

NR-U와 WiFi 공존환경에서 전송률 및 공평성 성능분석

조민곤, 이기훈, 배재원*, 정방철

충남대학교, *한국과학기술원

mgcho@o.cnu.ac.kr, kihun.h.lee@cnu.ac.kr, *duckgoose@kaist.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Analysis of Throughput and Fairness in NR-U/Wi-Fi Coexistence Environments

Min-Gon Cho, Ki-Hun Lee, Jaewon Bae*, Bang Chul Jung
Chungnam National University, *KAIST

요약

본 논문은 NR-U와 Wi-Fi 시스템이 비면허 대역의 같은 채널을 공유하며 공존하는 환경에서 두 시스템의 채널 접근 우선순위 클래스에 따른 처리량 성능 및 시스템 간 공평성을 분석했다. NR-U 및 Wi-Fi의 MAC 프로토콜인 listen-before-talk (LBT), 반송파 감지 다중 접속 및 충돌 회피(carrier-sense multiple access with collision avoidance: CSMA/CA)와 3GPP 및 IEEE 802.11e 각각에서 정의한 표준 파라미터에 기반하여 일반화된 성능 분석을 수행했다. 모의실험을 통해 두 시스템 모두 우선순위 클래스가 낮은 파라미터로 동작하는 경우 공평성은 높지만, 단말 수가 증가할수록 처리량 성능이 저하되며, 높은 우선순위 클래스에 대해서는 노드 수 대비 높은 처리량 성능을 보이나, 공평성이 떨어지는 것으로 분석했다.

1. 서론

셀룰러 이동통신 시스템의 지속적인 무선 트래픽 급증에 따라 4G 이동통신 시스템으로 대표되는 Long Term Evolution-Advanced (LTE-A)에서는 면허 대역뿐만 아니라 비면허 대역을 통해 셀룰러 네트워크를 운용할 수 있도록 비면허 LTE(Unlicensed-LTE: U-LTE) 기술이 표준화되었다. LTE-A의 캐리어 집계(carrier aggregation: CA) 기술을 기반으로 Wi-Fi 시스템과 비면허 대역을 듀티 사이클 형태로 공유하여 하향링크 데이터를 전송하는 LTE-U (3GPP Rel-12)를 시작으로, 반송파 감지 다중 접속 및 충돌 회피(Carrier-sense multiple access with collision avoidance: CSMA/CA)와 같은 Listen-before-talk (LBT) 형태로 동작하는 LTE-licensed assisted access (LAA) (Rel-13)가 개발되었으며, 나아가 상향링크에서도 비면허 대역을 활용하는 enhanced LAA (eLAA) (Rel-14)가 개발되었다. 또한, 면허 대역의 앵커(anchor) 없이 비면허 대역에서만 LTE 시스템을 운용하는 MulteFire (Rel-14)가 있다. 5G New-Radio (NR) 또한 LTE-LAA와 같이 LBT 프로토콜에 기반하여, 비면허 대역에서 이동통신 시스템을 운용하는 NR-U (Rel-16, 17)의 표준화를 진행 중에 있다 [1], [2].

6G 및 차세대 이동통신 시스템 또한 지속해서 급증하는 무선 트래픽을 수용하기 위해, 앞으로도 NR-U처럼 이동통신 시스템의 비면허 대역을 활용한 주파수 공유기술을 더욱 활발히 응용할 것으로 전망된다. 한편, 비면허 대역에서 NR-U와 Wi-Fi 시스템 간 주파수 공유기술의 기본 패러다임은 NR-U 시스템이 기존 비면허 대역에서 서비스가 이루어지는 Wi-Fi 시스템의 성능 열화를 최소화하면서, 주파수 사용 효율은 최대화하며 두 시스템이 공존하는 것이다. 이를 위해 최근 NR-U/Wi-Fi 공존 환경에서 두 시스템의 공평성(fairness) 및 처리량(throughput) 성능을 분석하고 이를 향상하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 [3-5]. 특히, [3]에서는 LTE-LAA의 채널 접근 우선순위 클래스(channel access priority class: CAPC)에 따른 LBT 파라미터와 Wi-Fi의 CSMA/CA 파라미터를 기반으로 처리량 및 공평성 분석을 수행했으며, [4]에서는 각 시스템 간 공평성 향상을 위해 LBT와 CSMA/CA의 파라미터 중 센싱 슬롯 및 최소 경쟁 윈도우 크기 최적화를 수행했다.

