
Frame Aggregation 기법을 적용한 IEEE 802.11n 시스템 성능 분석

Performance Analysis of IEEE 802.11n System adapting Frame Aggregation Methods

이윤호, 김주석, 김경석
충북대학교 전자통신공학과

Yun-Ho Lee(paper9875@naver.com), Joo-Seok Kim(jskim@naver.com),
Kyung-Seok Kim(kseokkim@cbnu.ac.kr)

요약

IEEE 802.11n은 MAC 계층에서 100Mb/s이상의 데이터 처리량을 달성하므로 초고속 데이터 통신을 지원하는 차세대 무선랜의 표준으로 각광받고 있다. IEEE 802.11n의 연구 동향은 크게 두 가지로 MAC 계층에서 패킷 간의 결합을 통하여 데이터 처리량을 높인 부분과 PHY 계층에서 다중 안테나 기법을 적용하여 데이터 전송속도를 높인 부분으로 정리된다. 그러나 전자는 무선 채널을 고려하지 않음으로 현실성이 결여되어 있었고, 후자는 패킷 간의 결합을 간과함으로 현실적인 처리량 결과를 얻을 수 없었다. 그래서 본 논문에서는 IEEE 802.11n 시스템에서 MAC 계층과 PHY 계층의 연동을 고려하여 성능을 분석한다. 또한, MAC 계층에서는 멀티 서비스를 고려한 A-MPDU, A-MSDU 기법을 적용하고, PHY 계층에서는 WLAN MIMO TGn 채널 모델 사용과 함께 SVD 기법을 적용함으로 다중 안테나 기법과 무선 채널을 모두 고려하면서 IEEE 802.11n 시스템의 현실적인 데이터 처리량을 분석한다. 시뮬레이터는 전 계층을 고려하여 Ns-2를 사용하기로 한다.

■ 중심어 : | IEEE 802.11n | A-MPDU | A-MSDU | WLAN MIMO TGn 채널 |

Abstract

IEEE 802.11n is an ongoing next-generation WLAN(Wireless Local Area Network) standard that supports a very high-speed connection with more than 100Mb/s data throughput measured at the MAC(Medium Access Control) layer. Study trends of IEEE 802.11n show two aspects, enhanced data throughput using aggregation among packets in MAC layer, and better data rates adapting MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) in PHY(Physical) layer. But, the former doesn't consider wireless channel and the latter doesn't consider aggregation among packets for reality. Therefore, this paper analyzes data throughput for IEEE 802.11n considering MAC and PHY connection. A-MPDU(Aggregation-MAC Protocol Data Unit) and A-MSDU(Aggregation-MAC Service Unit) is adapted considering multi-service in MAC layer, WLAN MIMO TGn channel using SVD(Singular Value Decomposition) is adapted considering MIMO and wireless channel in PHY layer. Consequently, Simulation results shows throughput between A-MPDU and A-MSDU. Also, We use Ns-2(Network simulator-2) for reality.

■ keyword : | IEEE 802.11n | A-MPDU | A-MSDU | WLAN MIMO TGn Channel |

I. 서론

최근 무선통신 분야에서는 다양한 형태의 멀티미디어 수요의 증가에 따라 고속의 데이터 전송속도 및 증가된 커버리지 영역에 대한 요구가 빠른 속도로 증가하고 있다. WLAN(Wireless Local Area Network)은 케이블 링의 불필요, 이동성 지원 등의 장점이 있고, 최근에는 가격도 많이 낮아져 유선망의 주요 접근 방법 중 하나로 급부상하고 있다.

WLAN 분야에서는 현재 사용화 되어 많이 사용되고 있는 IEEE 802.11a/g 표준 기반의 시스템이 현재 시장에서 선을 보이고 있고, 개선된 QoS(Quality of Service)에 대한 표준이 거의 완료된 상황이다. 무선 통신 서비스 업체에서는 최근 WLAN 기술을 이용하여 핫 스팟(Hot Spot) 영역에서 고속의 무선 인터넷 서비스를 제공하고 있으며, 홈 네트워크 시스템에서도 WLAN 기술은 xDSL 혹은 케이블 모뎀과 같은 고속의 유선 인터넷 접속 시스템과 연동할 수 있는 핵심 기술의 하나로 평가받고 있다. 또한 이러한 기술들은 셀룰러 시스템과 같이 광역의 커버리지를 지원하는 시스템과 연동하여 광대역의 무선 데이터 서비스를 경제적으로 실현할 수 있는 시스템으로 인식되고 있다.

WLAN을 이용한 향후 예상되는 구체적인 응용 분야로서는 우선 가정 혹은 사업장에서 비디오 혹은 멀티미디어 스트리밍 데이터에서 요구되는 QoS를 만족시키는 데이터 송, 수신이나 WLAN 네트워크를 통한 VoIP(Voice of Internet Protocol)등이 포함된다. 이러한 고속의 데이터 전송률과 향상된 QoS 보장 혹은 이동성 지원 등을 위한 표준 활동은 IEEE 802.11내의 TGN(High Throughput Task Group N)내에서 최근 활발하게 이루어지고 있으며 특히 차세대 WLAN에 대한 표준은 2002년 초부터 TGN을 중심으로 진행되고 있으며 표준의 목표는 PHY 계층에서의 데이터 전송속도의 증가 뿐 아니라 그 상위 계층에서의 전송 효율의 증대를 목표로 표준 제정 활동을 전개하고 있다. 구체적으로는 PHY 계층에서의 단위 주파수 당 데이터 전송 효율과 MAC(Medium Access Control)과 그 상위 계층에서의 전송율의 목표를 100Mbps로 명시하고 있다[1][2].

현재까지 IEEE 802.11n 시스템을 위한 연구 결과가 상당히 많이 발표되고 있다. PHY 계층에서 발표된 연구 결과를 보면 Riera-Palou, F의 1명의 2008년도 발표에서는 MIMO 방식의 기반 하에 그룹 직교 주파수 다이버시티(Group-Orthogonal Frequency Diversity)와 STC(Space-Time Coding) 기법을 결합하여 다이버시티를 이용한 방법을 제안하였고, Zhou Chen의 1명의 2008년도 발표에서는 하드웨어 복잡도를 줄이기 위해 TAS(Transmit Antenna Selection) 기법을 도입하여 SNR(Signal to Noise Ratio)의 성능 향상을 제안하였다[3][4]. 그리고 Fei Peng의 2명의 2008년도 학회 발표에서는 CSI(Channel State Information)와 응용 계층에서 요구되는 MAC 계층의 성능을 기반으로 MCS(Modulation and Coding Scheme)에 따른 AMC(Adaptive Modulation and Coding)의 적용 방법을 제안하였고, Huaning Niu의 1명의 2006년도 발표에서는 CSI를 기반으로 채널 용량을 증대시키기 위한 SM(Spatial Multiplexing) 기법과 BER(Bit Error Rate) 성능을 줄이기 위한 다이버시티 기법을 적절하게 활용함으로써 효율성을 증대시킨 결과도 소개되고 있다[5][6]. MAC 계층에서 발표된 연구 결과를 보면 Byung Soo Kim의 2명이 2008년도 발표한 프레임 간의 Aggregation 기법인 MPDU(MAC Protocol Data Unit)와 MSDU(MAC Service Data Unit)을 통해 시스템 처리량을 높일 수 있다는 내용과 Ginzburg, B의 1명의 2007년도 발표한 MPDU와 MSDU의 효율적인 결합을 통해 시스템 처리량을 높일 수 있다는 내용도 소개되고 있다[7][8]. 또한, Yaw-Wen Kuo의 1명이 2007년도에 발표한 멀티 트래픽 기반 하에 A-MPDU(Aggregation-MPDU)와 A-MSDU(Aggregation-MSDU) 각각에 대한 성능 분석의 내용도 소개되고 있다[9].

