DBpia

Rician 페이딩 채널 환경에서 IEEE 802.11n 무선 LAN의 DCF 처리율 분석

종신회원 이 하 철

A DCF Throughput of IEEE 802.11n Wireless LAN over Rician Fading Channel

Ha cheol Lee *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 IEEE 802.11n 무선 LAN의 라시안 페이딩 채널환경에서 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) 기반의 RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send)기법을 이용하는 MAC (Media Access Control) 계층의 DCF (Distributed Coordination Function) 처리율을 분석하였다. IEEE 802.11n 무선 LAN의 처리율을 분석하기 위하여 2×2 MIMO (Multiple Input Multiple Output) OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송방식인 Alamouti 기법을 적용하였다. 처리율은 라시안 인자, 평균 신호 대 잡음비, 서브프레임 수, 서브프레임의 페이로드 크기, 스테이션 수 및 패킷전송확률을 변수로 하여 분석하였는데, 특히 IEEE 802.11n에 사용되는A-MSDU (MAC Service Data Unit Aggregation) 기법을 적용하여 aggregation의 수가 증가할수록 처리율 성능이 개선됨을 확인하였다.

Key Words : IEEE 802.11n, Wireless LAN, DCF, MAC, throughput.

ABSTRACT

This paper analyzes the throughput performance of CSMA/CA-based DCF protocol with the RTS/CTS scheme over the Rician fading channel in the IEEE 802.11n. Alamouti scheme, referred to as 2×2 MIMO OFDM, is applied to this paper to analyze the throughput in the IEEE 802.11n wireless LAN. The number of stations n is assumed to be fixed. The parameters used in analyzing DCF throughput are Rician factor, average SNR (Signal to Noise Ratio), number of subframes, payload size of subframe, number of stations and packet transmission probability. A-MSDU scheme is used in IEEE 802.11n. In case of applying A-MSDU scheme to MAC layer, the more the number of aggregation is, The better the DCF throughput is.

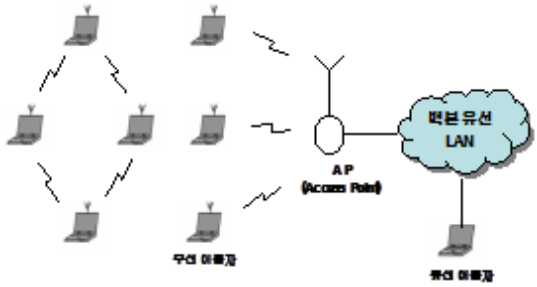
Ⅰ. 서 론

무선 LAN은 IEEE 802. 11b 계열 표준의 완성과 이에 따른 저가의 관련장치 개발, 그리고 휴대형 PC, PDA 및 스마트폰의 보급 확대 등에 따라 최근 관련시장이 큰 폭으로 성장하고 있으며, 또한 최대 54 Mbps의 전송률을 지원하는 5 GHz 대역의 IEEE 802.11a 및 2.4 GHz 대역의 IEEE 802.11g 무선 LAN도 상용화된지 오래되었다[1,2]. 한편 무선 LAN 단말의 물리계층에서 최대전송률이 지원될지라도 통신 프로토콜 스택에서의 오버헤드 및 무선채널환경에서의 페이딩등의 열화 요인에 의해서 사용자가 체

유한대학교 정보통신과(hclee@yuhan.ac.kr)
논문번호 12002-0117, 접수일자 : 2012년1월17일, 수정일자: 2012년1월31일, 게재확정일자: 2012년2월7일

www.dbpia.co.kr

감할 수 있는 전송속도는 이에 훨씬 못 미치고 있는데 이러한 현상을 정량적으로 분석하기 위하여 MAC, TCP 및 응용계층에서의 처리율에 대한 연구 결과도 발표되고 있다. 그리고 최근에는 MIMO-OFDM 방식의 IEEE 802.11n도 표준화되어 제품이 시장에 소개되고 있다. 현재 infrastructure 모드의 무선 LAN과 관련하여 최근 국내외 유무선 통신사업자들은 회의장, 공항, 호텔, 카페 등 이용자가 밀집되어 있는 핫스팟 지역에서 무선 LAN 기술을 이용한 고속 무선 인터넷 서비스를 제공하고 있으며, 또한 무선 LAN을 댁내 무선망으로도 활용하고 있다. 이와 같이 무선 LAN은 유선 LAN을 대체한다는 기존의 이용 개념을 넘어 공중 무선망과 댁내 무선망 등으로 그 영역을 확대하고 있으며, 또한 이동통신망과 점차 높은 수준으로 연동되어 이중모드 단말을 소지한 사용자는 핫스팟 지역에서 고속의 무선 LAN에 접속하고, 그 지역을 벗어나게 되면 자동적으로 전국적인 커버리지를 갖는 이동통신망에 접속할 수 있도록 하고 있다. 그림 1은 두가지 동작모드의 무선 LAN 구조를 나타내며 특히 AP는 IEEE 802.11 프로토콜을 IEEE 802.3 프로토콜로 변환하는 역할을 한다.



(a) Ad-hoc 기반모드 (b) Infrastructure 모드

그림 1. 무선 LAN 구조
Fig. 1. Wireless LAN configuration

무선 LAN의 여러 연구분야중에서 특히 주파수 자원이 제한된 환경에서 효율적인 MAC 프로토콜을 설계하는 방법이 관심의 대상인데 IEEE 802.11 DCF는 간단하고 견고하다는 이유로 인해서 무선 LAN의 일반적인 MAC 프로토콜로 사용되고 있다[3]. 그림2는 IEEE 802.11에서 제시하고 있는 물리계층과 MAC 계층을 나타내고 있는데 각 계층의 PDU (Protocol Data Unit)는 오버헤드를 포함한 전송 유니트를 의미하고 SDU (Service Data Unit)는 상위 계층에서 제공하는 페이로드를 말한다. MAC계층에서는 MSDU (MAC SDU)에 MAC 계층 헤더와 FCS가 추가되어 MPDU (MAC PDU)를 구성한다.

