

채널정보 기반 OFDMA FD-MAC 프로토콜

천혜림*, 김재현^o

OFDMA FD-MAC Protocol Based on the Channel Information

Hye-Rim Cheon*, Jae-Hyun Kim^o

요약

무선랜 이용률 증가에 따라 무선랜 단말뿐만 아니라 AP의 밀집도가 증가하고 있고, 이로 인해 무선랜의 실제 성능(real performance)이 저하되고 있다. 이를 개선하기 위한 PHY/MAC 기술 중 OFDMA와 full duplex가 있다. 기존 OFDMA 기반 무선랜 MAC 연구는 채널 utilization과 충돌확률 측면에서의 문제점이 있고 따라서 보다 효율적인 채널할당 프로토콜에 대한 연구가 필요하다. Full duplex는 같은 주파수에 동시에 송수신이 가능한 방식으로 half duplex에 비해 더 유연한 채널할당이 가능하다. 본 논문에서는 full duplex 전송 노드의 idle 채널정보를 바탕으로 서브 채널을 할당하는 OFDMA FD-MAC(Full Duplex MAC) 프로토콜을 제안하였다. 또한, 성능분석을 통해 throughput이 개선됨을 확인하였다.

Key Words : WLAN, HEW, OFDMA, Full Duplex, STR

ABSTRACT

The deployment density of AP increases as well as the density WLAN stations due to increase of WLAN use and the real performance of WLAN is degraded. To improve the performance, there are many PHY/MAC technologies and OFDMA and full duplex are promising technologies among them. In conventional OFDMA WLAN MAC relate works, there are some limitations in terms of channel utilization and collision probability. Thus, it need to research for effective channel allocation protocol. Full duplex can transmit data on the same time and same frequency resource so it can allocate channel more flexible than half duplex. In this paper, we propose the OFDMA FD-MAC(Full Duplex MAC) protocol that it allocates the sub-channels based on the idle channel information for full duplex pair. In addition, it shows the throughput improvement by performance analysis.

I. 서론

스마트폰, 태블릿 PC 등과 같은 모바일 기기의 급속한 확산으로 인해 무선랜 이용률이 급격히 증가하고 있다. 이러한 무선랜 사용자의 급격한 증가를 커버하기 위해 무선랜 AP 설치 또한 급격히 증가하고 있

다. 이로 인해 무선랜 환경은 점차로 무선랜 단말과 AP 모두 밀집된 환경으로 변화하고 있으며, 이로 인한 interference, 채널 경쟁 등으로 인해 실제 사용자가 느끼는 통신 품질의 저하를 가져오고 있다. IEEE 802.11에서는 실내외 밀집된 무선랜 단말 및 AP 환경에서 무선랜의 실제 성능을 향상시키는 것을 목표로

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구원진흥센터의 정보통신·방송연구개발사업의 일환으로 수행하였음.[2014-044-006-004, 고성능,고효율의 차세대 무선랜 무선전송 원천기술 개발]

• First Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, hyerimn1@ajou.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, jkim@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-02-036, Received February 14, 2015; Revised March 13, 2015; Accepted March 13, 2015

2013년 5월 HEW SG(High Efficiency WLAN Study Group)이 시작되었고, 이어서 2014년 5월 802.11ax TG(Task Group)에서 본격적인 표준화 작업에 돌입하였다¹⁾.

802.11ax에서 주파수 효율(spectrum efficiency)과 지역 처리율(area throughput)을 개선하기 위해 고려 중인 PHY/MAC 기술 중에는 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access), full duplex가 있다. OFDMA는 시간과 주파수 도메인 모두에서 사용자에게 자원할당이 가능하며 이를 통해 다중 사용자에게 동시에 채널 access를 가능하게 하여, 채널 utilization이 증가한다²⁾. 또다른 고려 기술 중 하나인 full duplex는 half duplex와 달리 같은 주파수 자원에서 동시에 송수신이 가능하며, 이를 통해 최대 2배까지 throughput이 개선될 수 있다. 802.11ax에서는 STR(Simultaneous Transmit and Receive)라고도 부른다. full duplex의 PHY계층에서 self interference가 가장 큰 문제가 되고 있는데, 이를 해결하기 위한 아날로그 혹은 디지털 방식의 self interference cancellation 연구가 많이 이루어지고 있으며 이를 기반으로 한 MAC 프로토콜 연구 또한 진행되고 있다³⁻⁵⁾.

