 때, 숨겨진 노드 문제(hidden node problem)처럼 노드 A, C, D는 RTS 프레임을 탐지하 지 못하거나 매우 약한 Received Signal Strength Indicator 신호만을 측정된다. AP는 응답으로 노드 B 의 주소 정보가 포함된 CTS 프레임을 전송하며, CTS 프레임만 정상적으로 수신한 노드 A, C, D는 노드 B와 비간섭 관계임을 파악할 수 있다.

3.2 유휴 상향링크 구간 탐지

유휴 상향링크 구간의 시작과 종료 시점도 RTS 와 CTS 프레임의 duration 필드 값을 비교하여 파악 할 수 있다. 그림 3(a)처럼 기존 반이중 통신에서 RTS 프레임의 duration 필드 값(*RTS_{dur}*)과 CTS 프 레임의 duration 필드 값(*CTS_{dur}*)은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$RTS_{dur} = CTS_t + Data_t + ACK_t + 3SIFS$$
(1)
$$CTS_{dur} = Data_t + ACK_t + 2SIFS$$

여기서 *CTS_t*, *Data_t*, *ACK_t*는 각각 CTS 프레임, 데이터 프레임, ACK(Acknowledgement) 프레임 전송 에 필요한 시간을 나타내며, SIFS(Short InterFrame Space)[5]는 프레임 간의 간격을 나타낸다. 전이중 통신에서 전이중링크를 설정하기 위해 그림 3(b)처 럼 CTS 프레임 대신 FCTS(Full-duplex CTS) 프레임 을 활용하였다. FCTS 프레임은 기존 CTS 프레임에 전이중링크 설정 정보가 추가되어 새롭게 정의된 제어 프레임으로, FCTS 프레임의 duration 필드 값 (*FCTS_{dur}*)은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$FCTS_{dur} = \max(Ud_t, Dd_t) + ACK_t + 2SIFS \quad (2)$$

여기서 Ud_t와 Dd_t는 각각 상향링크 데이터 프레임 과 하향링크 데이터 프레임 전송에 필요한 시간을 나타낸다. FCTS 프레임에 RTS_{dur} 필드가 포함되어 있으므로, 각 노드는 FCTS 프레임을 통해 그림 3(b) 처럼 유휴 상향링크 시작 시점(UUD_{begin})과 종료 시점(UUD_{end})을 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$UUD_{begin} = RTS_{dur} - SIFS - ACK_t$$
(3)
$$UUD_{end} = FCTS_{dur} - SIFS - ACK_t$$



그림 3. 유휴 상향링크 구간 탐지 (a) RTS/CTS 프레임의 duration 필드 값, (b) FCTS 프레임을 이용한 유휴 상향링크 구간 탐지 Fig. 3. Detection of UUD (a) Duration field value of

RTS/CTS frames, (b) Detection of UUD with FCTS frame

3.3 노드 수 추정

유휴 상향링크 구간이 탐지되면, 각 노드는 탐지 된 구간을 여러 슬롯으로 나누고 버퍼 상태를 보고 하기 위해 임의로 슬롯 하나를 선택하여, 자신의 버 퍼 상태 정보가 포함된 프레임을 전송한다. 따라서 각 슬롯의 상태는 성공 슬롯, 빈 슬롯, 실패 슬롯 중 하나가 된다. 성공 슬롯은 오직 한 노드만 해당 슬롯을 선택해서 버퍼 상태 정보가 포함된 프레임 을 성공적으로 전송한 슬롯이고, 빈 슬롯은 어떤 노 드에도 선택받지 못한 슬롯이고, 실패 슬롯은 2개 이상의 노드가 해당 슬롯을 선택해서 프레임 간의 충돌로 버퍼 상태 보고에 실패한 슬롯이다.