하지만 기존의 연구는 MAC 계층과 PHY 계층에 각각 국한하여 연구 결과가 도출됨으로서 MAC과 PHY의 연동으로 동작하는 WLAN 시스템의 성능을 정확하게 분석할 수 없는 문제점이 있다. 그래서 본 논문에서는 MAC 계층과 PHY 계층에 각각 국한하여 분석된 기존의 연구 결과에 대한 문제점을 근거삼아 IEEE 802.11n 시스템의 성능 분석을 MAC 계층과 PHY 계층

의 연동을 고려하여 수행한다. 또한, IEEE 802.11n 시스템을 위한 기존 연구 결과에서 볼 수 없었던 PHY 계층에서의 WLAN MIMO TGn 채널 모델을 SVD (Singular Value Decomposition)하여 얻은 각 안테나에 대응하는 Instance SNR을 기반으로 MAC 계층에서는 멀티 서비스 기반의 A-MPDU와 A-MSDU 각각에 대한 성능을 분석한다. 이것은 WLAN MIMO TGn 채널을 멀티 서비스 기반의 A-MPDU와 A-MSDU 기법과 연동하여 처리량 분석을 수행하므로 [9]의 논문과는 차이가 있음을 언급한다.

IEEE 802.11n 시스템을 위한 시뮬레이션 구성은 IEEE 802.11e MAC 계층에서의 EDCA(Enhanced Distribution Channel Standard)의 기반 하에 다중 서비스를 고려한 A-MPDU 및 A-MSDU 방식을 기본으로 하고, PHY 계층에서는 WLAN MIMO TGn 채널 모델에 SVD-MIMO 기법을 적용하여 분석하였다. 2장에서는 IEEE 802.11n 시스템의 MAC 계층과 PHY 계층의 구성에 관해 소개하고, 3장에서는 멀티 서비스 기반의 A-MPDU와 A-MSDU 기법 및 WLAN MIMO TGn 채널 모델을 가지고 MIMO 시스템의 분석을 위해 적용한 SVD 기법에 대해 소개한다. 4.5장에서는 $N_s=2$ 에서 MAC 계층과 PHY 계층의 연동 시 시스템 순서도에 관해 소개하고, 시뮬레이션 결과 분석과 함께 결론을 맺는다.

II. IEEE 802.11n 시스템

차세대 WLAN의 표준으로 논의되고 있는 IEEE 802.11n 시스템은 PHY 계층에서 130Mbps 이상의 데이터 전송속도와 MAC 계층의 SAP(Service Access Point)에서 100Mbps이상의 처리량을 요구하고 있다. 본 장에서는 IEEE 802.11n 시스템의 구성을 이루는 MAC 계층과 PHY 계층에서 본 연구에서 이용한 MAC 계층에서의 EDCA 기반의 A-MPDU 및 A-MSDU 방식과 PHY 계층에서의 기본 구성 및 전송 방법과 WLAN MIMO TGn 채널에 대해 소개한다.

1. IEEE 802.11n 시스템의 MAC 계층

IEEE 802.11n MAC 계층은 IEEE 802.11e EDCA 기반 하에 기본적으로 A-MPDU, A-MSDU 기법을 사용한다. EDCA 방식은 STA(Station) 간에 멀티미디어 데이터 통신을 할 때 패킷 간의 충돌을 피하는 것을 목표로 하는 DCF(Distributed Coordination Function) 방식에 기반 하여 QoS 보장을 위해 특정 트래픽의 종류에 대해 우선순위를 제공한다. 우선순위 제공 방법은 패킷이 MAC 계층에 도달하기 전에 IP 패킷 헤더에 있는 ToS(Type of Service) 필드의 값을 이용하여 AC (Access Category) 별로 멀티미디어 트래픽의 우선순위를 구분한다. [표 1]은 EDCA 기반에서 AC 별로 우선순위를 나타낸다[10].

표 1. EDCA 구조에서 AC별 우선순위

Priority	AC	Designation
1	AC_BK	Background
2	AC_BK	Background
0	AC_BE	Best Effort
3	AC_BE	Best Effort
4	AC_VI	Video
5	AC_VI	Video
6	AC_VO	Voice
7	AC_VO	Voice

[표 1]과 같이 음성 트래픽을 최우선 큐로 대응시키고, 비디오 트래픽을 다음 우선순위 큐로 대응시킨다. 그 밖의 트래픽은 최선형 큐로 대응시킨다. 멀티미디어 트래픽이 각각의 트래픽 특성에 따른 우선순위가 구분이 되면 각각의 전송 큐로 전송된다. 각각의 전송 큐로 전송된 트래픽은 송신되기 전에 AC 별로 가상 충돌 처리기에서 우선순위를 비교하고 MAC으로 넘어오게 된다.

위에서 언급한 IEEE 802.11e의 EDCA 기반에 IEEE 802.11n MAC 계층은 기존 방식에 비해 전송 오버헤드를 줄임으로써 보다 높은 처리율을 얻는 방향으로 Aggregation 기법이 표준화로 진행되고 있다. [그림 1]은 IEEE 802.11n에서 Aggregation이 수행되는 계층을 나타낸다.

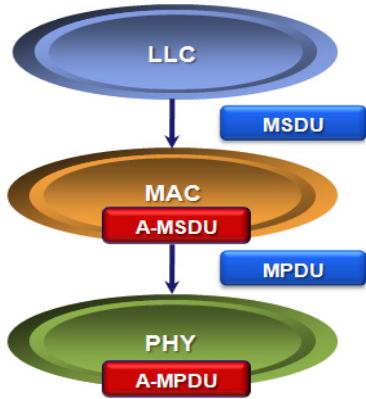


그림 1. WLAN Aggregation Interface

[그림 1]과 같이 WLAN에서는 2가지 Aggregation 기법을 제공하는데 LLC(Logical Link Control)에서 데이터를 받아 MAC계층에서 Aggregation 및 MAC 헤더와 FCS(Frame Check Control)가 추가되어 PHY계층으로 보내지는 A-MSDU 기법과 MAC 계층에서 데이터를 받아 PHY 계층에서 Aggregation 및 PHY 헤더와 FCS가 추가되어 전송되는 A-MPDU 기법이 있다. 최대의 처리량을 보이기 위해 2가지 Aggregation이 연동되어 수행되는 것이 이상적이지만 AP(Access Point)의 가격이 증가하기에 각각의 Aggregation 기법에 대해 분석한다. [그림 2]는 A-MSDU 기법의 패킷 양식 및 전송절차에 대해 나타낸다.