기존 OFDMA 시스템을 기반으로 한 무선랜 연구는 대부분 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)를 바탕으로 한 연구거나, 이러한 연구에서 발생한 문제점을 개선한 연구가 주를 이루고 있다. 이러한 CSMA/CA 기반 OFDMA 무선랜 MAC 연구는 경쟁방식을 바탕으로 하기 때문에 채널 utilization이나 충돌 확률 측면에서 한계점이 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위해서는 경쟁방식보다 효과적인 채널할당을 위한 무선랜 MAC 연구가 필요하다. 또한, full duplex는 같은 시간, 주파수에서 송수신을 하기 때문에 full duplex를 적용한 OFDMA에서는 서브 채널들을 더 융통성있게 무선랜 노드에 할당하여 주파수 효율을 높여 채널 utilization을 높이고, 충돌을 줄여, throughput을 개선할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 무선랜 노드의 idle 채널정보를 바탕으로 full duplex 전송에 서브 채널을 할당하는 OFDMA 시스템에서의 FD(Full Duplex)-MAC 프로토콜을 제안하고, 성능분석을 통해 기존 OFDMA 기반 CSMA/CA MAC 프로토콜보다 개선된 throughput을 보임을 검증할 것이다.

이 논문은 다음의 순서로 구성된다. 2장에서는 기존 OFDMA와 full duplex에 관련된 연구들과 그 문제점을 정리하고, 3장에서는 무선랜 노드의 채널정보

를 바탕으로 한 OFDMA FD-MAC 프로토콜을 제안한다. 4장에서는 성능분석 및 그 결과에 대해 설명하고, 마지막 5장에서는 결론을 맺는다.

II. OFDMA 및 full duplex 관련 연구

2.1 OFDMA 관련 연구

2.1.1 Multi-channel CSMA/CA protocol

이 논문에서는 OFDMA 시스템에서의 CSMA/CA 프로토콜, multi 채널 CSMA/CA 프로토콜을 기존 OFDMA를 적용하지 않은, 즉, single 채널 CSMA/CA 프로토콜과 비교분석하였다⁶⁾.

먼저, 채널 utilization은 multi 채널 CSMA/CA 프로토콜이 single 채널 CSMA/CA 프로토콜에 비해 더 크다. 이는 single 채널 CSMA/CA 프로토콜에서는 한 단말이 데이터를 전송하고 있을 때 다른 단말의 backoff counter는 변하지 않는데 비해, multi 채널 CSMA/CA 프로토콜에서는 서브채널 중 하나만 idle 상태여도 backoff counter가 줄어들어 채널의 idle time을 줄일 수 있으며 채널 utilization이 향상된다.

충돌 확률은 multi 채널 CSMA/CA 프로토콜이 single 채널 CSMA/CA 프로토콜에 비해 적다. 왜냐하면, single 채널 CSMA/CA 프로토콜에서는 단말의 backoff counter가 동시에 0이 되면 무조건 충돌이 발생하지만, multi 채널 CSMA/CA 프로토콜은 단말의 backoff counter가 동시에 0이 되더라도 서로 다른 서브 채널을 선택하여 전송하면 충돌이 발생하지 않는다.

2.1.2 Group contention-based OFDMA MAC protocol

OFDMA 시스템에서 시간 또는 주파수의 동기화가 정확하게 수행되지 않으면 서브 채널 간의 직교성(orthogonality)이 보장되지 않는다. 따라서, 단말간의 서로 다른 timing offset이 cyclic prefix duration을 초과할 경우 MAI(Multiple Access Interference)가 발생할 수 있다. 이 논문에서는 symbol timing delay에 따라 AP가 STA를 여러 그룹으로 분류하고 그룹별로 지정된 시간 동안 경쟁을 통해 채널을 할당받아 데이터를 전송하는 GC(Group Contention)-OFDMA를 제안하였다⁷⁾.