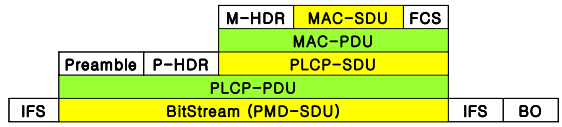


그림 2. IEEE 802.11의 물리계층과 MAC 계층 프로토콜 구조
Fig. 2. IEEE 802.11 physical and MAC layer

이렇게 무선 LAN이 활발하게 사용되고 있으나 무선 LAN의 액세스 메커니즘, 오버헤드 및 무선환경 특유의 페이딩으로 인해 이용자가 체감하는 데이터 전송속도는 표준화 자료에서 제시하고 있는 최대 전송속도에 훨씬 못 미치고 있다[4]. 기존의 많은 연구에서는 무선 채널 특유의 페이딩 환경을 전혀 고려하지 않는 이상적인 채널[5,6] 또는 페이딩 채널[4,7]을 통한 IEEE 802.11/11g DCF의 성능을 평가하였는데 특히 Bianchi는 2차원 Markov 프로세스로 이진 지수함수의 특성을 갖는 백오프를 모델링함으로서 성공적으로 IEEE 802.11 DCF의 포화(saturation) 처리율을 얻었다[8]. 이러한 배경에서 본 연구에서는 라시안 페이딩 채널환경하에서 IEEE 802.11n 무선 LAN의 MAC 계층 처리율 성능을 분석하기 위하여 2장에서는 2009년도에 표준화가 완료된 IEEE 802.11n 무선 LAN의 물리계층과 MAC 계층기술을 살펴본다. 3장에서는 패킷 에러율, 전송확률 및 처리율을 유도하였고 4장에서는 3장의 내용을 기반으로 IEEE 802.11n의 처리율 결과를 분석하였다. 5장에서는 내용요약과 함께 향후 연구방향에 대하여 언급하였다.

Ⅱ. IEEE 802.11n 무선 LAN

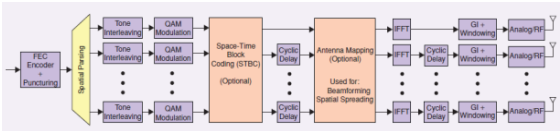
2.1. PHY/MAC 계층

기존 IEEE 802.11b/g/a 물리계층의 전송속도인 11 Mbps나 54 Mbps와 달리 IEEE 802.11n은 MAC-SAP (MAC-Service Access Point) 에서 100 Mbps 이상의 실효 전송속도를 목표로 하고 있다. 이러한 실효 전송속도를 제공하기 위해서는 물리계층에서 140 Mbps~600 Mbps의 전송속도를 갖는다. IEEE 802.11n이 갖는 주요 특징은 다음과 같다[9,10].

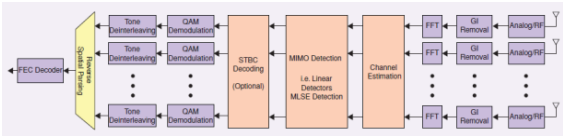
- 기존의 IEEE 802.11b/g/a와 호환성을 갖는다
- 5 GHz 및 2.4 GHz 주파수대를 사용한다

www.dbpia.co.kr

- OFDM에 추가로 MIMO기술을 사용한다
- 1 채널의 주파수 대역폭을 20 MHz에서 40 MHz로 확장함으로서 고속화 실현이 가능하다
- AP는 20 MHz의 채널폭을 갖는 IEEE 802.11b/g/a 스테이션과 통신하면서 40 MHz 채널폭을 갖는 스테이션과도 통신할 수 있다. 그림 3은 IEEE 802.11n MIMO 송수신기의 블록도를 나타낸다[11].



(a) 송신계통 블록도



(b) 수신계통 블록도

그림 3. MIMO TX/RX 데이터통신 계통
Fig. 3. MIMO TX/RX Datapath

IEEE 802.11n 물리계층의 주요특징은 그림 4와 같다[9,10]. HT(High Throughput) OFDM PHY 표준은 기존의 OFDM PHY를 기반으로 20 MHz 대역폭 또는 40 MHz 대역폭으로 선택적으로 확장할 수 있도록 하여 선택적 모드인 경우 최대 600 Mbps (4 spatial streams, 40 MHz 대역폭)의 전송속도가 가능하다. Optional 항목의 Short GI (Guard Interval)는 Mandatory 항목의 GI인 800 ns를 400 ns로 축소한 것이며 TxBF (Transmit Beamforming)는 특정 스테이션에 전파에너지를 전기적으로 집중시켜 통신품질을 향상시키기 위한 기능이다.

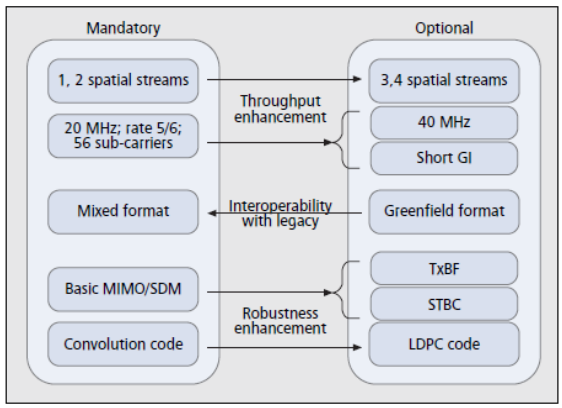


그림 4. Mandatory 및 optional IEEE 802.11n PHY 특징
Fig. 4. Mandatory and optional IEEE 802.11n PHY features

변조방식으로는 BPSK, QPSK, 16-QAM 또는 64-QAM을 사용하고, 전송오류정정 부호방식으로는 부호율이 1/2, 2/3, 3/4 또는 5/6인 컨벌루션 부호를 사용하며 LDPC (Low Density Parity Check) 부호도 선택적으로 사용한다. IEEE 802.11n의 PHY는 데이터를 송수신하기 위해 세 가지 모드로 동작하게 되는데 Non-HT (legacy) 모드, Mixed 모드, Greenfield (HT) 모드를 선택적으로 사용하도록 지원한다. Non-HT 모드는 legacy 모드라고도 하며 IEEE 802.11b/g/a 프레임으로 데이터를 전송한다. Mixed 모드는 legacy 모드와 HT 모드를 모두 지원하며 IEEE 802.11b/g/a 프레임을 해석할 수 있는 IEEE 802.11n 프레임을 전송한다. Green field 모드는 HT 모드만을 지원하며 IEEE 802.11n 디바이스 간에만 사용되는 고효율 프레임을 전송한다. 그림 5는 PHY 계층의 MF (Mixed Format) 프리엠블 및 GF (Greenfield Format) 프리엠블을 나타낸다.