하지만, 앞서 서술한 기존 연구는 Wi-Fi 시스템의 효율성을 보다 향상하기 위해 IEEE 802.11e에서 표준화한 향상된 분산 채널 접근(Enhanced Distributed Channel Access: EDCA)을 고려하지 않거나 [3], LBT와 CSMA/CA의 표준 파라미터는 고려하지 않은 것으로 확인했다 [4]. 이러한 관점에서 본 논문에서는 3GPP 및 IEEE 802.11e에서 정의한 NR-U/Wi-Fi 각 시스템의 표준 MAC 프로토콜 파라미터에 따라 일반화된 처리량 성능 및 두 시스템 간 공평성을 분석한다.

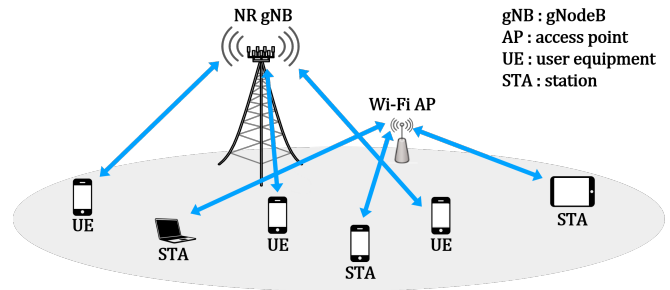


그림 1. NR-U/Wi-Fi 공존 시스템 모델

II. NR-U/Wi-Fi 공존 시스템 MAC 프로토콜 성능 분석

본 논문에서는 그림 1과 같이 각각 하나의 NR-U와 Wi-Fi 시스템이 비면허 대역의 같은 채널을 공유하며 공존하는 네트워크를 고려한다. 이때, Wi-Fi 시스템은 매체 접근 제어 (medium access control: MAC) 프로토콜로써 이진 지수 백오프(binary exponential backoff: BEB) 알고리즘을 적용한 CSMA/CA에 기반하여 동작하며, NR-U 시스템 또한 BEB에 기반한 LBT 프로토콜에 따라 동작한다. CSMA/CA와 LBT 프로토콜은 구조적으로 유사한 메커니즘으로 동작하며, 두 시스템 모두 채널 감지는 에너지 검출을 통해 수행한다. 아울러 공존 시스템에서 숨겨진 노드 문제 및 노출된 노드 문제는 없으며, 두 노드의 동시 신호를 송신으로 인한 충돌이 발생하지 않는 한 신호 검출 과정에서는 에러가 없다고 가정한다.

두 시스템은 각각 3GPP와 IEEE 802.11e에서 CAPC에 따라 정의한 파라미터 값을 기반으로 운용된다. 구체적으로 각 시스템의 주요 MAC 프로토콜 파라미터로는 한 노드의 패킷 전송이 끝난 후 채널 감지 시 비어있는 경우 최초 대기시간, 최소 경쟁 윈도우 크기 (CWmin), 최대 경쟁 윈도우 크기 (CWmax) 및 채널 점유 시 전송 시간 (TXOP)이 있다. 이는 표 1에 제시된 것처럼 NR-U 시스템의 경우 우선순위에 따라 네 개의 클래스로 나뉘며, Wi-Fi 시스템 또한 운용 서비스에 따라 VO (voice), VI (video), BE (best effort), BK (background)로 나뉜다. 본 논문에서는 NR-U/Wi-Fi 각 시스템의 MAC 프로토콜 파라미터 차이에 따른 처리량 성능과 두 시스템의 공평성을 분석한다.