2.1.3 문제점

(1) 채널 utilization

앞 두 가지 연구 모두 채널 utilization에서 한계점

이 있다. Multi 채널 CSMA/CA 프로토콜에서는 그림 1처럼 여러 서브채널 사용 가능하더라도 한 노드에 한 서브채널만 할당하여 사용할 수 있어 채널 utilization을 감소시킨다. 또한, GC-OFDMA 프로토콜에서는 한 그룹의 단말 수가 서브 채널수보다 적을 경우 사용되지 않는 서브 채널이 발생할 수 있어 채널 utilization이 저하된다. 따라서 효과적인 채널 할당을 통해 채널 utilization을 증가시키는 무선랜 MAC 연구가 요구된다.

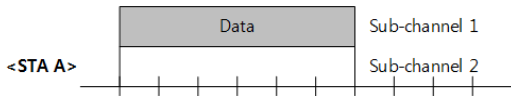


그림 1. 비효율적인 채널 utilization
Fig. 1. Ineffective channel utilization

(2) 충돌 확률

기존 연구들에서는 충돌 확률을 높이는 요인들이 존재한다. Multi 채널 CSMA/CA 프로토콜에서 그림 2와 같이 backoff counter 동시에 0이 되는 단말들이 같은 서브 채널을 통해 전송을 시도하는 경우 충돌이 발생할 수 있다. 그리고, GC-OFDMA 프로토콜에서는 한 그룹의 단말 수가 서브 채널 수보다 많을 경우 충돌이 발생할 수 있다. 따라서 충돌 확률을 줄이는 채널 할당 무선랜 MAC 연구가 필요하다.

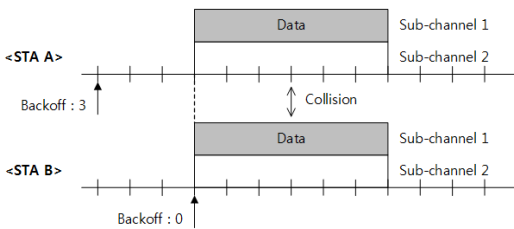


그림 2. 같은 채널 선택으로 인한 충돌 발생
Fig. 2. Collision due to same channel selection

2.2 Full duplex 관련 연구

2.2.1 ContraFlow

이 논문에서는 CSMA/CA 프로토콜을 full duplex에 적용시 발생할 수 있는 문제점을 지적하고, 이를 해결하기 위해 distributed한 방식의 full duplex 프로토콜을 제안하고 있다. 먼저, full duplex 전송에 primary 전송과 secondary 전송의 새로운 개념을 제안하고 있으며, 각 전송에는 각각 transmitter, receiver가 있고, primary receiver는 secondary transmitter가

된다. Full duplex 전송은 primary receiver가 secondary receiver를 선택하여 secondary 전송을 시작으로 이루어진다. 이때, secondary receiver는 각 dual-link 과거 전송 성공비율을 바탕으로 선택한다. 그리고 primary 전송 데이터 길이와 secondary 전송 데이터 길이의 비대칭을 해결하기 위해 먼저 전송이 완료되는 노드에서는 busy tone을 전송한다⁸⁾.

2.2.2 Janus

이 논문에서는 ContraFlow와 같이 단말들간 스케줄링을 하던 distributed 방식과 달리 AP가 full duplex 전송 스케줄링 후 단말들에게 알려주는 AP centric 방식을 제안하고 있다. 먼저, full duplex에 참여하려는 단말은 AP로 전송하려는 데이터의 크기 정보와 데이터 전송시 다른 노드로 인한 interference level 정보를 AP로 전송한다. 이러한 정보를 바탕으로 AP는 throughput이 최대가 되도록 스케줄링하여 full duplex 전송 스케줄 정보를 단말들에 전송하면 단말들을 정해진 스케줄대로 full duplex 전송을 수행한다^{9,10)}.