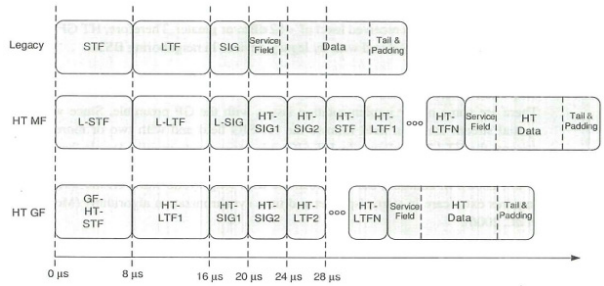


그림 5. Legacy, MF 및 GF 모드에서의 프리엠블 필드의 타이밍
Fig. 5. Timing of the preamble fields in legacy, MF and GF in IEEE 802.11n-based WLAN

IEEE 802.11 MAC 프로토콜은 시간축상에서 교대로 이용되는 PCF (Point Coordination Function)와 DCF의 두가지 동작모드를 지원한다. PCF는 비경쟁방식으로서 시간적으로 제약적인 서비스에 이용되고 DCF는 경쟁기반의 CSMA/CA기법을 이용하며 비동기적인 데이터 전송에 주로 이용된다. IEEE 802.11 MAC 프로토콜은 5개의 시간간격을 정의한다. SIFS (Short InterFrame Space)와 슬롯시간은 물리계층에 의해서 결정되는 것이고 PIFS (Priority InterFrame Space), DIFS (Distributed InterFrame Space) 및 EIFS (Extended InterFrame Space)는 SIFS와 슬롯시간 기반하에서 정의된다. IEEE 802.11n의 경우에 SIFS 시간간격은 16 µsec, 슬롯시간은 9 µsec, DIFS 시간간격은 34 µsec 가 된다. 슬롯시간은 신호 전파 및 처리 지연현상을 고려한 수치이다. PIFS는 SIFS에 하나의 슬롯시간을 추가한 시간간격(25 µsec)이고 DIFS는 SIFS에 2개의 슬롯

www.dbpia.co.kr

시간을 추가한 시간간격(34 μsec)이 된다. EIFS는 가장 긴 시간간격을 갖으며 데이터 프레임이 에러 상태로 수신될 경우 수신 단말이 ACK 프레임을 보내는 데 지장이 없도록 충분한 시간을 확보한다. DCF는 CSMA/CA 메카니즘을 이용하며 전송할 새로운 패킷이 있는 AP 또는 스테이션은 채널이 사용되고 있는지를 모니터한다. IEEE 802.11 MAC 프로토콜은 물리계층의 채널 감지기법외에 채널이 휴지 상태로 되기 전에 남아 있는 시간의 양을 각 단말에게 알려주는 NAV (Network Allocation Vector) 기법을 구현한다. 이러한 NAV 기법을 가상 캐리어 감지기법이라고 하며 MAC 프로토콜은 충돌현상을 피하기 위하여 물리 및 가상 감지기법을 이용하는 것이다. 이러한 방법들은 two-way handshaking 기법인데 four-way 프레임 교환 프로토콜로서 RTS/CTS 기법이 있다. 이는 hidden 터미널 문제를 해결하기 위한 기법으로서 RTS 신호를 송신한 단말은 AP로부터 SIFS 시간동안에 CTS 신호를 수신하게 되어 패킷을 전송하게 된다[2,3,4,5,6]. IEEE 802.11n의 MAC 규격은 효율성(efficiency), 속도 적응성(rate adaptation), 호환성(interoperability) 지원을 기본으로 한다. 이를 위해서 IEEE 802.11n의 MAC 규격에서는 공통적으로 효율성과 속도 적응성 지원을 위하여 프레임 aggregation과 BA (Block Acknowledgement), LongNAV를 채택하고 있다. 그림 6은 IEEE 802.11n MAC계층의 기능개선 내용을 나타낸다[9,10].

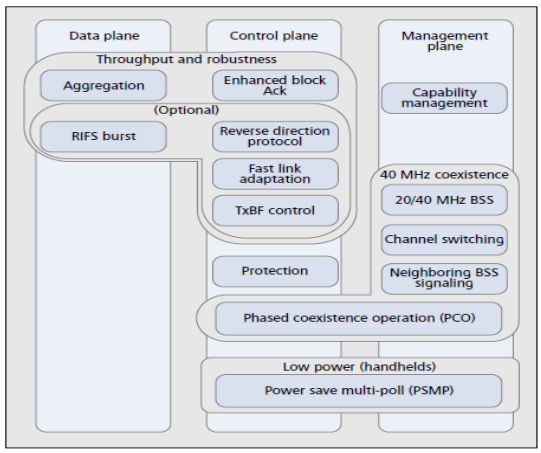


그림 6. 802.11n MAC 기능개선
Fig. 6. 802.11n MAC enhancements

IEEE 802.11n에서 MAC 계층의 aggregation 방안으로는 A-MSDU와 A-MPDU 방식이 있다. A-MSDU는 우선순위(priority)가 같고, 동일한 DA(Destination Address)로 향하는 다수의 MSDU를 하나의 MSDU로 aggregation하는 방법이며, A-MPDU는 하나 이상의 MPDU를 aggregation하여 구성한다. A-MSDU 내의 각 MSDU는 MSDU 길이, SA (Source Address), DA로 구성되는 서브프레임 헤더에 의해서 구분된다. 구성된 A-MSDU는 일반 MSDU와 동일하게 취급되어 프레그멘테이션이 수행될 수 있으며, MPDU로 구성되어 전송된다. A-MSDU 기법은 전송하려는 패킷의 크기가 작고, 짧은 시간에 동일한 DA로 향하는 다수의 패킷을 전송하는 경우에 효율적이다. 이와 같은 이유는 전송과정에서 소요되는 시간 (PLCP preamble, MAC header, IFS, backoff 등)의 횟수를 감소시킬 수 있기 때문이다. IEEE 802.11n의 A-MSDU 기법을 지원하기 위해서는 legacy MAC-PHY의 인터페이스에 별도의 수정이 필요 없어서 비교적 구현이 용이하다. A-MPDU는 MAC 계층의 하위부에 위치하여 하나 이상의 MPDU를 aggregation하여 하나의 PPDU로 구성하는 방식이다. A-MPDU의 길이는 해당 프레임의 우선순위에 따른 AC의 TxOP 기간동안에 전송 가능한 크기로 제한된다. 이와 같은 A-MPDU 방식에서는 과도하게 큰 A-MPDU가 생성될 수 있으며, 이러한 긴 길이의 프레임에 대한 수신단에서 복조 과정의 동기 손실에 의한 패킷 손실 확률이 높은 단점이 있다. 또한, A-MPDU 내에 존재하는 각각의 MPDU를 처리하기 위하여, MPDU 변별자(delimiter)의 unique pattern scan 과정으로 인하여 복잡도 및 처리 시간이 증가될 수 있다. 그림 7은 A-MSDU 및 A-MPDU에 대한 IEEE 802.11n 프레임의 포맷을 나타낸다.