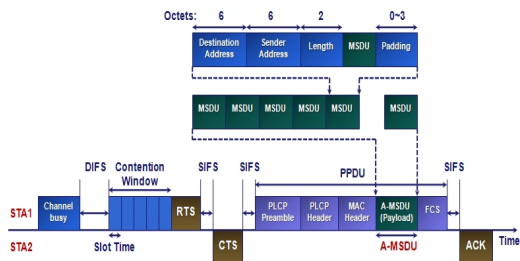


그림 2. A-MSDU 포맷 및 전송 절차

A-MSDU를 구성하는 각 MSDU는 DA(Destination Address), SA(Source Address), length의 3가지 필드 값을 갖는다. 또한, 각각의 MSDU는 동일한 destination

및 TID(Traffic Identifier)를 갖기에 따로 MAC 헤더를 가질 필요가 없어 오버헤드를 줄일 수 있는 효과가 있는데, 이것을 MAC Header Compression이라 한다. [그림 3]은 A-MPDU 기법의 패킷 양식 및 전송절차에 대해 나타낸다.

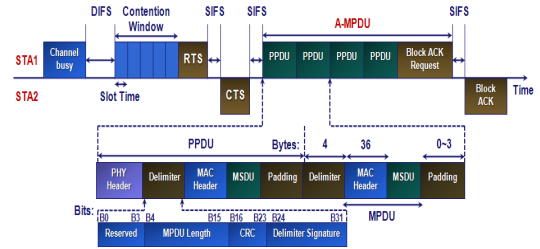


그림 3. A-MPDU 포맷 및 전송 절차

A-MPDU를 구성하는 MPDU는 동일한 destination 을 갖지만 Delimiter를 기준으로 Voice, Video, Data, Application과 같은 서로 다른 TID를 가질 수가 있어 각 MPDU는 MAC 헤더를 따로 가져야 한다. 동일한 데이터를 Aggregation하여 전송한다면 A-MSDU의 성능이 좋지만 Voice와 같은 서로 다른 TID를 가진 MPDU를 Aggregation하여 전송함으로써 처리량을 더욱 증대시킬 수 있다[11].

본 연구에서는 EDCA 전송 절차 및 데이터 전송 방식을 기반으로 A-MPDU 및 A-MSDU 방법을 적용한다.

2. IEEE 802.11n 시스템의 PHY 계층

IEEE 802.11n PHY 계층은 OFDM(Orthogonal Division Multiple Access) 기반에 MIMO를 적용하여 130Mbps 이상의 데이터 전송속도 증가를 목표로 하고 있다. 본 절에서는 TGn 그룹에서 제안한 IEEE 802.11n PHY 계층의 기본 구성 요소와 WLAN MIMO TGn 채널에 대해서 소개한다. IEEE 802.11n PHY 계층의 기본 변조 방식은 BPSK부터 64-QAM까지 지원 가능하고, 채널 코드율은 1/2부터 5/6까지 지원 가능하다. 채널 대역폭은 20MHz, 송신 안테나의 개수와 Spatial Stream 은 2개를 의무사항으로 정하고 있고, [표 2]를 기반으로

데이터 서브캐리어의 수를 52개, 파일럿 서브 캐리어의 수를 4개를 의무적으로 정하고 있다. 또한, 채널 대역폭을 40MHz, 송신 안테나의 개수와 Spatial Stream은 3개 이상, 데이터 서브캐리어의 수를 114개, 파일럿 서브 캐리어의 수를 6개 까지 선택 사항으로 정하고 있다. 송신 안테나의 개수가 2가 넘어가는 경우 STC 기법의 적용도 선택 사항으로 정하고 있다. [표 2]는 TGn에서 제안한 IEEE 802.11n PHY 계층의 채널 및 변조 파라미터를 나타낸다[12].

표 2. IEEE 802.11n PHY 계층 구성도

Channel (MHz)	Spatial Streams	Modulation	Coded bits Subcarrier	Code Rate
20,40	1,2,3,4	BPSK	1	1/2
20,40	1,2,3,4	BPSK	1	3/4
20,40	1,2,3,4	QPSK	2	1/2
20,40	1,2,3,4	QPSK	2	3/4
20,40	1,2,3,4	16-QAM	4	1/2
20,40	1,2,3,4	16-QAM	4	3/4
20,40	1,2,3,4	64-QAM	6	2/3
20,40	1,2,3,4	64-QAM	6	3/4
20,40	1,2,3,4	64-QAM	6	5/6

다음으로, WLAN MIMO TGn 채널 모델은 Saleh와 Valenzuela에 의해 제안된 클러스터 기반의 광대역 MIMO 무선 채널 모델로서 2GHz 및 5GHz의 실내용 WLAN 시스템 개발에 사용한다. 이 모델은 SISO 및 MIMO 채널의 협대역 Path Loss 및 광대역 특성을 규정하며, 실내 전파 환경을 6가지로 구분하여 A~F까지의 모델을 제공하면서 각 모델에 따라 2~6까지의 클러스터 환경을 제공한다.

송신 안테나의 개수가 N_T 이고, 수신 안테나의 개수가 N_R 인 경우 각 탭에서의 TGn 채널 행렬 ($H \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$)은 LOS(직접파) 성분과 NLOS(간접파) 성분인 레일리 채널 행렬로 분해 가능하며 다음 식(1)과 같다.

$$H = \sqrt{P} \left[\sqrt{\frac{K}{K+1}} H_f + \sqrt{\frac{1}{K+1}} H_v \right] \quad (1)$$

K는 Ricean K-factor이고, P는 각 Delay Tap에 해당하는 전력 성분이다. H_f 는 LOS 성분을 나타내는 행

렬이고, H_v 는 평균이 0(Zero-mean), 단일 분산(Unit Variance), 복소 가우시안 랜덤 변수(Complex Gaussian Random Variable)를 성분으로 갖는 Rayleigh 행렬이다. 또한, H_v 는 다음 식(2)과 같다.

$$H_v = R_r^{1/2} H_{iid} R_t^{1/2} \quad (2)$$

R_r 과 R_t 는 각각 송, 수신 상관 행렬(Correlated Matrix)이다. 그리고 H_{iid} 는 독립적인 평균이 0, 단일 분산, 복소 가우시안 랜덤 변수를 성분으로 갖는 행렬이다. 상관 행렬은 Azimuth Spread의 PAS (Power Angular Spectrum)에 기반 하여 더 큰 Azimuth Spread에서는 더 작은 상관 행렬을 갖는다[13].

본 연구에서는 PHY 계층에 2개의 클러스터 환경과 9개의 Delay Tap을 고려한 TGn 채널 B 모델을 선택하여 적용한다.