2.2.3 문제점

Distributed FD-MAC에서는 full duplex 전송에서 그림 3과 같이 서로 전송할 데이터 길이를 대칭으로 맞추고 주변 노드들에 full duplex 전송을 알리기 위해 데이터를 포함하지 않는 busytone 전송하는데, 이로 인해 처리율이 낮아질 수 있다. Centralized

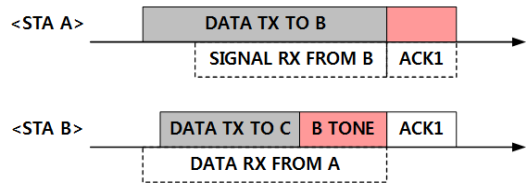


그림 3. Distributed FD-MAC의 busytone 전송
Fig. 3. Busytone transmission for distributed FD-MAC

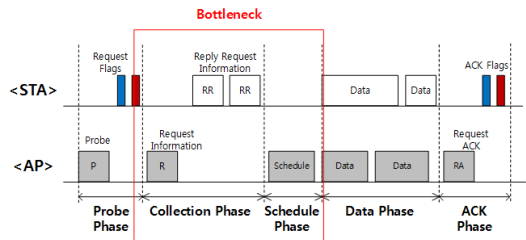


그림 4. Centralized FD-MAC의 정보수집 및 스케줄링 구간 bottleneck
Fig. 4. Bottleneck at the collection and scheduling phase for centralized FD-MAC

FD-MAC에서는 그림 4처럼 수집한 단말들의 정보를 바탕으로 AP가 full duplex 스케줄을 결정하기 때문에 AP에서 처리해야 할 데이터가 많아지며 이로 인한, bottleneck이 생길 수 있다. 또한 별도의 정보수집 시간 및 스케줄링 시간이 필요하며 이로 인해 처리율이 저하될 수 있다. 따라서 full duplex 효율을 가장 높일 수 있는 전송 pair를 선택하는 것에 대한 연구가 필요하다.

III. 채널정보 기반 OFDMA FD-MAC 프로토콜 제안

본 논문에서는 앞서 지적한 OFDMA 기반 무선랜에서의 효율적인 채널할당을 위해 half duplex에 비해 주파수 효율을 높일 수 있는 full duplex를 적용하고, 또한, 주변 채널정보를 바탕으로 채널할당을 하는 무선랜 MAC 프로토콜을 제안한다.

제안한 OFDMA FD-MAC 프로토콜은 그림 5처럼 총 4단계로 나뉜다. 1단계에서는 각 단말들이 AP로 전송할 데이터의 길이와 목적지, 그리고 주변 idle 채널 정보를 전송한다. 2단계에서는 full duplex 단말 선택과 스케줄을 결정합니다. AP는 그림 6처럼 AP가

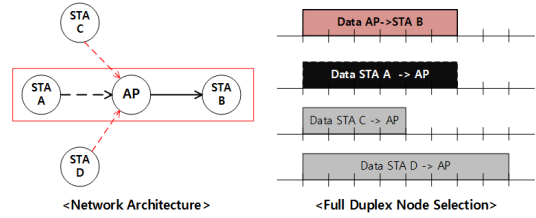


그림 6. Full duplex 단말 선택
Fig. 6. Full duplex node selection

목적지인 전송 데이터를 가진 단말중에서 AP가 전송할 데이터 길이와 가장 비슷한 길이의 전송 데이터를 가진 단말을 선택한다. 즉, AP 송신 데이터와 수신 데이터 길이가 유사하도록 단말을 선택한다. Full duplex 전송 스케줄은 AP 송신 데이터와 수신 데이터 중 긴 데이터 길이만큼 할당하고, 먼저 전송이 완료된 쪽에서는 남은 전송스케줄동안 busy tone을 전송한다.

3단계에서는 선택된 full duplex pair의 전송을 위한 채널을 할당한다. full duplex 전송 노드와 non-full duplex 노드의 채널할당 형평성을 위해 AP에 association 되어 있는 단말들의 full duplex 전송 관여 정도와 full duplex 노드와 non-full duplex 노드의 idle 채널 정보를 바탕으로 다음과 같이 할당한다.