K개의 슬롯에서 N개의 노드가 버퍼 상태 보고를 시도한다고 하자. 버퍼 상태 보고에 성공하기 위해 서 한 슬롯은 오직 한 노드에만 선택되어야 하므로, 버퍼 상태 보고에 성공한 슬롯 수의 기댓값(E_s)은 다음과 같다.

$$E_{s} = N(1 - \frac{1}{K})^{N-1}$$
(4)

또한, 어떤 노드도 해당 슬롯을 선택하지 않는 빈 슬롯 수의 기댓값(*E*_e)은 다음과 같다.

$$E_e = K(1 - \frac{1}{K})^N \tag{5}$$

한 슬롯을 두 개 이상의 노드가 선택하면 프레임 간의 충돌로 버퍼 상태 보고에 실패하므로, 실패한 슬롯 수의 기댓값(*E_f*)은 다음과 같다.

$$\begin{split} E_f &= K - E_s - E_e \\ &= K - N(1 - \frac{1}{K})^{N-1} - K(1 - \frac{1}{K})^N \end{split} \tag{6}$$

노드들의 버퍼 상태 보고가 완료되면, AP는 K개 의 슬롯 중에 실제 성공 슬롯 수, 빈 슬롯 수, 실패 슬롯 수를 파악할 수 있다. 이러한 측정값과 식 (4), (5), (6)의 기댓값을 활용하여 최대 우도 추정법 (MLE, Maximum Likelihood Estimation)으로 버퍼 상 태를 보고한 노드 수의 추정값(*E*_{BSR})을 계산한다.

 E_{BSR} 의 정확도를 평가하기 위해 시뮬레이터를

 구현하여 슬롯 수와 노드 수를 변화시키면서 E_{BSR}

 을 측정하였다. 표 1은 슬롯 수와 노드 수의 조합

 마다 버퍼 상태 보고를 100번씩 반복하여 측정된

 시뮬레이션의 주요 결과를 나타낸다. 슬롯 수와 노

 드 수에 따라 E_{BSR} 의 평균값, 최솟값, Q1, 중앙값,

 Q3, 최댓값을 나타내며, 모든 슬롯에서 버퍼 상태

 보고에 실패한 경우를 제외하고 집계했다. F_{all} 는

 모든 슬롯에서 버퍼 상태 보고에 실패한 비율을

 나타낸다.

노드 수가 슬롯의 2배보다 작을 때, 즉, N < 2K인 경우, 실제 노드 수와 E_{BSR} 의 평균값과 중앙값을 비교하면 대부분 1개 이하의 오차로 높은 정확도를 확인했다. 노드 수가 슬롯 수의 두 배 이상(N ≥ 2K)이면 모든 슬롯에서 버퍼 상태 보고에 실패할 수 있지만, 성공 슬롯이나 빈 슬롯이 존재하면 여전 히 높은 예측 정확도를 보였다.

표 1. MLE로 추정한 버퍼 상태를 보고한 노드 수 Table 1. Number of nodes reporting buffer state estimated using MLE

slot	nodes	E_{BSR}					F	
(<i>K</i>)	(<i>N</i>)	Avg.	Min	Q1	Median	Q3	Max	1 all
2	2	2.27	2	2.45	2.45	2.45	2.45	0
2	3	3.01	2.45	3.21	3.21	3.21	3.21	0
2	4	3.04	2.45	3.21	3.21	3.21	3.21	0.33
3	3	3.11	2.51	3.26	3.26	3.26	3.26	0
3	4	4.03	2.51	4.13	4.13	4.13	5.25	0
3	5	5.37	2.51	5.25	5.25	6.5	6.5	0
3	6	5.6	3.26	6.5	6.5	6.5	6.5	0.09
4	4	4.12	2.54	4.16	4.16	4.16	4.93	0
4	5	5.07	2.54	5.08	5.08	5.97	5.97	0
4	6	5.94	3.30	5.97	5.97	7.09	8.66	0
4	7	7.54	4.16	7.09	7.09	8.66	10.3	0
4	8	8.27	3.30	8.66	8.66	10.3	10.3	0.04
5	5	5.06	3.32	5.10	5.10	5.79	5.79	0
5	6	5.98	4.19	5.79	5.79	6.83	7.79	0
5	7	7.04	4.19	6.83	6.83	7.90	9.05	0
5	8	8.16	4.80	7.90	7.90	9.05	12.4	0
5	9	8.93	5.79	9.05	9.05	10.4	14.3	0
5	10	1041	6.83	10.4	10.4	124	14.3	0.02