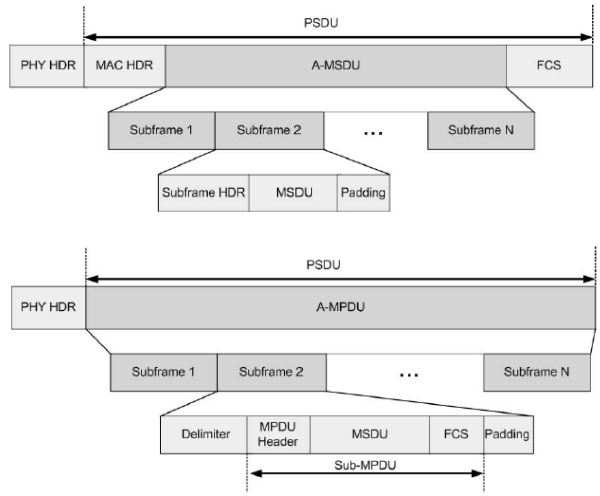


그림 7. A-MSDU 및 A-MPDU에 대한 IEEE 802.11n 프레임 포맷
Fig. 7. IEEE 802.11n Frame Format for A-MSDU and A-MPDU

www.dbpia.co.kr

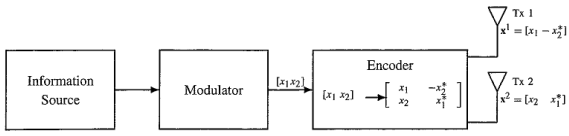
2.2. 2×2 Alamouti 송수신모델 분석

2x2 MIMO 시스템인 경우에 최적 다이버시티 기법은 Alamouti Code로서 다음과 같이 주어진다.

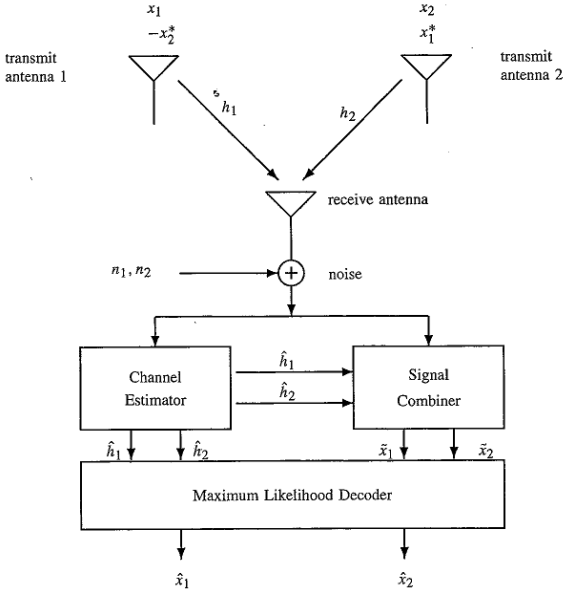
$$X = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}$$

x_1및 x_2는 사용된 디지털 변조방식의 constellation set으로 부터의 심볼이다. x^*는 심볼 x의 복소수 형식을 나타낸다. Alamouti Code가 최대로 얻을 수 있는 다이버시티 order는 $d=N_tN_r=4$가 되고 spatial rate $r_s=1$이 된다. 또한 X의 직교성 구조로 인해서 최적의 MIMO ML(Maximum Likelihood) 복호기법은 복잡성을 현저히 감소시킨다.

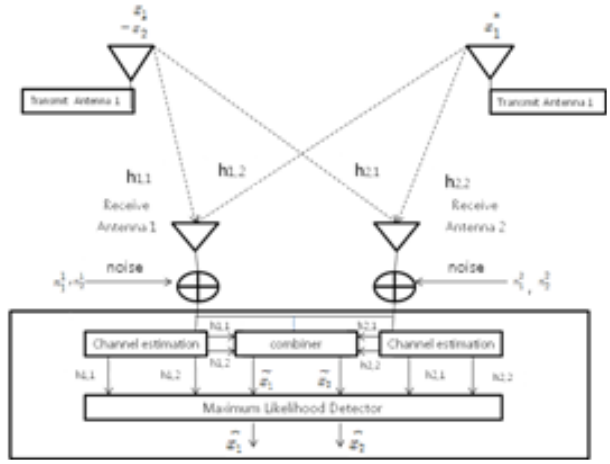
그림 8은 Alamouti space-time 엔코더 및 수신기의 블록 다이어그램을 나타낸다[11,12]. M-ary 변조기법이 사용된다고 가정하는데 Alamouti space-time 엔코더에서는 m개 정보비트 그룹이 변조된다 ($m=\log_2 M$). 그리고 엔코더는 두개의 변조된 심볼의 블록 x_1, x_2를 취하고 이들을 부호 매트릭스에 따라 전송 안테나로 매핑한다. 부호기 출력은 두개의 송신 안테나에서 두개의 연속적인 송신기간에 전송된다.