표 1. 우선순위에 따른 NR-U/Wi-Fi MAC 프로토콜 파라미터

Access Class		Wait Time [μs]		CWmin		CWmax		TXOP [ms]	
		Wi-Fi	NR-U	Wi-Fi	NR-U	Wi-Fi	NR-U	Wi-Fi	NR-U
VO	1	25	25	4	4	8	8	2.08	2
VI	2	25	25	8	8	16	16	4.096	3
BE	3	43	43	16	16	1024	1024	2.528	8 or 10
BK	4	79	79	16	16	1024	1024	2.528	8 or 10

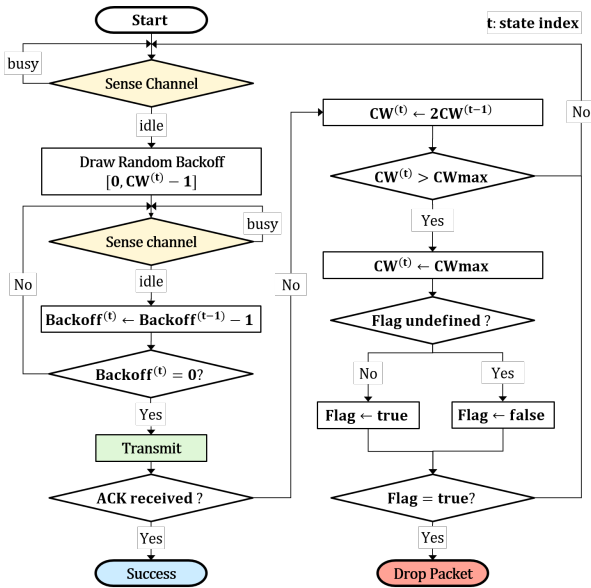


그림 2. LBT 및 CSMA/CA 프로토콜 동작 순서도

그림 1과 같은 NR-U/Wi-Fi 공존 네트워크에서 gNB, UE 및 AP, STA는 모두 하나의 노드로 모델링할 수 있다. 각 노드는 자신의 시스템(NR-U 또는 Wi-Fi)과 표 1을 기반으로 MAC 프로토콜 파라미터값을 할당하며, 그림 2의 순서도에 따라 동작한다. 또한, 본 논문에서 모든 노드는 항상 전송할 패킷이 있는 포화 상태를 가정한다. 일반성을 잃지 않고, 전송할 패킷이 생긴 임의의 한 노드는 우선 현재 채널이 사용되고 있는지(busy) 비어있는지(idle) 에너지 검출을 통해 감지하며, 비어있는 경우 0부터 $(CW_{min}-1)$ 사이 임의의 정수 하나를 백오프 값으로 할당한다.

각 노드는 $9\mu s$ (슬롯 시간) 동안 채널의 에너지를 감지(detection)한 후 이 값이 임계값 이하면 비어있는 것으로 판단하여 백오프 값을 하나 줄인다. 만약 채널 감지(sensing) 시 다른 노드가 패킷 전송을 시작하여 채널이 사용 중인 상태가 되면 백오프를 줄이지 않으면서(freeze) 채널이 비어있는 상태가 될 때까지 채널 감지를 지속한다. 지속적인 채널 감지 과정에서 백오프 값이 0이 된 노드는 채널을 점유하고 패킷 전송을 시도한다.

둘 이상의 노드가 동시에 백오프 값이 0이 되어 전송을 시도하는 경우 전송된 패킷 간 충돌(collision)이 발생한다. 각 노드는 충돌 여부와 관계없이 패킷을 일정 시간 동안 전송하므로, 네트워크는 각 노드의 패킷 전송 시간 중 최댓값만큼 성공적인 패킷 전송 없이 시간 슬롯을 소모한다. 충돌이 발생한 송신 노드는 수신 노드로부터 NACK 신호를 수신하거나 ACK 신호를 수신 못 함으로써 충돌을 인지하고, CW 크기를 두 배 증가시킨 후 임의 백오프 값 할당 과정부터 반복한다. 한편, 한 노드만 전송을 시도하는 경우 해당 노드는 패킷 전송을 성공한 것으로 간주하며, 총 소요 시간 및 해당 노드 시스템의 패킷 전송 시간 슬롯이 TXOP 만큼 증가한다.

한편, BEB 과정에 있어 CW 크기가 CW_{max} 에 도달한 후 패킷 충돌이 한 번 더 발생하는 경우, 해당 노드의 CW 크기는 두 배 증가 없이 CW_{max} 를 기준으로 한 번 더 임의 백오프와 이후 과정을 수행한다. 또한, 다음 시도에도 충돌이 발생하는 경우 노드는 전송하려는 패킷을 버리고, CW 크기를 CW_{min} 으로 할당한다.