표 2의 N_{allF}^{k} 는 K개의 슬롯에서 버퍼 상태 보고 를 모두 실패할 때, MLE로 추정된 노드 수를 나타 낸다. N_{allF}^{k} 는 슬롯 수의 약 4배 안팎으로 추정되므 로, AP는 모든 슬롯에서 버퍼 상태 보고에 실패하 면 슬롯 수보다 4배 많은 노드가 버퍼 상태 보고를 시도한 것으로 판단한다. 실제 노드 수가 슬롯 수의 3배 이하인 경우나 5배 이상인 경우에도 모든 슬롯 에서 버퍼 상태 보고에 실패하면 노드 수를 슬롯의 4배 안팎으로 추정하므로 정확도는 비교적 낮다. 하 지만 모든 슬롯에서 버퍼 상태 보고에 실패하는 것 은 예외적인 경우로, 어떤 노드가 처음으로 하향링 크 노드가 되거나, 노드 수가 급격히 증가할 때만 발생한다. 또한, AP는 하향링크 노드가 동일한 다 음 전이중링크에서 예측 노드 수를 이전보다 약 4 배 많다고 판단하여 노드들의 P_{BSR}을 선택한다. 따 라서 성공 슬롯이나 빈 슬롯이 발생할 확률이 높아 지므로 노드 수의 예측 정확도가 증가할 수 있다.

표 2. 모든 슬롯에서 버퍼 상태 보고에 실패했을 때, MLE으로 추정한 노드 수와 슬롯 수에 따른 최적의 버퍼 상태 보고 노드 수

Table 2. Number of nodes estimated using MLE when all slots fail to report buffer state and the optimal number of nodes for buffer state reporting based on the number of slots

K	2	3	4	5	6	7	8	9
N_{allF}^k	9.62	14.14	18.16	21.86	25.34	28.65	31.83	34.90
N_{opt}^k	1.44	2.47	3.48	4.49	5.48	6.49	7.49	8.49

각 노드는 P_{BSR} 에 따라서 버퍼 상태 보고 여부 를 결정하고, 버퍼 상태를 보고한 추정된 노드 수를 고려하면, 해당 전이중링크에서 버퍼 상태 보고가 가능했던 전체 노드 수(N_{try})는 E_{BSR}/P_{BSR} 로 계산 할 수 있다. 무선랜에서 AP와 노드들의 트래픽 환 경 변화와 노드 간의 비간섭 관계의 변화로 하향링 크 노드가 동일하더라도 전이중링크가 설정될 때마 다 버퍼 상태를 보고하는 노드 수는 계속 변할 수 있다. 따라서 노드 수를 안정적으로 예측하기 위해 평활화(Smoothing)가 필요하다. 평활화된 노드 수의 추정값(N_{sm})은 식 (7)과 같이 계산했다.

$$N_{sm} = \left(\frac{K}{K_{avg} + K}\right) N_{try} + \left(\frac{K_{avg}}{K_{avg} + K}\right) N_{sm}$$
(7)
$$K_{avg} = \frac{(K_{avg})^2 + K^2}{K_{avg} + K}$$

여기서 K_{avg} 는 이전 N_{sm} 의 평활화에 사용된 슬롯 의 평균 길이고, K는 현재 버퍼 상태 보고의 슬롯 길이다. 슬롯의 길이가 길수록 각 슬롯에서 발생하 는 성공 슬롯, 빈 슬롯, 실패 슬롯의 비율은 실제 확률 분포와 가까워지므로 예측 정확도가 증가한다. 따라서 슬롯 길이 만큼 가중치를 주기 위해, K_{avg} 와 K 간의 슬롯 길이 비율만큼 이전 N_{sm} 와 N_{try} 간 의 가중치를 주어서 새로운 N_{sm} 을 계산한다.

3.4 버퍼 상태 보고 확률

전이중링크 설정마다 상향링크와 하향링크에서 전송되는 데이터 양과 전송 속도가 달라질 수 있으 므로, 유휴 상향링크 구간에 의해 생성되는 슬롯 수 가 달라질 수 있다. 예를 들어 버퍼 상태 보고를 시 도하는 노드 수가 지난번과 같더라도, 슬롯 수가 감 소하면 버퍼 상태 보고에 실패할 확률이 높아진다. 따라서 현재 유휴 상향링크 구간에서 생성된 슬롯 수와 비교해서 적절한 수의 노드만 버퍼 상태를 보 고하도록 P_{BSR} 를 제어해야 한다. N_{opt}^{k} 는 K개 슬롯 에서 성공 확률이 가장 높은 최적의 노드 수라고 하자. N_{opt}^{k} 는 식 (4)의 극댓값으로 다음과 같다.