1) AP에 association 되어있는 단말이 모두 full duplex 전송에 관여되어 있는 경우

$$N_{FD} = N_{idle} \quad (1)$$

2) AP에 association 되어있는 단말 일부가 full duplex 전송에 관여하지 않는 경우

- n{(full duplex 노드의 공통 연속 idle 채널) & (non-full duplex 노드의 idle 채널)} > $N_{idle}/2$

$$N_{FD} = \lceil \frac{N_{idle}}{2} \rceil \quad (2)$$

- n{(full duplex 노드의 공통 연속 idle 채널) & (non-full duplex 노드의 idle 채널)} ≤ $N_{idle}/2$

$$N_{FD} = N_{idle} \quad (3)$$

N_{idle} 는 full duplex에 참여하는 노드의 공통 idle 채널 중 연속채널 수, N_{FD} 는 full duplex 전송에 할당된 채널의 수이다. 현재 AP에 association 되어 있는

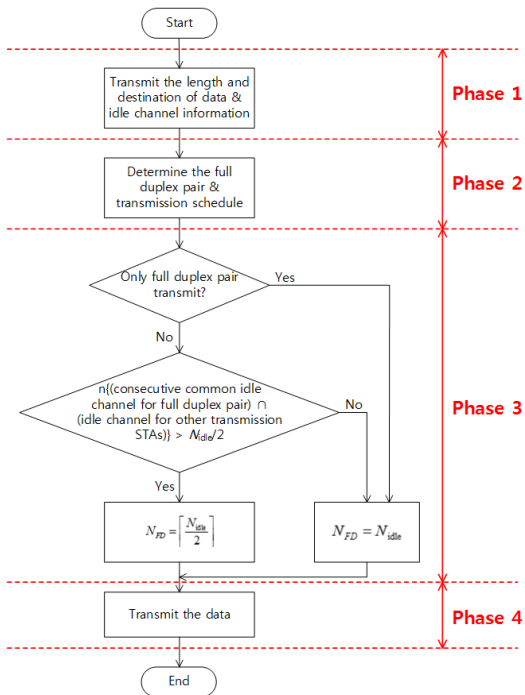


그림 5. 제안한 OFDMA FD-MAC 프로토콜 플로우차트
Fig. 5. Proposed OFDMA FD-MAC protocol flowchart

단말들이 모두 full duplex 전송에 관여되어 있는 경우는 식 (1)과 같이 모든 full duplex 노드의 idle 채널을 full duplex에 할당한다. Full duplex 전송에 관여하지 않는 단말들이 있을 경우는 2가지의 경우로 나눈다. 그림 7처럼 full duplex 노드와 full duplex에 참여하고 있지 않는 노드, 즉, non-full duplex 노드의 공통된 idle 채널수가 전체 full duplex 노드의 idle 채널의 1/2보다 큰 경우, 식 (1)처럼 모든 채널을 full duplex에 할당하여 non-full duplex 노드가 전송을 시도할 때 할당할 채널이 없어지기 때문에 식 (2)와 같

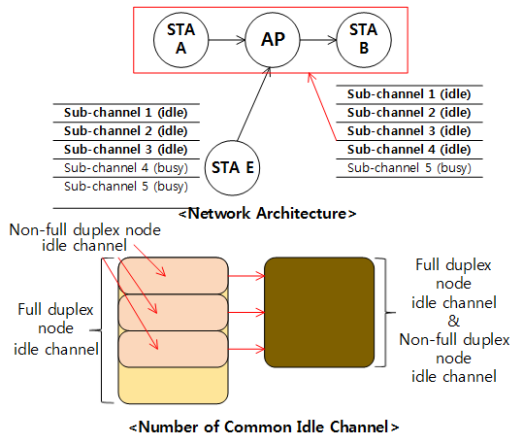


그림 7. 공통 idle 채널수가 full duplex 전송 idle 채널수의 1/2 이상인 경우
 Fig. 7. Example that the number of common idle channel is larger than the number of half of full duplex idle channel

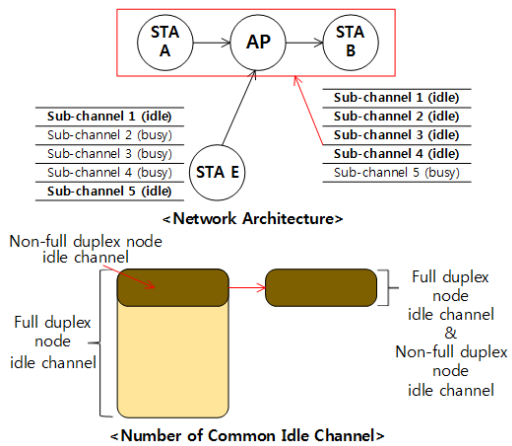


그림 8. 공통 idle 채널수가 full duplex 전송 idle 채널수의 1/2 이하인 경우
 Fig. 8. Example that the number of common idle channel is smaller than the number of half of full duplex idle channel

