

Ns-2 기반의 SVD-MIMO 방식을 적용한 IEEE 802.11n 시스템 분석

이윤호[†], 김주석^{**}, 최진규^{***}, 김경석^{****}

요 약

최근 무선 인터넷 수요의 증가와 더불어 WLAN의 표준화 작업도 활발히 진행 중이다. IEEE 802.11e에서 통신 품질 보장과 함께 데이터 전송속도가 54Mbps 이상의 성능을 보이고 있지만 아직까지 사용자들의 요구에 부응하지 못하고 있는 것이 현실이다. IEEE 802.11e 다음 버전인 IEEE 802.11n의 연구 동향은 크게 두 가지로 MAC 계층에서 패킷 간의 Aggregation을 통하여 시스템 처리량을 높인 결과와 PHY 계층에서 MIMO 시스템을 적용하여 데이터 전송속도를 높인 결과로 정리될 수 있다. 그러나 아직까지 MAC 계층과 PHY 계층의 연동을 고려하여 IEEE 802.11n의 성능 분석을 보인 결과는 발표되지 않았다. 그래서 본 논문에서는 IEEE 802.11n 시스템에서 MAC 계층과 PHY 계층의 연동을 고려하여 성능을 분석한다. MAC 계층에서의 A-MPDU 기반 하에 PHY 계층에서 MIMO 방식을 적용한다. MIMO 방식은 실내용 WLAN MIMO TGn 채널 모델의 사용과 함께 SVD 기법을 적용하여 분석하였고, 결과적으로 기존의 방식에 비해 데이터 전송속도의 증가와 처리량이 향상되었음을 보인다. 또한, MAC과 PHY의 연동을 고려하여 현실성 있는 시뮬레이터인 Ns-2를 사용하기로 한다.

Analysis of IEEE 802.11n System adapting SVD-MIMO Method based on Ns(Network simulator)-2

Yun Ho Lee[†], Joo Seok Kim^{**}, Jin Kyu Choi^{***}, Kyung Seok Kim^{****}

ABSTRACT

WLAN(Wireless Local Area Network) standard is currently developing with increased wireless internet demand. Though existing IEEE 802.11e demonstrates that data rates exceed 54Mbps with assuring QoS(Quality of Service), wireless internet users can't be satisfied with real communication system. After IEEE 802.11e system, Study trends of IEEE 802.11n show two aspects, enhanced system throughput using aggregation among packets in MAC(Medium Access Control) layer, and better data rates adapting MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) in PHY(Physical) layer. But, no one demonstrates IEEE 802.11n system performance results considering MAC and PHY connection. Therefore, this paper adapts MIMO in PHY layer for IEEE 802.11n system based on A-MPDU(Aggregation-MAC Protocol Data Unit) method in MAC layer considering MAC and PHY connection. SVD(Singular Value Decomposition) method with WLAN MIMO TGn Channel is used to analyze MIMO. Consequently, Simulation results show enhanced throughput and data rates compared to existing system. Also, We use Ns-2(Network Simulator-2) considering MAC and PHY connection for reality.

Key words: SVD-MIMO(특이치 분해), WLAN MIMO TGn Channel(무선랜 채널), Ns-2(네트워크 시뮬레이터)

※ 교신저자(Corresponding Author) : 이윤호, 주소 : 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(361-763), 전화 : 043)268-3489, FAX : 043)271-4647, E-mail : paper9875@naver.com
접수일 : 2009년 3월 31일, 완료일 : 2009년 7월 30일

[†] 정회원, 충북대학교 전자공학과 석사과정

^{**} 준회원, 충북대학교 전자공학과 박사

(E-mail : kjs7205@naver.com)

^{***} 한국전자통신연구원 선임연구원

(E-mail : jkchoi@etri.re.kr)

^{****} 정회원, 충북대학교 전자정보대학 정보통신공학과 부교수

(E-mail : kseokkim@cbnu.ac.kr)

1. 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 망 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 모델과 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 802.11n의 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 발표

된 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].

하지만 기존의 연구는 MAC 계층과 PHY 계층에 각각에 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 계층의 연동을 고려하여 수행한다. 또한, PHY 계층에서 IEEE 802.11n 시스템을 위한 기존 연구 결과에서 제안하지 않는 SVD (Singular Value Decomposition) 기법을 WLAN MIMO TGN 채널 모델에 적용하는 과정을 제안한다. 이것은 Lebrun, G의 2명이 2004년도에 제안한 시공간에 따라 변하는 레일레이 채널 기반 하에 MIMO 시스템 분석을 위한 SVD 기법을 IEEE 802.11n 시

스텝 분석을 위해 WLAN MIMO TGn 채널 모델에 적용함으로 기존의 SVD 적용 방식과 차이가 있음을 언급한다[13].