(a) 엔코더



(b) 2x1수신기



(c) 2x2수신기

그림 8. Alamouti space-time encoder 및 수신기 블록다이어그램
Fig. 8. A block diagram of the Alamouti space-time encoder and receiver

첫 번째 송신기간동안 두개의 신호 x_1 및 x_2가 두개의 안테나로부터 동시에 전송된다. 두 번째 송신기간에 신호 $-x_2^*$는 첫 번째 송신 안테나로부터 전송되고 x_1^*은 두 번째 송신 안테나로부터 전송되는데 이러한 엔코딩 절차는 공간 및 시간 도메인에서 수행되는 것이다. 첫 번째 안테나 및 두 번째 안테나로부터 전송되는 시퀀스를 x^1 및 x^2로 나타내면 아래와 같이 표현된다.

$$x^1 = \begin{bmatrix} x_1, & -x_2^* \end{bmatrix}$$
$$x^2 = \begin{bmatrix} x_2, & x_1^* \end{bmatrix}$$

Alamouti 기법의 핵심은 두개의 송신 안테나에서 송신되는 시퀀스는 직교성을 갖는 데 있다. 시퀀스 x^1 및 x^2의 내적은 0이기 때문에

$x^1 \bullet x^2 = x_1 x_2^* - x_2^* x_1 = 0$ 가 된다. 수신기에 하나의 수신 안테나가 사용된다고 가정하고 시간 t에서 첫 번째 및 두 번째 송신 안테나로부터 수신 안테나까지의 페이딩 채널계수를 $h_1(t)$및 $h_2(t)$로 표기하면 페이딩 계수가 두개의 연속적인 심볼전송기간에 걸쳐 일정하다고 할 때 페이딩 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$h_1(t) = h_1(t+T) = h_1 = |h_1| e^{j\theta_1}$$
$$h_2(t) = h_2(t+T) = h_2 = |h_2| e^{j\theta_2}$$

www.dbpia.co.kr

수신 안테나에서 두개의 연속적인 심볼기간 t 및 t+T에 걸쳐서 수신된 신호 r_1 및 r_2 는 다음과 같이 표현된다.

$$r_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1$$
$$r_2 = -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + n_2$$

n_1 및 n_2 는 각각 시간 t 및 t+T 에서 AWGN 샘플을 나타내는 제로 평균 및 전력 스펙트럼밀도 $\frac{N_0}{2}$를 갖는 독립적인 복소변수를 나타낸다.

Alamouti 기법은 본 논문에서 가정하는 두개의 송신 안테나와 두개의 수신 안테나를 갖는 시스템에도 적용될 수 있다. 이 구조에서도 엔코딩 및 송신기법은 하나의 수신 안테나를 갖는 경우와 동일하다. r_1^j 및 r_2^j 를 각각 시간 t 및 t+T에서 j번째 수신안테나에서 수신된 신호라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$r_1^j = h_{j,1} x_1 + h_{j,2} x_2 + n_1^j$$
$$r_1^j = -h_{j,1} x_2^* + h_{j,2} x_1^* + n_2^j$$

여기서 $h_{j,i}$(i=1,2, j=1,2,…,nR)는 송신안테나 i부터 수신안테나 j까지의 경로에 대한 페이딩 계수를 나타낸다. n_1^j 및 n_2^j는 각각 시간 t 및 t+T에서 수신안테나 j에 대한 잡음신호이다. 수신기는 수신된 신호의 선형 조합에 근거한 두개의 decision statistics을 구성한다. 이 경우에 j는 1과 2이므로 nR은 2에 해당된다.

$$\tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{nR} h_{j,1}^* r_1^j + h_{j,2} (r_2^j)^*$$
$$= \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{nR} |h_{j,i}|^2 x_1 + \sum_{j=1}^{nR} h_{j,1}^* n_1^j + h_{j,2} (n_2^j)^*$$
$$\tilde{x}_2 = \sum_{j=1}^{nR} h_{j,2}^* r_1^j - h_{j,1} (r_2^j)^*$$
$$= \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{nR} |h_{j,i}|^2 x_2 + \sum_{j=1}^{nR} h_{j,2}^* n_1^j - h_{j,1} (n_2^j)^*$$

두개의 독립된 신호 x_1 및 x_2에 대한 최대 likelihood 디코딩은 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{x}_1 = \arg\min_{\hat{x}_1 \in S} \left[\left(\sum_{j=1}^{nR} (|h_{j,1}|^2 + |h_{j,2}|^2) - 1 \right) |\hat{x}_1|^2 + d^2(\tilde{x}_1, \hat{x}_1) \right]$$
$$\hat{x}_1 = \arg\min_{\hat{x}_2 \in S} \left[\left(\sum_{j=1}^{nR} (|h_{j,1}|^2 + |h_{j,2}|^2) - 1 \right) |\hat{x}_2|^2 + d^2(\tilde{x}_2, \hat{x}_2) \right]$$

2.3. MAC 계층 단방향 동작

단방향 전달 통신환경에서 A-MPDU 및 A-MSDU에 대한 타이밍 시퀀스는 그림 9에서 보여준다. RTS/CTS가 사용된다면, RTS-CTS-DATA-ACK의 전송 시퀀스는 송신기가 단일 데이터 프레임을 송신하는 경우만을 허용한다. DATA 프레임은 A-MPDU 또는 A-MSDU 프레임을 나타낸다. IEEE 802.11n은 또한 양방향 데이터 전송방법을 정의한다. 양방향 데이터 전송방법에서 수신기는 CTS 제어프레임에 역방향 데이터 전송을 요구할 수 있다. 송신기는 역방향 링크상에서 수신기에 대한 임의의 전송시간을 허용한다. 이 때 전송 시퀀스는 RTS-CTS-DATAf-DATAr-ACK이 된다. 이것은 수신기로부터 약간의 작은 피드백 패킷의 전송을 용이하게 하고 TCP ACK 세그먼트의 전송을 필요로 하는 TCP의 성능을 증가시킬 수 있다. BACK (Block Acknowledgement)가 이전의 ACK 프레임을 대체하기 위해서 사용될 수 있다. BACK는 aggregated 프레임내에서 각각의 부 프레임을 효율적으로 acknowledge 하기 위하여 비트 맵을 사용할 수 있다[13,14,15].