$$N_{opt}^{k} = \frac{-1}{\ln(1 - \frac{1}{K})}$$
(8)

표 2의 N_{opt}^{k} 는 식 (8)을 바탕으로 슬롯 수에 따 른 최적의 노드 수를 나타낸다. 표 1의 결과에서 버 퍼 상태를 보고한 실제 노드 수와 E_{BSR} 의 최솟값 에는 약 2배 정도의 오차가 발생함을 확인했다. 이 러한 E_{BSR} 의 추정 오차를 고려하여, AP는 N_{sm} 이 N_{opt}^{k} 2배 이상일 때만 슬롯 수에 비해서 버퍼 상태 를 보고하는 노드 수가 많다고 판단하고, P_{BSR} 을 식 (9)와 같이 결정한다.

$$P_{BSR} = \max\left\{\frac{1}{k}|k > \frac{N_{sm}}{2N_{opt}^{k}}, k = 1, 2, ..., 64
ight\}$$
 (9)

 P_{BSR}는 1/1부터 1/64 사이의 값을 가지며, AP는

 전이중링크 설정을 위한 FCTS 프레임에 P_{BSR}를 포

 함시켜 전송한다. 따라서 하향링크 노드와 비간섭

 관계를 맺으면서 전송할 데이터가 있는 노드는

 P_{BSR}에 따라서 자신의 버퍼 상태 보고 여부를 결

 정한다. 비포화 트래픽 환경에서는 N_{sm}는 N^k_{opt} 의 2

 배 미만이므로 P_{BSR}은 1로 설정되어, 기존 기법

 [8][9]처럼 동작한다.

IV.실 험

제안된 버퍼 상태 보고 기법과 기존 기법의 성능 을 비교하기 위해, 주어진 조건에서 1,000번씩 반복 하여 성능을 측정하였다. 표 3은 노드 수가 슬롯 수 의 1배부터 5배까지, 그리고 노드 수가 100개일 때 측정된 결과를 나타낸다. Sprob는 제안된 기법의 평 균 성공 슬롯 수를, Sconn는 기존 기법의 평균 성공 슬롯 수를 의미한다. Nava는 제안된 기법의 Nsm 평 균값을 나타내며, $F_{all}P_{rab}$ 는 제안된 기법의 F_{all} 을, FallConv는 기존 기법에서 Fall을 나타낸다. 슬롯 수와 노드 수가 동일한 경우(N = K), F_{all}는 발생하지 않 으므로, Sprop와 Scomp는 거의 동일하다. 하지만 노드 수가 증가하면서 FallConv는 급격히 증가했지만, 제안 된 기법은 노드 수를 예측하고 노드들의P_{BSR}를 제 어하면서 FallProp는 매우 완만하게 증가한다. 따라서 노드 수가 증가함에 따라 S_{brob}와 S_{conv}간격차가 증 가하여, 노드 수가 슬롯 수의 3배를 기준(N = 3K)으 로, 평균적으로 S_{brob}는 S_{conv}의 2.67배이다.

표 3. 고정된 슬롯 수와 노드 수 조건에서 제안된 기법과 기존 기법의 성능 비교

Table 3. Performance comparison between the proposed method and the conventional method under fixed slot and node conditions

K	N	S_{prop}	S_{conv}	N_{avg}	$F_{allProp}$	FallConv
3	3	1.364	1.366	3.13	0	0
3	6	1.159	0.831	6.328	0.031	0.101
3	9	1.087	0.344	9.586	0.035	0.592
3	12	1.02	0.156	12.862	0.056	0.828
3	15	0.993	0.049	16.435	0.071	0.945
3	100	0.925	0	106.689	0.124	1
5	5	2.03	2.039	5.035	0	0
5	10	1.741	1.342	10.157	0.005	0.015
5	15	1.748	0.677	15.398	0.008	0.313
5	20	1.644	0.306	20.115	0.014	0.662
5	25	1.605	0.119	25.402	0.02	0.87
5	100	1.492	0	104.143	0.061	1
7	7	2.782	2.779	7.017	0	0
7	14	2.408	1.884	14.132	0.001	0.002
7	21	2.409	0.99	21.229	0.001	0.15
7	28	2.314	0.46	28.682	0.006	0.523
7	35	2.271	0.198	35.776	0.008	0.78
7	100	2.043	0	102.226	0.015	1
9	9	3.533	3.522	9.005	0	0
9	18	2.971	2.465	18.085	0	0
9	27	3.131	1.258	26.95	0	0.094
9	36	2.854	0.577	36.503	0.001	0.432
9	45	2.901	0.234	44.883	0.001	0.742
9	100	2.717	0	99.59	0.005	1