IEEE 802.11n 시스템을 위한 시뮬레이션 구성은 IEEE 802.11e MAC 계층에서의 EDCA (Enhanced Distribution Channel Standard)의 기반 하에 A-MPDU 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 대해 소개하고, 3장에서는 적용한 WLAN MIMO TGn 가지고 MIMO 시스템의 분석을 위해 적용한 SVD 기법에 대해 소개한다. 4장에서는 Ns-2에서 MAC과 PHY의 연동 시 시스템 순서도에 대해 소개하고, 5, 6장에서는 시뮬레이션 결과 분석과 함께 결론을 맺는다.

2. 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 EDCA기반의 A-MPDU 기법과 PHY 계층에서의 기본 구성과 WLAN MIMO TGn 채널에 대해 소개한다.

2.1 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 1은 EDCA 기반에서 AC 별로 우선순위를 나타낸다.

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



그림 1. A-MPDU 전송방식

표 1과 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. 이러한 EDCA를 기반으로 A-MPDU 방식을 적용하면 다음 그림 1과 같다.

PHY는 PHY 계층의 오버헤드이고, MPDU는 데이터 프레임이다. 또한, BA(Block Ack)는 Aggregation된 MPDU들의 Ack을 블록화한 프레임이고, BAR(Block Ack Request) A-MPDU의 끝을 알리는 프레임이다. 결론적으로 A-MPDU 방식은 MPDU들을 Aggregation하여 불필요한 오버헤드인 SIFS(Shorter Inter Frame Space)와 Ack 프레임 전송을 방지하고, 높은 처리량을 얻고자 하는데 목적이 있는 것이다[9]. 본 연구에서는 EDCA 기반 하에 A-MPDU 기법을 적용하였다.

2.2 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. 표 2는 TGn에

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

서 제안한 IEEE 802.11n PHY 계층의 채널 및 변조 파라미터를 나타낸다[10].

기본 변조 방식은 BPSK부터 64-QAM까지 지원 가능하고, 채널 코드율은 1/2부터 5/6까지 지원 가능하다. 채널 대역폭은 20MHz, 송신 안테나의 개수와 Spatial Stream은 2개를 의무사항으로 정하고 있고, 표 2를 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.

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 현대역 Path Loss 및 광대역 특성을 규정하며, 실내 전파 환경을 6가지로 구분하여 A~F까지의 모델을 제공하면서 각 모델에 따라 2~6까지의 클러스터 환경을 제공한다[11].

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.

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

K는 Ricean K-factor이고, P는 각 Delay Tap에 해당하는 전력 성분이다. H_f 는 LOS 성분을 나타내는 행렬이고, 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[12].

본 연구에서는 PHY 계층에 2개의 클러스터 환경과 9개의 Delay Tap을 고려한 TGn 채널 B 모델과 4개의 클러스터 환경과 18개의 Delay Tap과 함께 형광등에 의한 반사효과까지 고려한 E 모델을 선택하여 적용한다.

3. SVD-MIMO 방식을 적용한 IEEE 802.11n 시스템

채널이 시 불변 특성을 갖고 있어서 어느 정도 결정적(Deterministic)이라고 하면, SVD 기법을 통해 MIMO 채널을 병렬의 SISO 가우시안 서브 채널로 근사 할 수가 있다. WLAN MIMO TGn 채널 모델은 단말의 이동성을 고려하지 않고, 단말 주위 물체의 이동성을 고려하므로 다른 채널 모델에 비해서 도플러 효과(Doppler Effect)가 크지 않다. 그래서 어느 정도 결정적인 특성을 지니게 되고, 이것은 송, 수신 부에서 채널의 정보를 어느 정도 알 수 있는 계기가 된다. 이러한 이론에 근거삼아 본 연구에서는 WLAN MIMO TGn 채널 모델에 대해 SVD 기법을 적용한다.

본 장에서는 WLAN MIMO TGn 채널에서 구한 채널 계수 행렬(Channel Coefficient Matrix)에서 SVD를 활용하여 SNR을 얻는 과정에 대해 소개한다.

3.1 SVD-MIMO 기법

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)가 n 이라면 수신 신호는 다음 식(3)과 같다.

$$y = Hx + n$$

where $x \in C^{M_T}, H \in C^{M_R \times M_T}, n \in C^{M_R}$ (3)

n 은 평균이 0이고 분산이 동일한 복소 가우시안 잡음이다. 또한, 복소 가우시안 잡음이기때 독립적인 실수부와 허수부를 원소로 갖는다.