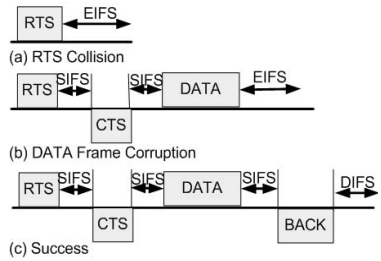


그림 9. IEEE 802.11n 단방향 RTS/CTS 액세스 기법
Fig. 9. IEEE 802.11n Uni-directional RTS/CTS Access Scheme

Ⅲ. 패킷에러율 및 DCF 처리율 해석

3.1. 패킷에러율

CSMA/CA의 RTS/CTS기법의 경우 타임 슬롯내에서 RTS/CTS 전송이 성공적으로 이루어 졌지만 페이로드에 한 비트라도 에러가 발생하면 재 전송되어야 한다. 편의상, 변수 P_e를 페이로드내의 에러때문에 백 오프가 발생될 확률로 정의하고 페이로드내의 에러는 랜덤하게 발생한다고 가정하면 A-MSDU 방식에서 CSMA/CA의 RTS/CTS기법을 사용하면 패킷에러율 P_e는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P_e = 1 - (1 - q)^L \quad (1)$$

www.dbpia.co.kr

L 은 IEEE 802.11n에서 A-MSDU 기법을 적용하는 경우에 aggregated MAC프레임의 길이를 나타낸다. 부호율 k_c/n_c를 갖는 콘벌루션 부호의 비트 에러율 q는 다음과 같다[14].

$$q = \frac{1}{k_c} \sum_{i=\frac{d_{free}+1}{2}}^{d_{free}} \binom{d_{free}}{i} (q_b)^i (1-q_b)^{d_{free}-i}$$

(d_{free}:홀수) (2)

$$q = \frac{1}{k_c} \sum_{i=\frac{d_{free}}{2}+1}^{d_{free}} \binom{d_{free}}{i} (q_b)^i (1-q_b)^{d_{free}-i} + \frac{1}{2k_c} \binom{d_{free}}{d_{free}/2} (q_b)^{d_{free}/2} (1-q_b)^{d_{free}/2}$$

(d_{free}:짝수)

d_{free}는 콘벌루션부호의 최대 자유거리이고 q_b는 M-QAM방식의 비트에러율을 의미한다.

$$q_b = \frac{Mq_s}{2(M-1)} \tag{3}$$

q_s는 라시안 페이딩 채널환경에서의 심볼에러율로 K값에 따라 개선된다[16].

$$q_s = \left(\frac{1+K}{1+K+\frac{\rho(d_{\min})^2}{8}}\right)^4 e^{-4\left(\frac{\frac{\rho(d_{\min})^2}{8}(\|H\|)^2}{1+K+\frac{\rho(d_{\min})^2}{8}}\right)} \tag{4}$$

K는 라시안 인자이고 r는 수신 안테나에서 평균 신호대 잡음비를 나타낸다. 그리고 d_{min}은 부호의 최소거리를, H는 $M_R \times M_T$ 채널전달함수인데 $\|H\|^2$는 H의 자승 Frobenius norm을 나타낸다.

3.2. 처리율

전송채널에서 발생되는 비트에러를 고려하여 처리율을 분석하며 단말수 n은 고정되었다고 가정하고 각각의 단말은 항상 전송패킷을 가지고 있다고 가정한다. 다시 말해, 포화조건(saturation condition)상에서 동작한다(예를 들면 전송 버퍼는 항상 비어있지 않음)고 한다. 그리고 채널상에서 비트에러는 q 라는 확률로 랜덤하게 발생된다고 가정한다. 백오프 확률상의 비트에러의 영향이 비트에러율 q 및 aggregated 프레임의 페이로드 길이 L_P 를 기반으로 해서 유도되며 랜덤하게 선정된 슬롯타임 내에서 단말의 패킷 전송확률 τ 가 분석되는데 이 확률은 CSMA/CA메커니즘에는 직접적으로 관련되어 있지 않지만 패킷 에러율 P_e 와 충돌확률에 관련되어 있다. 결국 CSMA/CA기반의 DCF 처리율은 τ 및 q 의 함수로 표현된다[4].

S 를 채널이 페이로드 비트들을 성공적으로 전송하기 위해 사용된 시간의 비율로 계산되는 시스템의 처리율로 정의한다. P_{idle} 을 idle 슬롯의 확률로 하고 P_{tr} 은 슬롯타임에서 적어도 하나의 전송이 발생될 확률로 정할 때 채널상에서 n 개의 단말이 경쟁하고 각 단말이 전송할 확률은 τ 이므로 다음식이 성립된다.

$$P_{tr} = 1 - P_{idle} = 1 - (1-\tau)^n \tag{12}$$

그리고 한 개의 단말만이 채널에 데이터를 전송하므로 충돌이 발생하지 않을 확률을 P_S 라고 하면 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$P_S = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n} \tag{13}$$

충돌이 발생하지 않았지만 전송에러에 의해서 전송이 실패할 확률을 P_{err} 이라고 하면 다음과 같이 구해진다.

$$P_{err} = P_{tr} P_s P_e \tag{14}$$

충돌하지도 않고 전송에러가 없어서 성공적으로 전송될 확률을 P_{succ} 라고 하면 다음과 같다.

$$P_{succ} = n\tau(1-\tau)^{n-1}(1-P_e) \tag{15}$$

그림8의 단방향 전송인 경우에 saturation 처리율은 다음과 같이 계산된다[14,15,17].

$$S = \frac{E_p}{E_t} = \frac{L_p P_{tr} P_s (1-P_e)}{T_{idle} P_{idle} + T_c P_{tr}(1-P_s) + T_e P_{err} + T_{succ} P_{succ}} =$$

$$\frac{L_p n\tau(1-\tau)^{n-1}(1-P_e)}{(1-\tau)^n\sigma + n\tau(1-\tau)^{n-1}(1-P_e)T_{succ} + [1-(1-\tau)^n - n\tau(1-\tau)^{n-1}]T_c + n\tau(1-\tau)^{n-1}P_e T_e} \tag{16}$$

www.dbpia.co.kr

E_p는 가상 타임슬롯에 성공적으로 전송된 페이로드 정보비트 수를 나타내고 E_t는 가상 타임슬롯의 평균길이를 나타낸다. T_{idle}, T_c 및 T_{succ} 는 idle, collision 및 successful 가상 타임 슬롯의 길이를 나타낸다. T_e는 에러 전송 시퀀스에 대한 가상 타임슬롯 길이를 나타낸다. L_p는 aggregated 프레임의 페이로드 길이를 나타낸다. RTS/CTS 기법에서 사용되는 파라메터는 다음과 같다.

$$T_c = T_{RTS} + T_{EIFS} \tag{17}$$

$$T_{succ} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{BACK} + 3T_{SIFS} + T_{DIFS}$$

$$T_e = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{EIFS} + 2T_{SIFS}$$

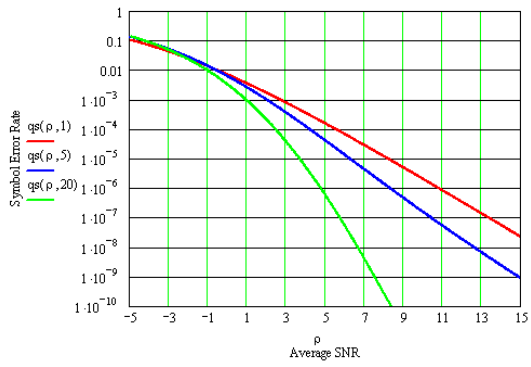
DCF의 처리율을 유도하는데 사용되고 있는 IEEE 802.11n등의 파라메터값은 표1과 같다.