III. Frame Aggregation 및 SVD-MIMO 기법을 적용한 IEEE 802.11n 시스템 분석

앞에서 언급한 것처럼 IEEE 802.11n에 대한 기존의 연구는 MAC 계층과 PHY 계층에 각각에 국한하여 연구 결과가 도출됨으로서 MAC 계층과 PHY 계층이 연동으로 동작하는 WLAN 시스템의 성능을 정확하게 분석할 수 없는 문제점이 있다. 그래서 본 절에서는 기존의 연구 결과에 대한 문제점을 근거삼아 IEEE 802.11n 시스템의 성능 분석을 MAC 계층과 PHY 계층의 연동을 고려하여 수행한다. 또한, 동일 데이터를 Aggregation하여 더 나은 처리량을 보인 기존의 연구를 문제 삼아 2개 이상의 서로 다른 TID를 갖는 데이터를 Aggregation 수행 시 A-MPDU 및 A-MSDU 구조와 그에 대한 처리량 분석 방법에 대해 소개한다.

1. 멀티서비스 지원을 위한 Frame aggregation 기법 적용

멀티 서비스 지원을 위한 A-MPDU 및 A-MSDU의 구조와 전송 절차, 그리고 처리량 분석 방법에 대해 소개한다.

1.1 멀티 서비스 지원을 위한 A-MPDU 기술

본 논문에서는 하나의 AP와 다수의 STA를 포함하는 WLAN 상황을 가정한다. 또한, 하나의 STA는 하나의 Voice connection을 갖는다고 가정한다. 트래픽은 실시간 Voice 트래픽과 UDP 트래픽, 2가지를 고려한다. [그림 4]는 A-MPDU 기반 하의 다중 서비스인 Voice와 UDP 트래픽을 고려한 전송절차를 나타낸다.

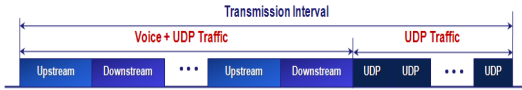


그림 4. 다중 서비스를 위한 Voice 및 UDP 트래픽 전송 절차

모든 트래픽이 Well-scheduled 된다는 가정 하에 Voice 트래픽을 위해 Upstream, Downstream, 2가지를 고려하고, Voice 트래픽을 전송 후 남은 여분의 시간에 UDP 트래픽 전송을 고려한다. [그림 5][그림 6]은 Voice 트래픽과 UDP 트래픽 전송 절차 및 패킷 양식을 나타낸다.

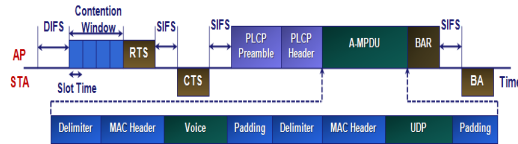


그림 5. Voice 트래픽을 고려한 A-MPDU 전송 절차

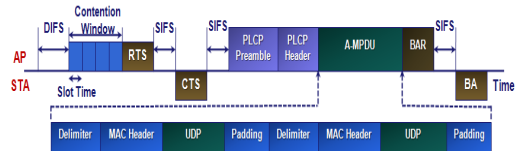


그림 6. UDP 트래픽을 고려한 A-MPDU 전송 절차

앞에서 언급했듯이 A-MPDU는 서로 다른 TID를 Aggregation 할 수 있기 때문에 Voice 트래픽을 전송

할 때도 UDP 트래픽과 Aggregation하여 전송 가능하다. 이를 근거로 Voice 트래픽과 UDP 트래픽 전송 시 패킷 크기는 식(3)과 같다.

$$PSDU_{Mixed} = (MAC_{Header} + D + P_{Voice}) + N_{Aggr} (MAC_{Header} + D + P_{UDP}) \quad (3)$$

$$PSDU_{UDP} = N_{Aggr} (MAC_{Header} + D + P_{UDP})$$

$PSDU_{Mixed}$ 는 Voice와 UDP 트래픽이 Aggregation된 패킷이고, $PSDU_{UDP}$ 는 UDP 트래픽만 Aggregation된 패킷이다. 또한, MAC_{Header} 는 TID 정보를 담고 있는 MAC 헤더이고, D 는 MPDU를 구분하는 Delimiter이다. P_{Voice} 와 P_{UDP} 는 각각 Voice와 UDP에 해당하는 패킷이며 N_{Aggr} 은 UDP에 Aggregation되는 개수이다. 이것을 기반으로 각각의 PSDU의 전송시간은 식(4)과 같다.

$$T_{PSDU} = T_{AIFS} + \frac{CW_{min}}{2} T_{slot} + 3T_{SIFS} + T_{RTS} + T_{CTS} + \frac{PSDU_{size}}{PHY_{rate}} + T_{BA} \quad (4)$$

T_{AIFS} 인 AIFS(Arbitrary Inter Frame Space) 기간 동안 채널이 IDLE하다는 것을 감지하면 T_{slot} 의 슬롯 시간을 CW_{min} 에 해당하는 Back-off 알고리즘 수행하여 패킷 전송을 위한 준비를 마친다. 또한, T_{RTS} 인 RTS(Request to send)와 CTS(Clear to send)를 주고 받음으로 주변 스테이션에게 서로 간의 통신을 알리게 되고, 그 후 PHY_{rate} 에 해당하는 데이터 전송률로 Aggregation된 PSDU를 전송 후 T_{BA} 인 Block Ack를 받게 되면 통신을 완료하게 된다. 각 패킷의 전송 시간과 Voice connection의 개수를 기반으로 UDP 트래픽 전송 횟수는 다음 식(5)과 같다.

$$N_{PSDU-UDP} = \frac{T_{Transmission} - 2N_{Voice} T_{PSDU-Mixed}}{T_{PSDU-UDP}} \quad (5)$$

$T_{Transmission}$ 의 구간 동안 N_{Voice} 에 해당하는 Voice connection수에 따라 UDP 트래픽 전송 횟수가 결정된

다. 식(3),(4),(5)를 기반으로 Voice 및 UDP 트래픽 기반의 A-MPDU의 처리량을 구하는 과정은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max Throughput}_{A-MPDU} \\
 &= \frac{8(2N_{Voice}(P_{UDP} + N_{Aggr}P_{Voice}) + N_{PSDU-UDP}N_{Aggr}P_{UDP})}{T_{Transmission}} \text{ (bps)}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

1.2 멀티 서비스 지원을 위한 A-MSDU 기법

A-MPDU와 동일한 상황 하에 다중 서비스 지원을 위한 A-MSDU의 전송절차는 [그림 7]과 같다.

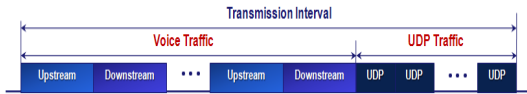


그림 7. 다중 서비스를 위한 A-MSDU 전송 절차

모든 트래픽이 Well-scheduled 된다는 가정 하에 A-MSDU는 동일한 TID를 Aggregation 할 수 있기 때문에 Voice 트래픽을 전송할 때는 UDP 트래픽과 Aggregation하여 전송 불가능하다. 때문에 UDP 트래픽만 Aggregation하여 전송 가능하다. [그림 8][그림 9]는 Voice 트래픽과 UDP 트래픽 전송 절차 및 패킷 양식을 나타낸다.