이 정해진 full duplex 전송에 전체 full duplex 노드의 idle 채널의 1/2정도만 할당한다. 나머지 경우, 그림 8처럼 full duplex 노드와 full duplex에 참여하고 있지 않는 노드의 공통된 idle 채널수가 전체 full duplex 노드의 idle 채널의 1/2이 안되는 경우는 식 (3)과 같이 full duplex 전송에는 full duplex 노드의 idle 채널 전체를 할당한다. 마지막 4단계에서는 정해진 스케줄대로 할당된 채널을 통해 데이터를 전송하게 된다.

그림 9, 10은 기존 OFDMA 기반 CSMA/CA 프로토콜과 제안한 OFDMA FD-MAC 프로토콜의 데이터 전송을 나타낸 것이다. 단말 A가 AP에 데이터를

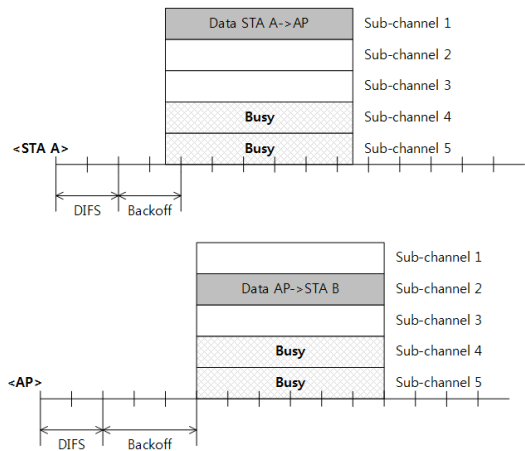


그림 9. 기존 OFDMA 기반 CSMA/CA 프로토콜
 Fig. 9. Conventional CSMA/CA protocol for OFDMA

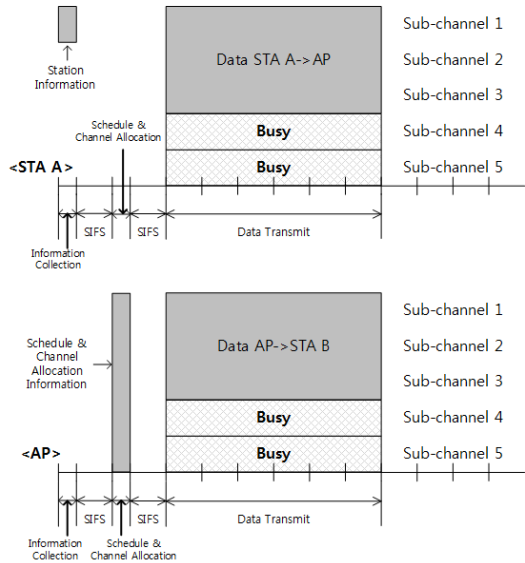


그림 10. 제안한 OFDMA FD-MAC 프로토콜
 Fig. 10. Proposed OFDMA FD-MAC protocol

전송하고, AP가 단말 B에 데이터를 전송하는 경우, 총 5개의 서브채널 중 서브채널 1, 2, 3이 idle하다고 가정하였다. 기존 OFDMA 기반 CSMA/CA 프로토콜의 경우는 그림 9와 같이 단말 A가 AP에 데이터를 전송하는 것에 서브채널 1, AP가 단말 B에 데이터를 전송하는 것에 서브채널 2를 할당하는 것과 같이 각각 다른 채널을 할당한다. 하지만, 제안한 OFDMA FD-MAC에서는 그림 10처럼 idle 채널 정보를 바탕으로 서브채널 1, 2, 3을 모두 full duplex 전송에 할당하게 된다.

IV. 성능분석

성능분석을 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 MATLAB에서 수행하였고, 그림 11과 같은 시뮬레이션 환경을 가정하였다. 3개의 AP와 5개의 단말을 가정하였고, 그 중 full duplex 전송에 참여하는 노드는 AP 1과 단말 A, B로 단말 A에서 AP 1, AP 1에서 단말 B로 전송할 데이터가 있으며, 두 데이터의 길이는 같다고 가정하였다. 서브채널을 총 5개가 있으며, 주변 채널의 idle과 busy 상태는 랜덤하게 변화한다고 가정하였다. 패킷 사이즈는 패킷사이즈 분포의 평균값으로 가정하였고, 나머지 파라미터는 표 1과 같다¹¹⁾.