특히, 노드 수가 100일 때, S_{conv} 는 0이지만, S_{prop} 는 슬롯 수의 25% 이상 $(S_{prop} \ge 0.25K)$ 을 유지한다. 실제 노드 수와 N_{avg} 간의 평균 상대 오차는 3% 미 만의 높은 정확도를 달성했으며, 슬롯 수가 증가함 에 따라 예측 정확도가 증가했다.

표 4는 노드 수의 변화에 따른 제안된 기법과 기 존 기법의 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 최소 노 드 수는 1, 최대 노드 수는 101로 설정했으며, 초기 노드 수는 슬롯 수의 2배로 설정하였다. 다음 버퍼 상태 보고에 참여하는 노드 수(ΔN)는 현재 노드 수 를 기준으로 $\pm 50\%$ 및 $\pm 100\%$ 범위 안에서 임의로 선택했다. 노드 수가 계속 변화하는 상황에서는 제 안된 기법이 기존 기법보다 더 우수한 성능을 나타 냈다. 이는 제안된 기법이 평활화를 통해 노드 수를 안정적으로 예측하면서 노드 수의 변화에 효과적으 로 적응할 수 있기 때문이다. 추가로 노드 수가 급 격히 변하여 다음 노드 수가 현재 노드 수와 완전 무관한 조건에서도 성능을 평가했다. 기존 기법의 $F_{allConv}$ 증가로 S_{prop} 는 S_{conv} 비해 여전히 높은 성 능을 달성했다.

표 4. 노드 수의 변화에 따른 제안된 기법과 기존 기법의 성능 비교

Table 4. Performance comparison between the proposed method and the conventional method with varying node numbers

K	ΔN	S_{prop}	S_{conv}	N_{avg}	$F_{allProp}$	FallConv
3	±50%	1.058	0.749	11.13	0.062	0.333
3	±100%	1.012	0.892	7.621	0.062	0.214
5	±50%	1.724	1.314	13.543	0.019	0.199
5	±100%	1.553	1.463	7.04	0.017	0.08
7	±50%	2.168	1.742	15.499	0.01	0.174
7	±100%	1.803	1.675	9.934	0.012	0.108
9	±50%	2.732	2.078	17.3	0.004	0.15
9	±100%	2.318	2.139	8.886	0.011	0.057

표 5는 슬롯 수의 변화에 따른 제안된 기법과 기 존 기법의 성능 비교 결과를 나타낸다. 여기서 K_{avg} 는 평균 슬롯 수를 의미한다. 초기 슬롯 수는 11, 최소 슬롯 수는 2, 최대 슬롯 수는 20으로 설정했 고, 다음 슬롯 수(ΔK)는 현재 슬롯 수를 기준으로 ±50% 및 ±100% 범위 안에서 임의로 선택했다. 슬 롯 수가 변화하는 환경에서도 제안된 기법의 S_{prop} 는 기존 기법과 비슷하거나 더 뛰어난 성능을 보였 다. 특히 노드 수가 100인 경우에도, 제안된 기법은 슬롯 수에 따라 노드의 P_{BSR} 를 동적으로 제어하여 노드들의 버퍼 상태 정보를 안정적으로 보고할 수 있었다.

표 5. 슬롯 수의 변화에 따른 제안된 기법과 기존 기법의 성능 비교

Table 5. Performance comparison between the proposed method and the conventional method with varying slot numbers

Ν	ΔK	S_{prop}	S_{conv}	K_{avg}	$F_{allProp}$	FallConv
3	±50%	1.995	1.972	7.842	0	0
3	±100%	1.84	1.844	8.212	0	0
5	±50%	2.408	2.37	8.553	0.007	0.063
5	±100%	2.216	2.173	8.72	0.011	0.101
7	±50%	2.435	2.367	7.696	0.011	0.119
7	±100%	2.454	2.385	8.841	0.015	0.147
9	±50%	2.657	2.552	8.24	0.024	0.185
9	±100%	2.614	2.432	9.278	0.019	0.213
100	±50%	2.052	0.025	7.645	0.065	0.975
100	±100%	2.242	0.037	8.692	0.061	0.961