표 1. IEEE 802.11n의 파라메터
Table 1. IEEE 802.11n parameter

파라메터	내 용
FER	프레임 에러율
t	패킷전송확률
n	단말수
n_S	서브프레임의 수
P	서브프레임의 페이로드크기
T_{RTS}	RTS 프레임 전송시간
T_{CTS}	CTS 프레임 전송시간
T_H	PLCP 프리엠블전송시간 + PLCP 헤더전송시간 + MAC 헤더전송시간
T_{DATA}	페이로드전송시간
T_{ACK}	ACK 프레임 전송시간
T_{BACK}	블록 ACK 프레임전송시간
σ	슬롯시간
T_{SIFS}	SIFS 시간
T_{DIFS}	DIFS 시간
T_{EIFS}	EIFS 시간
CW_{min}	최소 backoff 윈도우크기
CW_{max}	최대 backoff 윈도우크기

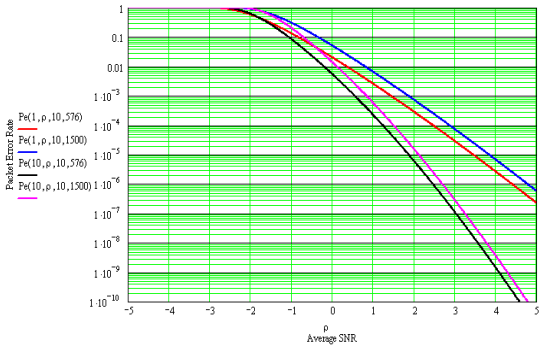
Ⅳ. 패킷에러율 및 DCF 처리율 결과분석

IEEE 802.11n의 MIMO OFDM 기반 무선 LAN의 DCF 처리율 성능을 분석하기 위해서 표 1의 시스템 파라메터를 이용하였다. IEEE 802.11n 의 전송속도는 MCS 인덱스 15중에서 20 MHz 대역의 긴 보호시간간격에 해당되는 130 Mbps로 한다. 패킷 크기는 일반적으로 Web Browsing 데이터인 경우 576 바이트, 이더넷의 최대 데이터 크기는 1,500 바이트 정도 이므로 이를 대표적인 패킷크기로 이용하였다. 그림 10(a)의 $q_s(\rho,K)$는 심볼에러율을 나타내며 그림 10(b)의 $P_e(K,\rho,n_s,P)$는 패킷에러율을 나타낸다. 심볼에러율은 라시안 인자 K가 1,5,20인 경우를 나타내는데 라시안 인자값이 클수록 심볼율 성능이 우수한 것을 알 수 있다. 패킷에러율도 라시안 인자 K의 값이 증가할수록 성능이 개선됨을 알 수 있으며 서브프레임당 페이로드의 크기가 작을수록 성능이 개선됨을 알 수 있다. 그림 11의 $S(K, \rho, n_s,P,n, \tau)$는 라시안 페이딩 채널환경의 DCF처리율을 나타낸다. 그림 11(a)는 서브프레임의 페이로드 크기가 576 바이트, 스테이션의 수가 10, 패킷전송확률이 0.05인 경우의 DCF 처리율을 나타내는데 대부분의 평균 신호 대 잡음비 구간에서 라시안 인자값이 클수록 DCF 처리율 성능이 개선되고 서브프레임의 수가 증가할수록 처리율 성능이 개선됨을 알 수 있다. 그림 11(b)는 그림 11(a)와 비교해서 패킷전송확률이 0.05에서 0.2로 변경된 것 만 제외하고 동일한 조건이며 패킷전송확률이 적을수록 패킷 충돌이 감소되므로 처리율이 개선됨을 알 수 있다. 그림 11(c)는 그림 11(a)의 스테이션의 수 10을 30으로 증가시킨 경우이다. 그림 11(d) 및 그림 11(e)는 서브프레임의 페이로드 크기가 576 바이트 및 1,500 바이트인 경우의 처리율을 비교한 것인데 서브프레임의 페이로드 크기가 클수록 처리율 성능이 개선됨을 알 수 있다.



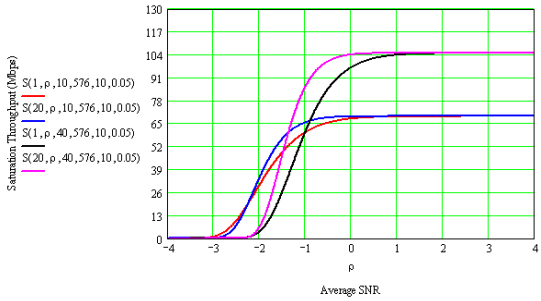
(a) 심볼에러율

www.dbpia.co.kr

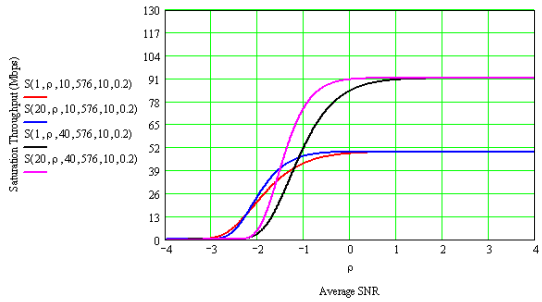


(b) 패킷에러율

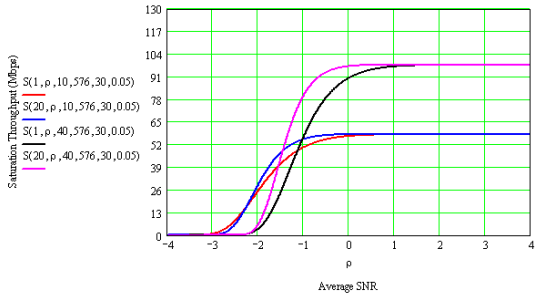
그림10. 라시안 페이딩 채널 환경의 비트에러율 및 패킷에러율
Fig. 10. BER and PER over Ricean fading channel