그림 12, 13은 CSMA/CA와 FD-MAC의 throughput을 비교한 것을 나타내고 있다. 각 그림에서 x축은 전송할 패킷의 수이고, y축은 throughput을 나타낸다. 그림 12는 서브채널이 5개일 때, 그림 13은 서브채널이 11개일 때의 throughput으로 공통적으로 전송할 패킷의 수가 적을 때는 CSMA/CA의 throughput이 크지만, 전송할 패킷의 수가 클수록 제안한 FD-MAC의

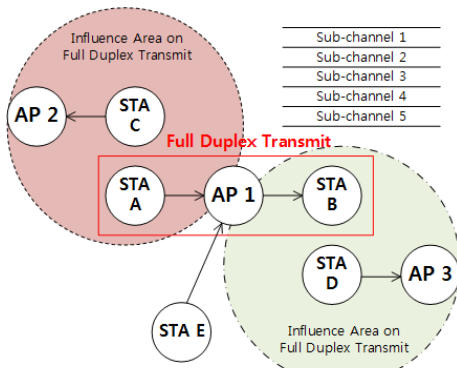


그림 11. 성능분석을 위한 네트워크 구조
Fig. 11. Network architecture for performance analysis

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameter

Parameter	Value
Number of packets	1-20
Number of sub channels (M)	5, 11
Number of simulation times	100
Data rate	54 Mbps
DIFS ^[6]	110 μ s
Minimum CW ^[6]	32
Backoff slot duration ^[6]	50 μ s
FD-MAC scheduling overhead ^[9]	2530 μ s

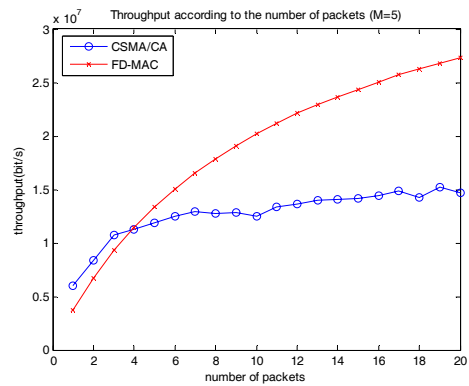


그림 12. 서브채널 수 5개일 때 CSMA/CA와 FD-MAC의 Throughput 비교
Fig. 12. Throughput for CSMA/CA and FD-MAC when the number of sub-channel is 5

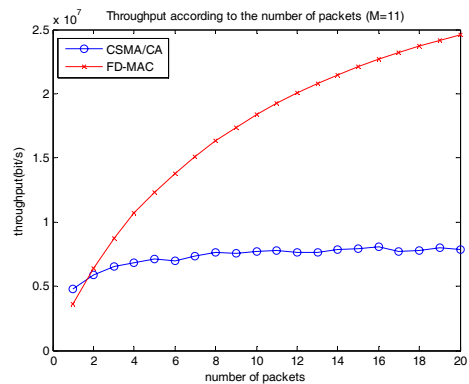


그림 13. 서브채널 수 11개일 때 CSMA/CA와 FD-MAC의 Throughput 비교
Fig. 13. Throughput for CSMA/CA and FD-MAC when the number of sub-channel is 11

throughput이 큰 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 full duplex 전송에 참여한 노드의 전송할 데이터가 많을수