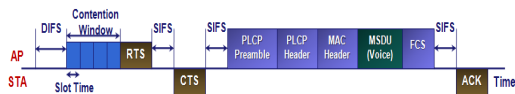


그림 8. Voice 트래픽을 고려한 A-MSDU 전송 절차

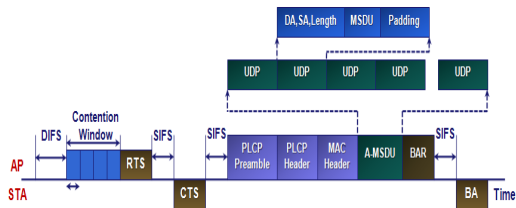


그림 9. UDP 트래픽을 고려한 A-MSDU 전송 절차

[그림 8][그림 9]를 근거로 Voice 트래픽과 UDP 트래픽 전송 시 패킷 크기는 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 PSDU_{Mixed} &= MAC_{Header} + P_{Voice} \\
 PSDU_{UDP} &= MAC_{Header} + N_{Aggr}(MSDU_{Header} + P_{UDP})
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$PSDU_{Voice}$ 는 Voice 트래픽에 해당하는 패킷이고, $PSDU_{UDP}$ 는 UDP 트래픽만 Aggregation된 패킷이다. 또한, MAC_{Header} 는 TID 정보를 담고 있는 MAC 헤더이고, $MSDU_{Header}$ 는 각각의 MSDU에 관련된 헤더이다. P_{Voice} 와 P_{UDP} 는 Voice와 UDP에 해당하는 패킷이며 N_{Aggr} 은 UDP에 Aggregation되는 개수이다. 식(4),(5),(7)를 기반으로 Voice 및 UDP 트래픽 기반의 A-MSDU의 처리량을 구하는 과정은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max Throughput}_{A-MSDU} \\
 &= \frac{8(2N_{Voice}P_{Voice} + N_{PSDU-UDP}N_{Aggr}P_{UDP})}{T_{Transmission}} \text{ (bps)}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

2. TGn 채널을 이용한 SVD-MIMO 기법 적용

채널이 시 불변 특성을 갖고 있어서 어느 정도 결정적(Deterministic)이라고 하면, SVD기법을 통해 MIMO 채널을 병렬의 SISO 가우시안 서브 채널로 근사 할 수가 있다.

MIMO 시스템이 송신 안테나의 개수가 M_T 이고, 수신 안테나의 개수가 M_R 로 구성된다고 가정한다. 만약 입력 신호가 x 이고, MIMO 채널의 채널 계수 행렬은 H , AWGN(Additive White Gaussian Noise)이 n 이라면 수신 신호는 다음 식(9)과 같다.

$$\begin{aligned}
 y &= Hx + n \\
 \text{where } x &\in C^{M_T}, H \in C^{M_R \times M_T}, n \in C^{M_R}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

n 은 평균이 0이고 분산이 동일한 복소 가우시안 잡음이다. 또한, 복소 가우시안 잡음이기때 독립적인 실수부

와 허수부를 원소로 갖는다.

MIMO 채널의 정보를 송, 수신부에서 모두 알고 있다고 가정하면 채널 계수 행렬 H 를 SVD하여 다음 식 (10)과 같이 3개의 행렬로 분해할 수 있다.

$$SVD(H) = U \sum V^H$$

where $U \in C^{M_R \times M_R}, V \in C^{M_T \times M_T}, \sum \in C^{M_R \times M_T}$ (10)

U 와 V 행렬은 단일 행렬(Unitary Matrix)이고, \sum 는 특이치 값(Singular Value)을 오름차순으로 갖는 대각 행렬(Diagonal Matrix)이다. V^H 는 V 의 복소 전치 행렬(Complex Conjugate Transpose Matrix)이다. λ 는 특이치 값으로 0보다 큰 실수 값을 갖는다. SVD의 분석을 위해서 채널 계수 행렬 H 를 독립적인 직교 고유모드(Orthogonal Eigen-modes)로 분해할 수 있다. [그림 10]은 SVD를 이용하여 MIMO 채널 분해 방법에 대해 나타낸다.

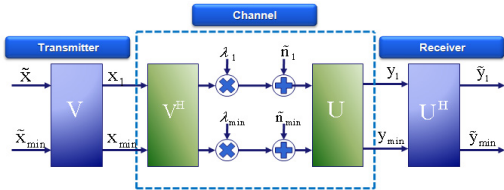


그림 10. SVD 이용한 MIMO 채널 분해 기법

[그림 10]과 같이 입력 신호 벡터는 MIMO 채널에서 SVD 기법을 이용하여 독립적인 SISO 가우시안 서브 채널로 근사 할 수 있고, 각 서브 채널은 특이치 값 λ 에 의해서만 영향을 받는다는 것이다. 위의 내용을 정리하면 다음 식(11)과 같다.

$$\tilde{y} = \sum_{i=0}^{M_{\min}} \lambda_i \tilde{x}_i + \tilde{n}_i$$

where $M_{\min} = \min(M_T, M_R)$ (11)

MIMO 채널이 고유모드로 인해 가우시안 서브 채널로 근사됨으로서 다중 스트림의 공간 다중화를 지원할

수 있게 된다. MIMO 채널에서 SVD 기법을 적용하여 가우시안 서브 채널로 근사 되었을 때 각 서브 채널에 동일한 전력이 할당된다면 채널 용량을 구하는 과정은 다음 식(12)과 같다.

$$C(H) = \sum_{i=0}^{M_{\min}} \log_2(1 + SNR_i) = \sum_{i=0}^{M_{\min}} \log_2(1 + \frac{P_i}{kN_0} \lambda_i^2) \text{ (bits/Hz)}$$

where $M_{\min} = \min(M_T, M_R), \sum_{i=0}^{M_T} P_i = P_T, k = M_T$ (12)

P_i 는 각각의 송신 안테나에 할당되는 전력이고, P_T 는 송신부에서 공급할 수 있는 최대 전력의 한계이다. 또한, N_0 는 잡음 전력이고, λ_i^2 는 SVD 기법을 통해 얻은 특이치 값의 제곱이다. 위 식에 근거하여 SNR을 구하는 과정은 다음 식(13)과 같다.

$$SNR_i = \frac{P_i \lambda_i^2}{M_T N_0}, \text{ where } \sum_{i=0}^{M_T} P_i = P_T \text{ (13)}$$

실제로 SNR을 결정하는 요인은 P_i, N_0, M_T 이고, λ_i^2 은 SNR의 Fluctuation을 결정하는 요인이라는 것을 알 수 있다[14].

IV. 시뮬레이션 분석

IEEE 802.11n 시스템을 위한 MIMO의 적용을 Ns-2를 이용하여 성능 분석한다. [그림 11]은 Ns-2 시뮬레이션 구조도이다.