MIMO 채널의 정보를 송, 수신부에서 모두 알고 있다고 가정하면 채널 계수 행렬 H 를 SVD 하여 다음 식(4)과 같이 3개의 행렬로 분해할 수 있다.

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

where $U \in C^{M_R \times M_R}, V \in C^{M_T \times M_T}, \Sigma \in C^{M_R \times M_T}$ (4)

U 와 V 행렬은 단일 행렬(Unitary Matrix)이고, Σ 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. 특히 특이치 값 λ 는 다음 식(5)과 같다.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_{M_{\min}}$$

where $M_{\min} = \min(M_T, M_R)$ (5)

λ 는 특이치 값으로 0보다 큰 실수 값을 갖는다. SVD의 분석을 위해서 채널 계수 행렬 H 를 독립적인 직교 고유모드(Orthogonal Eigenmodes)로 분해할 수 있다.

그림 2는 MIMO 채널을 독립적인 직교 고유모드로 분해하는 과정을 나타낸다. 이것은 송신부에서 입력 신호 x 가 전송되기 전에 V 행렬과 곱해지는 것을 의미하고, 또한 수신부에서 출력된 신호가 U^H 와 곱해지는 것을 의미한다. 전반적인 SVD 전송 관계는 다음 식(6)과 같다[13].

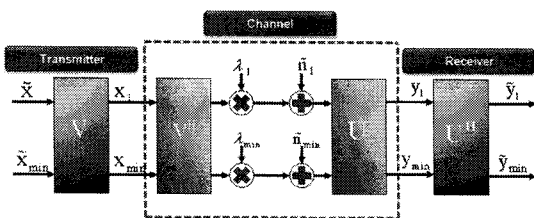


그림 2. SVD 이용한 MIMO 채널 분해 기법

$$\tilde{y} = U^H y = U^H(Hx + n) = \sum \tilde{x} + \tilde{n} \quad (6)$$

where $\tilde{x} = V^H x, \tilde{y} = U^H y, \tilde{n} = U^H n, svd(H) = U \Sigma V^H$

U^H 는 U 의 복소 전치 행렬이다. 또한, 수신 안테나에서 겪는 AWGN이 각각 독립적이라고 한다면, AWGN의 성질을 다음 식(7)과 같다.

$$E[\tilde{n}\tilde{n}^H] = E[U n n^H U^H] = I_{M_R} \quad (7)$$

$E[.]$ 는 평균값을 나타내고, \tilde{n}^H 는 \tilde{n} 의 복소 전치 행렬이다. 여기서 n 과 \tilde{n} 이 동일한 확률적인 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 결과적으로, 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(8)과 같다.

$$\tilde{y} = \sum_{i=0}^{M_{\min}} \lambda_i \tilde{x}_i + \tilde{n}_i \quad (8)$$

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

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(9)과 같다[14].

$$C(H) = \sum_{i=0}^{M_{\min}} \log_2(1 + SNR_i) = \sum_{i=0}^{M_{\min}} \log_2(1 + \frac{P_i}{k N_0} \lambda_i^2) \quad (bits/Hz)$$

where $M_{\min} = \min(M_T, M_R), \sum_{i=0}^{M_T} P_i = P_T, k = M_T$ (9)

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(10)과 같다.

$$SNR_i = \frac{P_i \lambda_i^2}{M_T N_0}, \text{ where } \sum_{i=0}^{M_T} P_i = P_T \quad (10)$$

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

4. Ns-2 환경 하에서 IEEE802.11n 시스템 구현

본 장에서는 Ns-2 환경 하에서 IEEE 802.11n 시스템 구현을 위하여 PHY 계층 시스템의 동작 순서도와 MAC 계층과 PHY 계층의 구축 및 연동 과정에 대해서 소개한다.

4.1 PHY 계층 시스템

Ns-2 기반에서 IEEE 802.11n 시스템을 위한 PHY 계층 시뮬레이션 시스템 순서도는 다음 그림 3과 같다.

WLAN MIMO TGn 채널 모델에서 각 송신 안테나에 동일한 전력이 할당된다는 전제 하에 SVD 기법을 통해 각각의 안테나 별로 송신 전력과 잡음 전력, 송신 안테나 개수를 기반으로 SNR이 정해지면 SNR을 기반으로 채널 상태의 정보를 송신부로 넘겨주게 된다.(여기서 채널 상태의 정보에 대한 지연이 발생하게 된다.) 그러면 송신부에서는 채널 상태의 정보를 기반으로 MCS 레벨을 선정하게 되고, 이 MCS 레벨의 값과 다음 번의 SNR을 기준으로 수신부에서 에러 유무를 판단하게 된다.