록 오버헤드에 대한 영향이 적어 throughput이 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 12의 경우는 전송할 패킷의 수가 5개 이상부터 FD-MAC의 throughput이 더 크며, 그림 13의 경우는 전송할 패킷의 수가 2개 이상부터 FD-MAC의 throughput이 더 크지며 CSMA/CA 프로토콜의 throughput 차이가 서브채널 5개일 때에 비해 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 서브채널의 수가 커질수록 채널하나당 대역폭이 작아져 CSMA/CA의 경우는 각 전송별로 서브채널 하나만 할당하기 때문에 throughput이 줄어드는 반면, 제한한 FD-MAC의 경우는 채널환경에 따라 idle 채널 전부 혹은 1/2을 할당받기 때문에 서브채널의 수에 따라 throughput의 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존 OFDMA 무선랜 MAC 연구의 채널 utilization, 충돌 확률 측면에서 한계점을 지적하고, 효율적인 채널할당의 필요성을 지적하였다. 따라서 full duplex에 참여하는 노드의 idle 채널정보를 바탕으로 서브 채널을 할당하는 OFDMA FD-MAC 프로토콜을 제안하였다. 성능 분석을 통해 full duplex 전송 데이터 많을수록 제한한 MAC 프로토콜이 기존 OFDMA 기반 CSMA/CA 프로토콜보다 개선된 throughput을 보임을 검증하였고, 기존 OFDMA 기반 CSMA/CA 프로토콜이 서브채널 수가 증가함에 따라 throughput이 감소하는 반면, 제안한 FD-MAC 프로토콜은 서브채널의 수에 따라 throughput 성능에서 큰 차이가 없음을 확인하였다.

이후에는 full duplex 전송 노드의 QoS를 고려한 OFDMA 채널할당 방법과 full duplex 전송의 송수신 데이터 길이 비대칭으로 인한 영향과 개선방법을 연구할 예정이다.

References

[1] Status of Project IEEE802.11ax High Efficiency WLAN(HEW) from http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm

[2] J. Seo, C. Han, S. Park, and J. Chung, "Resource allocation schemes for legacy OFDMA systems with two-way DF relay," *J. KICS*, vol. 39A, no. 10, pp. 593-600, Oct. 2014.

[3] C. An and H. G. Ryu, "Simultaneous single

band duplex system for the spectrum efficiency improvement," *J. KICS*, vol. 38A, no. 09, pp. 810-81, Sept. 2013.

[4] H. S. Keum, C. An, and H. G. Ryu, "Design and performance evaluation of SSD (Simultaneous Single Band Duplex) system with HPA nonlinearity," *J. KICS*, vol. 40, no. 01, pp. 23-31, Jan. 2015.

[5] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 375-386, New York, USA, 2013.

[6] H. Kwon, H. Seo, S. Kim, and Byeong Gi Lee, "Generalized CSMA/CA for OFDMA systems: Protocol design, throughput analysis, and implementation issues," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, no. 8, pp. 4176-4187, Aug. 2009.

[7] J. Jung and Jaesung Lim, "Group contention-based OFDMA MAC protocol for multiple access interference-free in WLAN systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 2, pp. 648-658, Feb. 2012.

[8] N. Singh, D. Gunawardena, A. Proutiere, B. Radunović, H. V. Balan, and P. Key, "Efficient and fair MAC for wireless networks with self-interference cancellation," in *Proc. WiOpt 2011*, pp. 94-101, Princeton, USA, May 2011.

[9] J. Y. Kim, O. Mashayekhi, H. Qu, M. Kazadiieva, and P. Levis, "Janus: a novel MAC protocol for full duplex radio," *CSTR*, Jul. 2013.

[10] P. Levis, "STR radios and STR media access," Stanford University, IEEE 11-13/1421r1, Nov. 2013.

[11] Packet size distribution comparison between Internet links in 1998 and 2008. from www.caida.org/research/traffic-analysis/pkt_size_distribution/graphs.xml

천 혜 립 (Hye-Rim Cheon)



2006년 : 아주대학교 전자공학
부 졸업
2011년~현재 : 아주대학교 전자
공학과 석박사통합과정
<관심분야> 무선인터넷 QoS,
MAC 프로토콜, Full
duplex, OFDMA, 소형셀,
LIPA/SIPTO 등

김 재 현 (Jae-Hyun Kim)



1987년~1996년 : 한양대학교
전산과 학사 및 석/박사
1997년~1998년 : 미국 UCLA
전기전자과 박사 후 연수
1998년~2003년 : Bell Labs,
Performance Modeling and
QoS Management Group
연구원

2003년~현재 : 아주대학교 전자공학과 정교수
<관심분야> 무선인터넷 QoS, MAC 프로토콜,
IEEE 802.11/15, B4G/5G, 국방 기술네트워크,
위성통신 및 시스템 설계 등