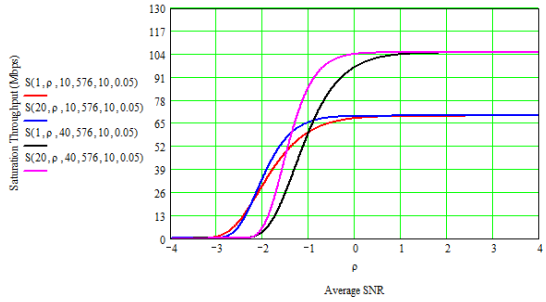
(a) 전송확률이 0.05이고 스테이션수가 10인 경우



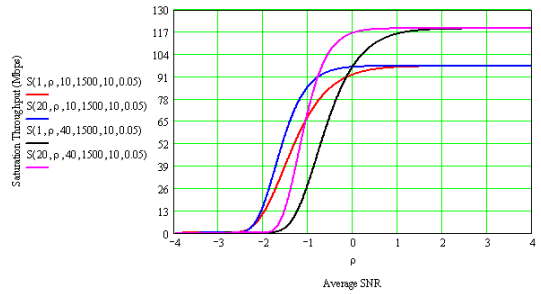
(b) 전송확률이 0.2이고 스테이션수가 10인 경우



(c) 전송확률이 0.05이고 스테이션수가 30인 경우



(d) 서브프레임 크기가 576 바이트인 경우



(e) 서브프레임 크기가 1,500 바이트인 경우

그림11. 라시안 페이딩 채널 환경의 DCF 처리율
Fig. 11. DCF throughput over Ricean fading channel

V. 맺음말

본 논문에서는 IEEE 802.11n 무선 LAN의 라시안 페이딩 채널환경에서 CSMA/CA 기반의 RTS/CTS 기법을 이용하는 MAC 계층의 DCF 처리율을 분석하였다. IEEE 802.11n 무선 LAN의 처리율을 분석하기 위하여 다이버시티 기법인 Alamouti 기법의 적용을 가정하였으며 단말들은 항상 전송할 패킷을 가지고 있다고 하는 포화조건을 가정하였다. 이러한 결과는 무선 LAN이 유선 LAN을 대체한다는 기존의 이용 개념을 넘어 공중 무선망과 댁내 무선망 등으로 그 영역이 점차 넓어지는 시점에서 구내 및 공중 무선 LAN 설계와 구축 업무에 활용될 수 있다. 향후에는 다이버시티 기법외에 SM(Spatial Multiplexing) 기법의 적용도 연구할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Upkar Varshney, "The Status and Future of 802.11-based Wireless LANs," IEEE Computer, Jun. 2003, pp. 102-105.

[2] C. Siva Ram Murthy and B. S. Manoj, "Ad

www.dbpia.co.kr

Hoc Wireless Networks," Prentice Hall, 2004, pp. 172-179.

[3] Carlos de Morais Cordeiro and Dharma Prakash Agrawal, "Ad Hoc & Sensor Networks," World Scientific, 2006, pp. 172-187.

[4] Zuoyin Tang, Zongkai Yang, Jianhua He and Yanwei Liu, "Impact of Bit Errors on the Performance of DCF for Wireless LAN," *IEEE*, pp.529-533, 2002.

[5] Dimitris Vassis, George Kormentzas, Angelos Rouskas and llias Maglogiannis, "The IEEE 802.11g Standard for High data rate WLANs," *IEEE Network*, pp.21-26, May/June, 2005.

[6] Nghia T. Dao and Robert A. Malaney, "Throughput Performance of Saturated 802.11g Networks," *Aus Wireless 2007*, 2007.

[7] Xi Yong, Wei Ji Bo and Zhuang Zhao Wen, "Throughput Analysis of IEEE 802.11 DCF over Correlated Fading Channel in MANET," IEEE , pp. 694-697, 2005.

[8] Giuseppe Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," *IEEE Journalon Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No.3, pp. 535-547, March 2000.

[9] IEEE Std 802.11n 2009 " Part11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Enhancements for Higher Throughput," Oct. 2009.

[10] Eldad Perahia, "IEEE 802.11n Development: History, Process, and Technology," IEEE Communications Magazine, Jul. 2008, pp. 48-55.

[11] Thomas Paul and Tokunbo Ogunfunmi, "Wireless LAN Comes of Age: Understanding the IEEE 802.11n Amendment," IEEE Circuits and Systems Magazine, First Quarter 2008, pp. 31-32, 2008.

[12] Branka Vucetic and Jinhong Yuan, "Space-Time Coding," John Wiley & Sons Ltd, 2003, pp. 91-95.

[13] D.Skordoulis, Q.Ni, H.Chen,A.P. Stephens, C.Liu and A.Jamalipour, "IEEE 802.11n MAC Frame Aggregation Mechanisms for Next-Generation High-Throughput WLANs," *IEEE Wireless Communications*, vol.15, pp.40-47, Feb. 2008.

[14] F.Zheng and J.Nelson, "Adaptive Design for the Packet Length of IEEE 802.11n Networks," in 2008 IEEE Intern. Conf. Communications, Beijing, May 2008, pp.2490-2495.

[15] Y. Lin and V. W. S. Wong, "Frame Aggregation and Optimal Frame Size Adaptation for IEEE 802.11n WLANs," in Proc. *IEEEGLOBECOM*, San Francisco, CA, Nov. 2006.

[16] Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar and Dhananjay Gore, "introduction to Space-Time Wireless Communications," Cambridge University press, 2003, pp. 104.

[17] Ha Cheol Lee, "A MAC Layer Throughput over Error-Free and Error-Prone Channel in The 802.11a/g-based Mobile LAN," MICC 2009, Dec. 2009

이 하 철 (Ha-cheol Lee) 종신회원

1983년 3월 한국항공대 통신공학과 학사
1990년 8월 한국항공대 통신정보공학과 석사
1999년 8월 한국항공대 통신정보공학과 박사
1993년 12월 정보통신기술사
1983년 3월~1985년 6월 ETRI 연구원
1985년 6월~1995년 8월 KT 선임연구원
1995년 9월~현재 유한대학교 정보통신과 교수
2007년 8월~2008년 7월 California State University 방문교수
<관심분야> 홈 네트워킹, 컴퓨터 네트워킹, 무선 LAN 및 PAN

www.dbpia.co.kr