이러한 과정을 통해 각 시스템의 처리량은 전체 시간 슬롯 대비 NR-U/Wi-Fi 각 시스템의 노드가 전송에 성공한 시간 슬롯의 비로 정의할 수 있다. 또한, 두 시스템 간의 공정성은 다음과 같은 Jain's 공정성 지수로 평가한다. 여기서 x_i 는 노드 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 가 전송에 성공한 시간 슬롯 수를 의미하며, N 은 네트워크상의 총 노드 수를 나타낸다.

$$Fairness = \frac{\left[\sum_{i=1}^N x_i \right]^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

표 2. 채널 우선 접근 클래스에 따른 Jain's 공정성 지수

Class	1	2	3	4
Fairness	0.9987	0.9764	0.7909	0.7922

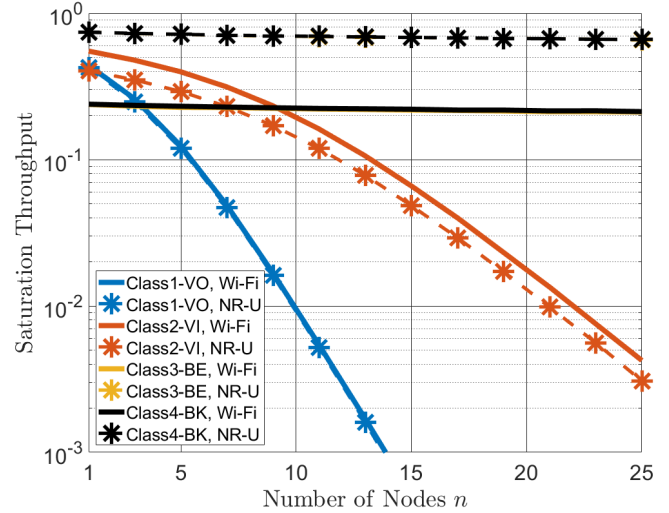


그림 3. 채널 우선 접근 클래스에 따른 처리량 성능

III. 모의실험 결과 및 결론

표 2는 Jain's 공정성 지수로 도출한 두 시스템의 평균 공정성을 나타내며, 그림 3은 NR-U/Wi-Fi 공존 시스템의 노드 수 대비 처리량 성능 모의 실험 결과이다. NR-U/Wi-Fi 두 시스템의 노드 수는 각각 n 으로 같으며, 공정성을 고려하여 각 시스템에 해당하는 노드는 모두 같은 CAPC로 동작한다고 가정했다. 예를 들어 Wi-Fi가 BE이면, NR-U는 class 3으로 동작한다. 결과적으로 두 시스템 모두 낮은 우선순위 클래스를 활용하는 경우 공정성 지수는 높지만, 노드 수 증가에 따라 충돌 발생률이 증가하여 처리량이 감소하는 것을 확인했다. 또한, 높은 우선순위 클래스를 활용하는 경우 비교적 낮은 공정성 지수를 갖지만, 노드 수가 보다 많은 환경에서도 일정한 처리량 성능을 보이는 것으로 분석했다. 한편, 두 시스템 간 공정성은 TXOP 값에 크게 의존하는 것으로 예측된다. 차후 이 결과를 바탕으로 NR-U/Wi-Fi 공존 시스템의 표준 파라미터를 고려한 일반화된 처리량 및 공정성 지수를 수학적으로 분석하고 노드 수에 따른 파라미터 최적화를 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2019-0-00964, 스펙트럼 챌린지를 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발).

참고 문헌

- [1] S. Lee, J. H. Yoon and B. C. Jung, "A Cooperative Phase-Steering Technique with On-Off Power Control for Spectrum Sharing-Based Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 20, no. 7, Mar. 2020.
- [2] S. Lagen *et al.*, "New Radio Beam-Based Access to Unlicensed Spectrum: Design Challenges and Solutions," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 1, pp. 8-37, 1st Quart. 2020.
- [3] N. Bitar, M. O. Al Kalaa, S. J. Seidman and H. H. Refai, "On the Coexistence of LTE-LAA in the Unlicensed Band: Modeling and Performance Analysis," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52668-52681, Oct. 2018.
- [4] Y. Gao and S. Roy, "Achieving Proportional Fairness for LTE-LAA and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 5, pp. 3390-3404, May 2020.
- [5] T. Kim and B. C. Jung, "Performance Analysis of Grant-Free Multiple Access for Supporting Sporadic Traffic in Massive IoT Networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 166648-166656, Nov. 2019.