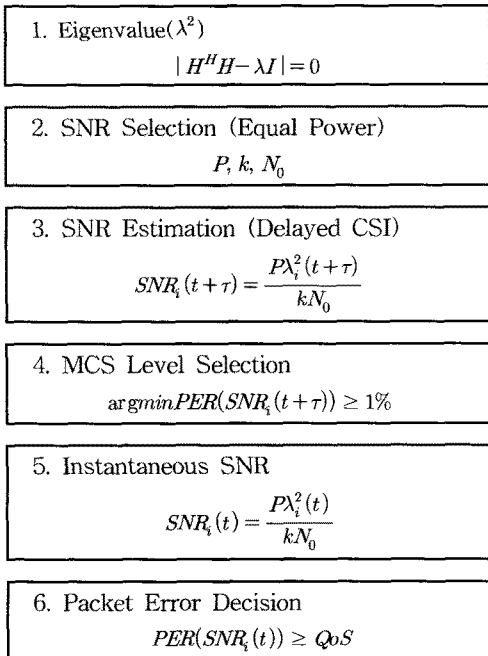


그림 3. Ns-2에서 PHY 계층 동작 순서도

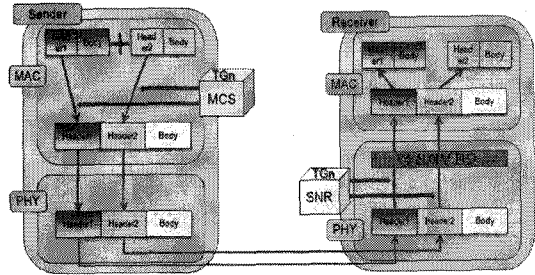


그림 4. Ns-2 에서의 MAC과 PHY의 연동 방법

4.2 MAC과 PHY 연동 시스템

앞에서 소개한 Ns-2 에서의 PHY 계층 시스템을 기반으로 IEEE 802.11n 시스템의 분석을 위해 MAC 계층과의 연동에 대해 소개한다. 다음 그림 4는 MAC 계층과 PHY 계층의 연동을 고려한 시뮬레이션 순서도이다.

MAC 계층에서 MIMO 시스템을 고려하여 2개 이상의 패킷이 내려올 때 시뮬레이션에서는 각각의 패킷에 대해 지연된 채널의 정보를 기반으로 MCS 레벨을 선정하여 하나의 패킷의 헤더에 모두 담아서 PHY 계층으로 보내준다. PHY 계층에서는 각 패킷의 MCS 레벨과 현재 채널의 SNR을 기반으로 패킷의 수신 여부를 판단한다. MAC 계층에서는 수신된 패킷을 기준으로 처리량을 측정한다.

5. 시뮬레이션 구성 및 파라미터

본 연구에서는 IEEE 802.11n 시스템을 위한 MIMO의 적용을 Ns-2를 이용하여 성능을 분석한다. 본 장에서는 A-MPDU의 방식을 두고 있는 MAC 계층과의 연동을 고려하여 MIMO 시스템을 위한 PHY 계층의 시뮬레이션 파라미터 선정 과정과 구조에 대해 소개한다.

5.1 TGn 채널 파라미터 및 MCS 레벨

본 연구에서 이용한 TGn 채널 파라미터의 설정은 다음 표 3과 같다.

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 선정한 5.29GHz를 선택하고, MIMO 시스템을 고려하여 송. 수신 안테나의 개수는

표 3. 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 Tx Antennas	2 / 4
Rx Spacing	0.5
IEEE_802_11_Cases	B / E
Correlation Coefficient Type	Complex
Sampling Rate	1000Hz
Down Sampling Factor	1
v0_km/h	1.2
v1_km/h	40

2개인 경우와 4개인 경우를 고려한다. 또한, TGn 채널 모델은 단말의 이동성을 고려하지 않고 주변 물체의 이동성에 대한 효과를 고려함으로 주변 물체의 이동성을 각각 1.2km/h와 40km/h를 고려한다.

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[15]. 여기서는 20MHz와 40MHz의 대역폭에서 각 안테나 별로 동일한 변조 방식을 지원할 때에 PER-SNR curve를 이용하여 MCS 레벨을 0~31까지 구분하고 있다. 이것을 기반으로 본 연구에서는 MIMO 시스템을 고려함으로 20MHz의 대역폭에서 2 streams와 4 streams에 대한 PER-SNR curve를 이용하여 MCS 레벨 테이블을 정리하면 다음 표 4, 5와 같다.