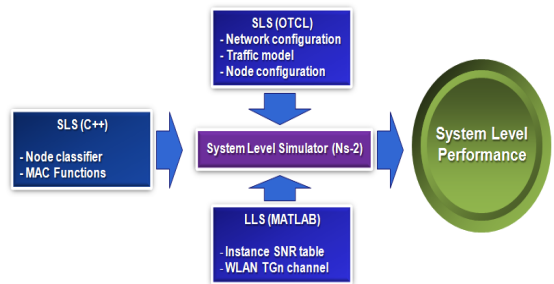


그림 11. Ns-2 시뮬레이션 구조

MAC 계층은 데이터 포맷을 비롯하여 Ns-2에 직접 구현하고, PHY 계층은 WLAN MIMO TGn 채널을 이용하여 SVD를 적용하여 구한 Instance SNR을 사용한다. 이것을 기반으로 MAC 계층에서 다중 서비스를 지원하는 A-MPDU 및 A-MSDU 기법을 기반으로 PHY 계층과의 연동을 고려한 시뮬레이션 파라미터 선정과 정과 순서도에 대해 소개한다.

1. Ns-2 시뮬레이션 파라미터 및 순서도

패킷 크기를 비롯하여 Ns-2 시뮬레이션을 위한 파라미터 선정은 [표 3]과 같다.

표 3. Ns-2 파라미터

Parameter	Value
AIFS	34 us
SIFS	16 us
Slot time	9 us
Payload size of MSDU (UDP)	100~500 bytes
Payload size of MSDU (Voice)	80 bytes
Payload size of BAR	22 bytes
Payload size of BA	56 bytes
Number of Voice connection	1 ~ 10
HT MAC Header	36 bytes
Transmission Period	20 ms
Number of Aggregation	30
Physical Layer Basic Data Rate	54 Mbps
MIMO	2, 4

하나의 안테나에서 패킷 전송 시 데이터 전송률은 54Mbps로 설정하고, MSDU(UDP)의 크기는 100부터 500bytes를 고려한다. 또한, Aggregation되는 MSDU (Voice)의 크기는 80bytes로 고정하고, Voice에 연결되는 STA의 개수는 1부터 10개까지 고려한다. 그리고 동일한 트래픽이 발생하는 주기는 20ms로 설정하여 이 값을 기준으로 Voice 트래픽과 UDP 트래픽이 발생한다. 마지막으로 WLAN MIMO TGn 채널과의 연동을 고려하여 송, 수신 안테나의 개수는 2개인 경우와 4개인 경우를 고려한다.

또한, Ns-2 환경 하에 IEEE 802.11n 시스템 구현을 위하여 MIMO 방식을 지원하는 MAC 계층의 동작 순서도는 [그림 11]과 같다. 2개 이상의 패킷이 전송될 때 각 패킷의 우선 MIMO 타입을 고려 후 지연된 TGn 채널

정보를 기반으로 MCS 레벨을 선정하여 MCS 정보를 하나의 패킷에 모두 담아서 PHY 계층으로 보내준다. PHY 계층에서는 각 패킷의 MCS 레벨과 현재 TGn 채널의 SNR을 기반으로 패킷의 수신여부를 판단하게 된다. MAC 계층에서는 단위 시간 당 수신된 패킷을 기준으로 처리량을 측정한다. [그림 12]는 MIMO 시스템을 위한 MAC 계층 동작 절차를 나타낸다.

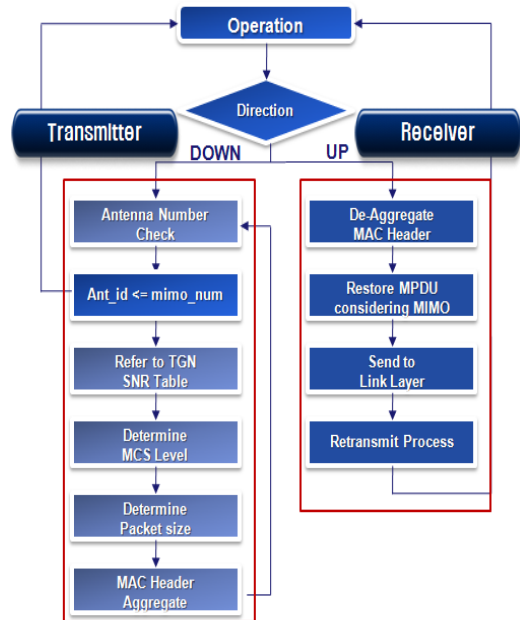


그림 12. MIMO 시스템을 위한 MAC 계층 동작 절차

2. TGn 채널 파라미터 및 MCS 레벨 선정

채널 모델은 9개의 Delay Tap을 고려한 B 모델과 18개의 Delay Tap과 형광등에 의한 반사 효과까지 고려한 E 모델을 선택한다. 캐리어 주파수는 IEEE 802.11n의 표준에서 선정된 5.29GHz를 선택하고, MIMO 시스템을 고려하여 송, 수신 안테나의 개수는 2개인 경우와 4개인 경우를 고려한다. 또한, TGn 채널 모델은 단말의 이동성을 고려하지 않고 주변 물체의 이동성에 대한 효과를 고려하므로 주변 물체의 이동성을 각각 1.2km/h와 40km/h를 고려한다.

본 연구에서 이용한 TGn 채널 파라미터의 설정은

다음 [표 4]와 같다.

표 4. TGn 채널 모델 파라미터

Parameter	Value
Carrier Frequency	5.29GHz
Power Line Frequency	50Hz
Number of Tx Antennas	2 / 4
Tx Spacing	1
Number of Rx Antennas	2 / 4
Rx Spacing	0.5
IEEE_802_11_Cases	B
Correlation Coefficient Type	Complex
Sampling Rate	1000Hz
Down Sampling Factor	1

PHY 계층의 설계를 위해 수신부에서 SNR 참조 시 사용하는 MCS 레벨의 선정은 WLAN MIMO TGn 채널 문서에 나와 있는 AWGN 환경 아래 PER-SNR curve를 이용한다. 여기서는 20MHz와 40MHz의 대역폭에서 각 안테나 별로 동일한 변조 방식을 지원할 때 MCS 레벨을 0 ~ 31까지 구분하고 있다. 이것을 기반으로 본 연구에서는 20MHz의 대역폭에서 2,4 streams에 대한 PER-SNR curve를 이용하여 MCS 레벨 테이블을 정리하면 다음 [표 5][표 6]과 같다[15].

표 5. MCS 테이블 (MIMO : 2X2, 대역폭 : 20MHz)

MCS Index	Modulation	Code Rate	Data Rate	SNR
	1,2 stream			
8	BPSK	1/2	13.0	0~1.3
9	QPSK	1/2	26.0	1.3~4.6
10	QPSK	3/4	39.0	4.6~6.5
11	16QAM	1/2	52.0	6.5~11.01
12	16QAM	3/4	78.0	11.0~14.1
13	64QAM	2/3	104.0	14.1~17.5
14	64QAM	3/4	117.0	17.5~19.1
15	64QAM	5/6	130.0	19.1~21.0

표 6. MCS 테이블 (MIMO : 4X4, 대역폭 : 20MHz)

MCS Index	Modulation	Code Rate	Data Rate	SNR
	1,2,3,4 stream			
24	BPSK	1/2	26.0	0~1.3
25	QPSK	1/2	52.0	1.3~4.6
26	QPSK	3/4	78.0	4.6~6.5
27	16QAM	1/2	104.0	6.5~11.01
28	16QAM	3/4	156.0	11.0~14.1
29	64QAM	2/3	208.0	14.1~17.5
30	64QAM	3/4	234.0	17.5~19.1
31	64QAM	5/6	260.0	19.1~21.0

송. 수신 안테나의 개수가 2와 4인 경우 각 안테나 별로 변조 타입과 채널 코딩율에 따른 데이터 전송속도와 MCS 레벨의 SNR의 범위를 나타내고 있다. 여기서 MCS 레벨의 기준이 되는 SNR의 범위는 PER ≥ 0.01 일 때를 기준으로 한다.