V.결 론

본 논문에서는 포화 트래픽 환경에서 전이중링크 의 유휴 상향링크 구간을 활용한 효율적인 버퍼 상 태 보고 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 AP가 최대 우도 추정법을 사용하여 버퍼 상태를 보고한 노드 수를 추정하고, 노드들의 P_{BSR}을 동적으로 조 정함으로써 보고 성공 확률을 향상시킨다. 시뮬레이 션 결과, 포화 트래픽 환경에서도 제안된 기법이 안 정적으로 동작하며, 노드 수와 슬롯 수가 변화하는 다양한 환경에서도 기존 기법보다 우수한 성능을 달성했다. 본 연구 결과는 차세대 무선 통신의 핵심 기술로 주목받고 있는 전이중 통신의 스펙트럼 효 율을 향상시킴으로써, 차세대 무선랜 표준화에 기여 할 수 있다. 향후 연구에서는 다양한 인공지능 기법 들을 활용하여 노드 수 예측 정확도를 극대화할 예 정이다.

References

[1] D. Bharadia, E. McMilin, and S. Katti, "Full Duplex Radios", Proc. ACM SIGCOMM, Hong Kong, China, pp. 375-386, 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] X. Lin, "An overview of 5G advanced evolution in 3GPP release 18", IEEE Commun. Standards Mag., Vol. 6, No. 3, pp. 77-83, Sep. 2022. https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2200001.
- Y. Xin, et al., "Technical report on full duplex for 802.11", IEEE 802.11-18/0498r8, https://mentor.ieee. org/802.11/dcn/18/11-18-0498-08-00fd-fdtig-report.docx. [accessed: Dec. 18, 2024]
- [5] IEEE, IEEE Standard for Information Technology -Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications - Amendment 1: High Efficiency WLAN, IEEE Std 802.11ax-2021, May 2021.
- [6] J.-H. Kim and B.-S. Ki, "Improved Slotted CSMA Backoff Technique for Ensuring Data Freshness in Wireless Personal Area Network", Journal of KIIT, Vol. 22, No. 8, pp. 93-101, Aug. 2024. https://doi.org/10.14801/jkiit.2024.22.8.93.
- [7] Report ITU-R M.2370-0: IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030, Jul. 2015, ITU. Tech. Rep.
- [8] H. Ahn, Y. D. Park, D. Kim, and Y.-J. Suh, "A full-duplex MAC protocol based on buffer status report for successive full-duplex link setup", IEEE Commun. Lett., Vol. 23, No. 9, pp. 1506-1509, Sep. 2019. https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019. 2924833.
- [9] H. Ahn, H. Lee, and Y. D. Park, "AUB: A full-duplex MAC protocol for the efficient utilization of the idle uplink period in WLAN", J. Commun. Netw., Vol. 25, No. 6, pp. 750-759, Dec. 2023. https://doi.org/10.23919/JCN.2023.000043.
- [10] J. Kim, O. Mashayekhi, H. Qu, M. Kazandjieva, and P. Levis, "Janus: A Novel MAC Protocol for

Full Duplex Radio", Tech. Rep., Stanford University, Jan. 2013.

- [11] 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, May 2018. https://doi.org/10.1007/s11276-018-1827-8.
- [12] 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.
- [13] G. Lee, H. Ahn, and C. Kim, "In-frame querying to utilize full duplex communication in IEEE 802.11ax", Proc. CSCN, Tokyo, Japan, pp. 194-198, Oct. 2015. https://doi.org/10.1109/CSCN. 2015.7390453.
- [14] H. Ahn, G. Lee, and C. Kim, "Hidden chain: A full-duplex MAC protocol using hidden terminal relationships in WLANs", Proc. IEEE/IFIP WONS, Cortina, Italy, pp. 96-99, Jan. 2016.

저자소개

안 형 태 (HyeongTae Ahn)



2020년 2월 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과(공학박사) 2020년 3월 ~ 2021년 8월 : 한국전자통신연구원 연구원 2021년 9월 ~ 현재 : 국립금오공과대학교 컴퓨터공학과 조교수

관심분야 : 무선랜, 지능형 IoT, 스마트팜, 빅데이터