표 4. MCS 테이블 (MIMO : 2×2, 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 5. MCS 테이블 (MIMO : 4×4, 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 코딩에 따른 데이터 전송속도와 MCS 레벨의 SNR의 범위를 나타내고 있다. 여기서 MCS 레벨의 기준이 되는 SNR의 범위는 PER ≥ 0.01일 때를 기준으로 한다.[16]

앞에서 언급했던 것처럼 Ns-2는 패킷 기반의 시물레이터이기에 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 코히어런스 시간(Coherence Time)은 다음 식(11)과 같다.

$$T_c = \frac{\sqrt{A} \ln(2)}{2\pi f_d}, \text{ where } f_d = \frac{v_0}{\lambda} \quad (11)$$

여기서 A는 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 코히어런스 시간은 표 6에 의해 다음과 같이 정해진다.

코히어런스 시간이 50ms 이상이 되는 것으로 분석된다. 이것은 50ms 이상의 시간 동안 채널의 변화가 없다는 것으로 굉장히 안정적이라는 의미이다. 만약, 표 4의 MCS 테이블에서 보는 것과 같이 130

표 6. TGn 채널의 코히어런스 시간

Model	v_0	f_c	A	f_d	T_c
B	1.2km/h	5.29GHz	9	5.88 Hz	56.3 ms
E	1.2km/h	5.29GHz	18	5.88 Hz	79.6 ms

Mbps의 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.

5.2 Link Budget을 위한 파라미터

IEEE 802.11n 시스템을 위한 MIMO 채널 모델에서 Path Loss에 따른 수신 전력(Received SNR)의 감쇄 분석을 위해 Link Budget 이론을 적용한다. 우선 Link Budget에 의한 수신 전력의 값은 다음 식(12)과 같다[17].

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - N - L_{Path} \tag{12}$$

P_{Tx} , P_{Rx} 는 각각 송신 전력과 수신 전력이고, G_{Tx} , G_{Rx} 은 각각 송신 안테나 게인 과 수신 안테나 게인이다. 또한, N 은 잡음 전력이고, L_{Path} 는 TGn 채널에서의 Path Loss 이다. 여기서 잡음 전력 N 은 다음 식(13)과 같다.

$$N = kTB \tag{13}$$

k 는 볼츠만 상수로 보통 $1.38 \times 10^{-23} (J/K)$ 로 정하고, T 는 시스템의 온도로 일반적인 공간에서 290K로 정한다. 그리고 B 는 채널 대역폭으로 잡음 전력 N 에서 k, T 값이 상수로 정해진다면 채널 대역폭 B 가 가장 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다. 또한, TGn 채널에서의 Path Loss는 다음 식(14)과 같다.

$$L_{Path} = \begin{cases} 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right), & \text{where } d < d_{BP} \\ 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d_{BP}}{\lambda}\right) + 35\log_{10}\left(\frac{d}{d_{BP}}\right), & \text{where } d \geq d_{BP} \end{cases} \tag{14}$$

d_{BP} 는 Break-Point Distance로 LOS가 NLOS에 의해 영향을 받지 않는 최대한의 거리이고, d 는 실제 송. 수신부 간의 거리이다. d_{BP} 가 d 보다 크면 자유공간(Free Space) Path Loss 모델을 적용하고, d_{BP} 가 d 보다 작으면 이중반사(Two Ray) Path Loss 모델을 적용한다.

IEEE 802.11n 시스템을 위한 MIMO 채널 모델에

서 Path Loss에 따른 수신 전력의 감쇄 분석을 위한 파라미터의 선정은 다음 표 7과 같다.

위의 파라미터를 기반으로 TGn 채널 모델에 Path Loss 적용 시 전력 감쇄 분포는 다음 그림 5와 같다.

이러한 파라미터를 기반으로 수신 전력(수신 SNR)을 계산해보면 다음 표 8, 9와 같다.

TGn 채널 모델 E의 d_{BP} 가 모델 B의 d_{BP} 보다 더 크므로 E 모델이 Path Loss 적용 시 거리에 따른 수신 SNR의 분포가 더 크다는 것을 알 수 있다.

표 7. Link Budget을 위한 시스템 파라미터

Parameter	Value
Carrier Frequency	5.29GHz
Channel BandWidth	20MHz
Transmit Power	80mW (=19dBm)
Break-Point Distance	5m (TGn B) 20m (TGn E)

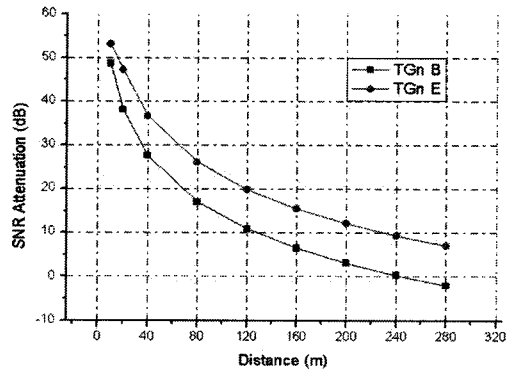


그림 5. Path Loss 적용 시 거리에 따른 SNR 감쇄 분포

표 8. 거리에 따른 수신 SNR (TGn B 모델)