앞에서 언급했던 것처럼 $N_s=2$ 는 패킷 기반의 시뮬레이터에 IEEE 802.11n 시스템 환경을 고려하여 PHY 계층에서 구한 SNR과 MAC계층에서 내려오는 패킷 간의 매핑 시 고려해야 할 파라미터에 대해서 언급한다. 우선, TGn 채널에서 채널의 동기시간은 다음 식(14)과 같다[16].

$$T_c = \frac{\sqrt{A} \ln(2)}{2\pi f_d}, \text{ where } f_d = \frac{v_0}{\lambda} \quad (14)$$

여기서 A 는 TGn 채널에서의 Delay Tap의 개수이고, f_d 는 도플러 주파수(Doppler Frequency)이다. 또한, 도플러 주파수는 v_0 인 단말의 이동성과 λ 에 의해 정해진다. TGn 채널이 단말의 이동성을 고려하지 않으므로 $v_0=1.2\text{km/h}$ 정도라 하고, 캐리어 주파수를 5.29GHz라 한다면 TGn 채널의 동기시간은 [표 7]에 의해 다음과 같이 정해진다.

표 7. TGn 채널의 동기시간

Model	v_0	f_c	A	f_d	T_c
B	1.2km/h	5.29GHz	9	5.88 Hz	56.3 ms

동기 시간이 50ms 이상이 되는 것으로 분석된다. 이것은 50ms 이상의 시간 동안 채널의 변화가 없다는 것으로 굉장히 안정적이라는 의미이다. 만약, [표 5][표 6]의 MCS 테이블에서 보는 것과 같이 130Mbps의 데이터 전송속도로 1500bytes의 패킷을 전송한다고 하면 패킷 구간(Packet Duration)은 89us 정도가 된다. 이러한 상황을 종합해보면 TGn 채널에서 샘플링 구간(Sampling Rate)을 1KHz로 정해서 1ms마다 채널 계수 행렬을 만들어서 SNR을 구한다면 11개의 패킷마다 1개의 SNR을 적용해도 무리가 없다는 것으로 판단되어 이 방식을 시뮬레이션에 적용한다. 또한, IEEE 802.11n

시스템에서 Ack가 전송되어 송신부로 피드백 되는 시간은 8ms로 정한다.

3. 시뮬레이션 결과분석

MAC 계층과 PHY 계층의 연동을 고려하여 설정한 파라미터를 기반으로 Ns-2 시뮬레이션 결과에 대해 소개한다. 시뮬레이션 결과는 Voice와 UDP 트래픽을 고려한 A-MPDU 및 A-MSDU의 이상적인 최대 처리량과 TGn 채널 적용 시 송, 수신 안테나 개수에 의한 시스템의 처리량을 분석한다.

[그림 13][그림 4]는 송, 수신 안테나의 개수가 2와 4인 경우 Delay Tap을 9개 고려한 TGn 채널 B모델을 근거로 MSDU(UDP)크기가 100부터 500bytes를 고려하여 처리량을 분석한다. 또한, 여기서 Voice connection은 2개로 고정하고, 이상적인 채널의 경우와 비교하여 TGn 채널의 SNR은 20, 30dB를 고려한다.

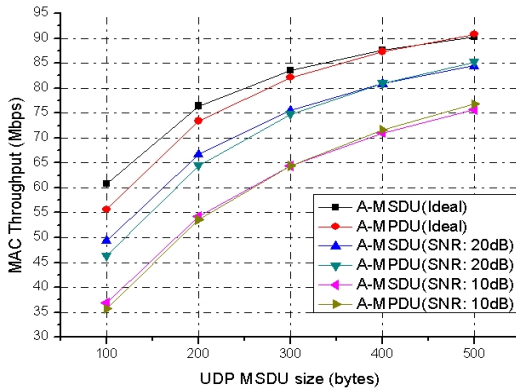


그림 13. MIMO(2*2)에서 UDP 크기에 따른 처리량 분석

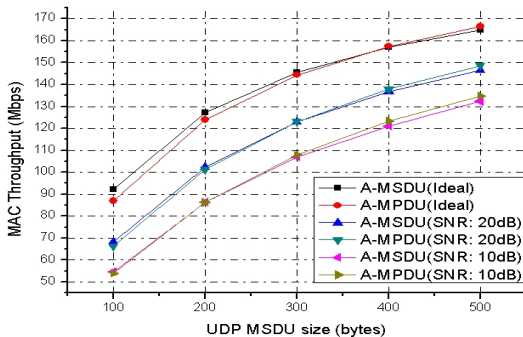


그림 14. MIMO(4*4)에서 UDP 크기에 따른 처리량 분석

MAC Header Compression에 의해 Voice connection의 수가 작고, UDP 크기가 작은 경우 A-MSDU가 A-MPDU 보다 더 나은 처리량을 나타내는 것으로 분석된다. 또한, UDP 크기가 커질수록 A-MPDU의 성능이 조금씩 좋아지는 것으로 분석된다. 이것은 MAC Header Compression의 효과는 데이터 크기가 작은 경우에만 효과가 있다는 것을 알 수 있다. 그리고, TGn 채널 적용 시 SNR이 20dB인 경우 최대 80Mbps 이상의 처리량을 보이고, SNR이 10dB인 경우 최대 70Mbps 이상의 처리량을 보인다. MIMO (4*4)인 경우도 동일한 결과를 보이고, 최대 처리량은 150Mbps이상이 되는 것으로 보였다.

[그림 15][그림 16]도 마찬가지로 송, 수신 안테나의 개수가 2와 4인 경우 TGn 채널 B모델을 근거로 하되 MSDU (UDP)크기가 200bytes인 경우 Voice connection의 수를 0부터 10개까지 고려하여 처리량을 분석한다. 또한, 여기서도 TGn 채널의 SNR은 20, 30dB를 고려한다.

Voice connection의 수가 증가할수록 A-MSDU의 처리량은 감소하는 것을 볼 수 있었고, Voice connection의 수가 4가 넘어가면서는 A-MPDU의 처리량이 더 좋은 것을 확인할 수 있었다. 이것은 A-MPDU는 서로 다른 TID를 가진 데이터를 하나의 패킷에 Aggregation할 수 있기에 Voice데이터는 부분적으로 사용되게 되고 결국 Voice connection에 관계없이 비슷한 처리량을 보이게 된다.