Distance (m)	Transmit Power (dBm)	Noise Power (dBm)	Path Loss (dB)	Received SNR (dB)
10	19	-101	71.36	48.64
20	19	-101	81.90	38.10
40	19	-101	92.44	27.56
80	19	-101	102.97	17.03
120	19	-101	109.14	10.86
160	19	-101	113.50	6.50
200	19	-101	116.90	3.10
240	19	-101	119.67	0.33
280	19	-101	122.01	-2.01

표 9. 거리에 따른 수신 SNR (TGn E 모델)

Distance (m)	Transmit Power (dBm)	Noise Power (dBm)	Path Loss (dB)	Received SNR (dB)
10	19	-101	66.85	53.15
20	19	-101	72.87	47.13
40	19	-101	83.41	36.59
80	19	-101	93.94	26.06
120	19	-101	100.11	19.89
160	19	-101	104.48	15.52
200	19	-101	107.78	12.13
240	19	-101	110.64	9.36
280	19	-101	112.99	7.01

6. 시뮬레이션 결과분석

앞장에서 MAC 계층과 PHY 계층의 연동을 고려하여 설정한 파라미터를 기본으로 Ns-2에서의 시뮬레이션 결과에 대해 소개한다. 시뮬레이션 결과는 PHY 계층에서 MIMO로의 확장을 위해 TGn 채널 적용 시 송. 수신 안테나의 개수에 의한 시스템의 처리량을 분석한다. 또한, TGn 채널이 Path Loss를 고려하고 있는 모델이므로 Link Budget 이론을 적용하여 거리에 따른 시스템 처리량 감소 비율을 분석한다.

6.1 MIMO 시스템에서의 처리량 분석

송. 수신 안테나의 개수가 2와 4인 경우 TGn 채널 B와 E의 모델을 근거로 처리량을 분석한다. 또한, MAC 계층에서 MPDU의 Aggregation 개수는 7로 고정한다. 채널 대역폭을 20MHz로 설정하면 심볼 구간(Symbol Duration)이 50ns 정도가 된다. 이것을 기반으로 TGn 채널 B와 E 모델에서 50ns에 해당하는 Delay Tap까지 신호를 수신할 수 있다고 가정한다.

그림 6,7은 MIMO 타입(2*2, 4*4)에서 SNR에 따른 TGn 채널 B와 E 모델에서의 처리량을 나타낸다. 심볼 구간이 50ns이면 WLAN MIMO TGn 채널 문서에서 언급된 것과 같이 TGn 채널 B 모델은 Delay Tap이 5개 구간까지, E 모델을 4개 구간까지 수용 가능하다[12]. 때문에 B 모델의 λ^2 의 값이 조금 더 높음에 따라 SNR이 좋아져서 2*2, 4*4 모두에서 조금 더 나은 성능을 보이는 것으로 분석된다.

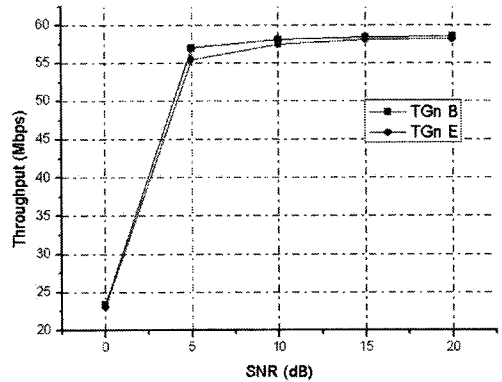


그림 6. TGn 채널 B와 E 모델에서 SNR에 대한 처리량 분석 (MIMO : 2*2)

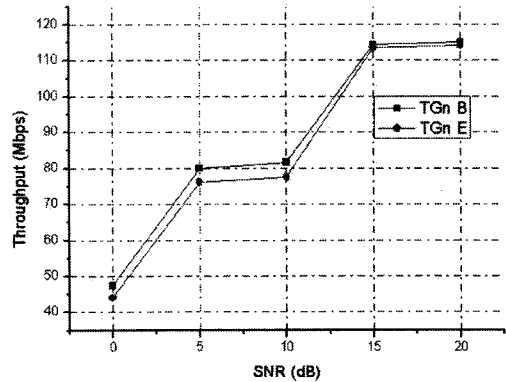


그림 7. TGn 채널 B와 E 모델에서 SNR에 대한 처리량 분석 (MIMO : 4*4)

6.2 Link Budget에 의한 시스템의 처리량 분석

TGn 채널은 단말의 이동성을 고려하지 않고, 단말의 거리에 따른 Path Loss를 고려하므로 Link Budget 이론을 적용하여 거리에 따른 처리량을 분석한다. 이전 결과 마찬가지로 MIMO(2*2, 4*4) 타입에서 TGn 채널의 B와 E 모델을 비교한다.

그림 8,9는 MIMO 타입(2*2, 4*4)에 거리에 따른 TGn 채널 B와 E 모델에서의 처리량을 나타낸다. 표 6, 7에서 보는 것과 같이 B 모델의 d_{BP} 가 E 모델의 d_{BP} 보다 크기 때문에 B 모델의 Path Loss가 더 큰 것으로 분석된다. 따라서 시뮬레이션 결과에서도 2*2, 4*4 모두에서 B 모델의 Path Loss에 의한 수신 SNR의 감쇄가 E 모델보다 크기에 처리량 측면에서도 더 떨어지는 것으로 분석된다. 2*2에서는 150m에서부터 차이를 보이는 것으로 분석되고, 4*4에서는 100m에서부터 차이를 보이는 것으로 분석된다.

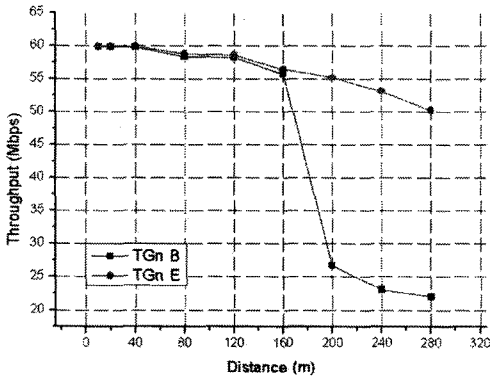


그림 8. TGn 채널 B와 E 모델에서 거리에 따른 처리량 분석 (MIMO : 2x2)

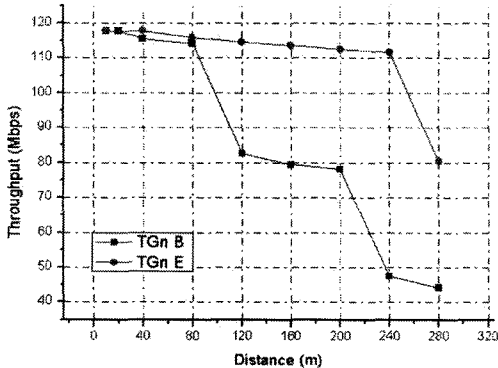


그림 9. TGn 채널 B와 E 모델에서 거리에 따른 처리량 분석 (MIMO : 4x4)

7. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.11n 시스템에서 MAC 계층의 A-MPDU 기법을 기반으로 PHY 계층에서의 MIMO 확장을 위해 WLAN MIMO TGn 채널 모델을 이용하여 SVD 기법을 적용하는 방안을 제안하였다. 또한, 이를 기반으로 공신력 있는 $N_s=2$ 를 이용하여 MAC 계층과 PHY 계층의 연동된 시스템을 분석하였다.

분석된 연구 결과, 제안된 PHY 계층에서의 SVD-MIMO 적용을 통해 송. 수신 안테나의 개수가 올라갈수록 시스템 처리량이 높아진 결과를 얻을 수 있었고, 송. 수신 안테나의 개수를 4개 고려한 경우에 시스템 처리량이 100Mbps 이상의 결과를 얻을 수 있었다. 또한, WLAN MIMO TGn 채널의 경우 9개의 Delay Tap을 고려한 B 모델이 18개의 Delay Tap과 형광등에 의한 빛의 반사 효과까지 고려한 E 모델보