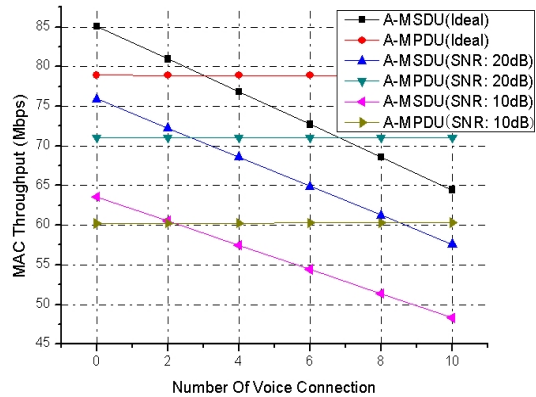


그림 15. MIMO(2*2)에서 Voice connection에 따른 처리량 분석

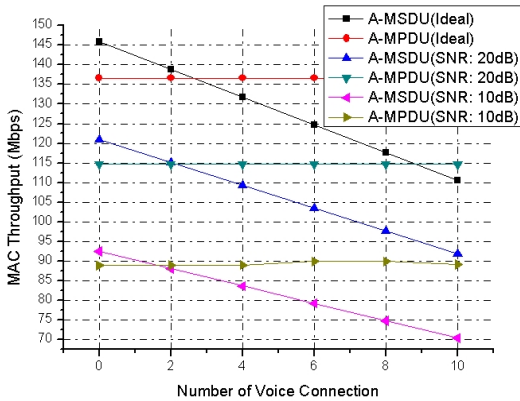


그림 16. MIMO(4*4)에서 Voice connection에 따른 처리량 분석

또한, TGn 채널 적용 시 MIMO(2*2)에서의 SNR이 20dB인 경우 Voice connection이 3을 기준으로 SNR이 10dB인 경우 2를 기준으로 A-MPDU의 성능이 좋아지는 것으로 분석된다. 그리고 MIMO(4*4)에서의 SNR이 10,20dB인 경우 Voice connection이 2일 때 A-MPDU의 성능이 좋아지는 것으로 분석된다.

V. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.11n 시스템에서의 성능 분석을 위해 PHY 계층에서는 MIMO 시스템을 고려하여 WLAN MIMO TGn 채널 모델을 가지고 수행한 SVD 기법 기반 하에 멀티 서비스를 지원하는 A-MPDU 및 A-MSDU의 성능을 분석하였다. 또한, 이를 기반으로 공신력 있는 $N_s=2$ 를 이용하여 MAC 계층과 PHY 계층의 연동된 시스템을 분석하였다.

분석된 연구 결과, MAC 계층에서의 멀티 서비스를 고려한 A-MPDU 및 A-MSDU의 처리량 성능은 MAC Header Compression 기법에 의해 Voice connection이 작고 패킷 사이즈가 작은 경우는 A-MSDU의 성능이 좋았지만 Voice connection의 수가 증가하고, 패킷 사이즈가 커지면 서로 다른 TID를 Aggregation할 수 있는 A-MPDU의 성능이 좋은 것을 확인할 수 있었다. 이것은 일반적으로 다양한 데이터를 전송하는 통신 시스

템에서 A-MPDU의 성능이 더 좋음을 의미한다. 또한, TGn 채널을 적용하여 SNR이 20dB인 경우 MIMO(4*4)에서 최대 160Mbps이상의 처리량 결과를 얻을 수 있었고, SNR이 10dB인 경우 최대 130Mbps 이상의 처리량 결과를 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 송경희, 최은경, 이석규, 방승찬, "IEEE 802.11n 차세대 무선랜 기술 동향", 한국통신학회, 제23권 제6호, pp.54-60, 2006(6).
- [2] 박성우, 정보통신부 전파방송정책국 전파이용제도과, "초고속 광대역 무선 서비스 활성화 방향", 전파특집-차세대 무선랜, 2005(1).
- [3] F. Riera-Palou and G. Femenias, "Improving STBC Performance in IEEE 802.11n Using Group-Orthogonal Frequency Diversity," Wireless Commu 2008, pp.193-198, 2008(4).
- [4] C. Zhou and H. Suzuki, "Performance of 802.11n WLAN with Transmit Antenna Selection in Measured Indoor Channels," Communication Theory Workshop 2008, pp.139-143, 2008(2).
- [5] P. Fei, Z. Jinyun, and W. E. Ryan, "Adaptive Modulation and Coding for IEEE 802.11n," Wireless Commu 2008, pp.655-661, 2007(3).
- [6] N. Huaning and N. Chiu, "Diversity and Multiplexing Switching in 802.11n MIMO Systems," Signals, Systems and Computers 2006, pp.1644-1648, 2006(10).
- [7] B. S. Kim, H. Y. Hwang, and D. K. Sung, "Effect of Frame Aggregation on the Throughput Performance of IEEE 802.11n," Wireless Commu 2008, pp.1740-1744, 2008(4).
- [8] B. Ginzburg, "Performance Analysis of

A-MPDU and A-MSDU Aggregation in IEEE 802.11n," Sarnoff Symposium 2007, pp.1-5, 2007(5).

[9] Y. W. Kuo, "Throughput Analysis for Wireless LAN with frame aggregation under mixed traffic", IEEE Region Conference 2007, pp.1-4, 2007(11).

[10] Y. S. Yoo, J. D. Huh, and Sensor Networking Application Team, ETRI "Priority based 802.11e EDCA Algorithm and Performance Evaluation for Multimedia Data Transfer", 제4회 정보통신 표준화 우수 논문집, pp.26-43, 2008(1).

[11] D. Skordoulis, N. Qiang, H. H. Chen, A. P. Stephens, L. Changwen, and A. Jamalipour, "IEEE 802.11n MAC frame aggregation mechanism for nextgeneration high-throughput WLANs," IEEE Wireless Commu, Vol.15, pp.40-47, 2008(2).

[12] J. Lorincz and D. Begusic, "Physical Layer Analysis of Emerging IEEE 802.11n WLAN Standard," Advanced Commu 2006, Vol.1, pp.186-194, 2006(2).

[13] 정현규, 이광천, "차세대 이동통신 무선 채널모델 연구동향", 전자통신 동향분석, 제21권, 제3호, pp.59-70, 2006(6).

[14] 이윤호, 김주석, 최진규, 김경석, "Ns-2 기반의 SVD-MIMO 방식을 적용한 IEEE 802.11n 시스템 분석", 한국멀티미디어학회, 제12권, 제8호, 2009(8).

[15] "Joint Proposal Team PHY Simulation Results," IEEE P802.11 Wireless LANs, 2006(1).

[16] IEEE 802.11n/D6.0 Draft Amendment - Part11:Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment 5 : Enhancements for Higher Throughput, 2008(7).

저 자 소 개

이 윤 호(Yun-Ho Lee)

준회원



- 2008년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2008년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전과공학과 석사과정

<관심분야> : WLAN

김 주 석(Joo-Seok Kim)

정회원



- 2007년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2009년 2월 : 충북대학교 전과공학과 석사
- 2009년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전과공학과 박사과정

<관심분야> : Cognitive Radio, WLAN, DFS

김 경 석(Kyung-Seok Kim)

정회원



- 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
- 1999년 1월 ~ 2002년 3월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임연구원
- 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전임강사
- 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 조교수

<관심분야> : 전파감시, SDR, CR, MIMO-OFDM, DSA, UWB