다 SNR에 대한 처리량이 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 E 모델의 Delay Tap이 B 모델의 Delay Tap보다 크므로 그 만큼 전력 성분이 작아 채널 상태가 좋지 않기 때문이다. 그리고 Link Budget 이론에 근거한 Path Loss를 적용하여 거리에 따른 처리량도 WLAN MIMO TGn 채널 B 모델이 E 모델보다 더 적은 영향을 받는다는 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 송경희, 최은경, 이석규, and 방승찬, "IEEE 802.11n 차세대 무선랜 기술 동향," 한국통신학회, 제23권 6호, pp. 54-60, June 2006.
- [2] 박성우, 정보통신부 전파방송정책국 전파이용제도과, "초고속 광대역 무선 서비스 활성화 방향," 전파특집-차세대 무선랜, Jan. 2005.
- [3] Riera-Palou,F, and Femenias,G, "Improving STBC Performance in IEEE 802.11n Using Group-Orthogonal Frequency Diversity," *Wireless Communications and Networks Conference 2008*, pp. 193-198, Apr. 2008.
- [4] Zhou Chen, and Suzuki,H, "Performance of 802.11n WLAN with Transmit Antenna Selection in Measured Indoor Channels," *Communication Theory Workshop 2008*, pp. 139-143, Feb. 2008.
- [5] Fei Peng, Jinyun Zhang, and Ryan,W,E, "Adaptive Modulation and Coding for IEEE 802.11n," *Wireless Communications and Networks Conference 2008*, pp. 655-661, Mar. 2007.
- [6] Huaning Niu, and Chiu Ngo, "Diversity and Multiplexing Switching in 802.11n MIMO Systems," *Signals, Systems and Computers 2006*, pp. 1644-1648, Oct. 2006.
- [7] Byung Soo Kim, Ho Young Hwang, and Dan Keun Sung, "Effect of Frame Aggregation on the Throughput Performance of IEEE 802.11n," *Wireless Communication Networking Conference 2008*, pp. 1740-1744, Apr. 2008.
- [8] Ginzburg,B, and Kesselman,A, "Performance

Analysis of A-MPDU and A-MSDU Aggregation in IEEE 802.11n," *Sarnoff Symposium 2007*, pp. 1-5, May 2007.

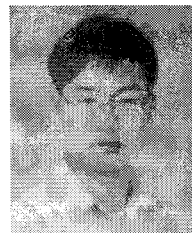
- [9] Yoon-Sik Yoo, and Jae-Doo Huh, Sensor Networking Application Research Team, ETRI, "Priority based 802.11e EDCA Algorithm and Performance Evaluation for Multimedia Data Transfer," *제4회 정보통신 표준화 우수 논문집*, pp. 26-43, Jan. 2008.
- [10] Lorincz,J, and Begusic, D, "Physical Layer Analysis of Emerging IEEE 802.11n WLAN Standard," *Advanced Communication Technology 2006*, Vol.1, pp. 186-194, Feb. 2006.
- [11] 정현규, and 이광천, "차세대 이동통신 무선 채널모델 연구동향," *전자통신동향분석 제21권 제3호*, pp. 59-70, June 2006.
- [12] Laurent Schumacher, and Bas Dijkstra, "Description of MATLAB Implementation of the Indoor MIMO WLAN Channel Model Proposed by IEEE 802.11 TGN Channel Model Special Committee," *Implementation note version 3.2*, May 2004.
- [13] Lebrun.G, Gao.J, and Faulker.M, "MIMO Transmission Over a Time-Varying Channel Using SVD," *IEEE Wireless Comm*, Vol.4, pp. 757-764, Mar. 2005.
- [14] Baccareli.E, and Biagi.M, "A Water-Filling Based Approach for Power Allocation for Multiple-Antenna Rayleigh Flat Fading Systems with Partially Coherent Detection," *Vehicular Technology Conference*, Vol.1, pp. 92-96, Sep. 2002.
- [15] "Joint Proposal Team PHY Simulation Results," *IEEE P802.11 Wireless LANs*, Jan. 2006.
- [16] IEEE 802.11n/D6.0 Draft Amendment - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) specifications, Amendment 5 : Enhancements or Higher Throughput, July 2008.
- [17] Sungmoon Shin, and YoungSik Lim, "Link Budget Analysis for a Wireless Local Loop,"

Proceedings of 4th Workshop on Mobile Multimedia Communications, pp. 429-433, Sep. 2007.



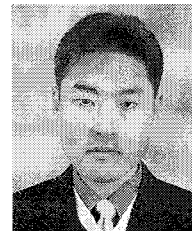
이 윤 호

2008년 충북대학교 정보통신과 학사
 2008년 3월~현재 충북대학교 전자공학과 석사과정
 관심분야 : WLAN



김 주 석

2007년 충북대학교 정보통신과 학사
 2009년 충북대학교 전파공학과 석사
 2009년 3월 충북대학교 전파공학과 박사
 관심분야 : Cognitive Radio, WLAN, DFS



최 진 규

1999년 한양대학교 전자공학과 (B.S)
 2001년 한양대학교 전파통신전자공학과 (M.S)
 2001년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 관심분야 : MIMO-OFDM, Digital RF, 무선 채널



김 경 석

1989년~1998년 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
 2002년 University of Surrey (영국) 전기전자공학과 박사
 2002년~2004년 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임 연구원
 2004년~2005년 전북대학교 생체정보공학부 전임강사
 2005년~현재 충북대학교 전자정보대학 정보통신공학과 부교수
 관심분야 : 전파감시, SDR, CR, MIMO-OFDM, DSA, UWB