

논문 2010-6-36

# 페이딩 채널에서 순환 지연 다이버시티를 적용한 다중 사용자 MIMO OFDM 시스템의 성능

## Performance of Multi-User MIMO/OFDM System using Cyclic Delay Diversity for Fading Channels

박인환\*, 김윤현\*, 김진영\*<sup>©</sup>

In-Hwan Park, Yoon-Hyun Kim, Jin-Young Kim

요 약 본 논문에서는 802.11n WLAN 시스템에서 우수한 오류성능을 유지하고 시스템 용량을 개선하기 위해 순환 지연 다이버시티와 블록 대각화 프리코딩 기법을 적용한 다중 사용자 MIMO OFDM 시스템을 제안하였다. 순환 지연 다이버시티(CDD : Cyclic Delay Diversity) 기법은 주파수 다이버시티를 이용하여 OFDM 시스템의 성능을 향상시키는 기법이다. 또한 블록 대각화 프리코딩 기법은 다중 사용자 MIMO 채널 환경에서 만들어진 여러 가지 프리코딩 기법 중 하나로 특이값 분해를 이용하여 zero-forcing을 하는 간단한 방법으로 구성되어 있다. 모의실험 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 방법이 기존의 프리코딩을 사용하지 않는 CDD MIMO-OFDM 시스템에 비하여 높은 시스템 용량 성능을 보임을 확인할 수 있다.

**Abstract** As the demand of high quality service in next generation wireless communication systems, a high performance of data transmission requires an increase of spectrum efficiency and an improvement of error performance in wireless communication systems. In this paper, we propose a multi-user multiple-input multiple-output (MIMO) orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system with cyclic delay diversity and block diagonalization precoding method to improve bit error rate (BER) performance with wireless local area network (WLAN) channel model C and D for 802.11n WLAN system. The results of matlab simulation show the improvement of BER performance in 802.11n wireless indoor channel environment.

**Key Words :** CDD(cyclic delay diversity), Block diagonalization, Multi-user MIMO

### I. 서 론

향후 무선 통신 시스템에서 높은 성능이 점점 더 요구됨에 따라 MIMO와 OFDM의 결합 시스템이 등장하게 되었다. MIMO시스템은 독립적인 다중 전송 채널을 가지고 있어서 제한된 주파수 자원에서 시스템 신뢰도를 높이고 안테나 수 만큼 선형적으로 채널용량을 증가시킨

다<sup>[1-3]</sup>. 또한 OFDM은 선택적 페이딩 채널에서 다중 반송파 변조를 사용하여 ISI와 ICI의 영향을 줄이는데 효율적인 기법이다. 그러나 OFDM을 기반으로 하는 시스템들은 시스템 자체의 내부 다이버시티 기능이 없어 성능을 향상시키는데 어려움이 있다. 따라서 주파수 자원을 추가적으로 사용하지 않고 더 높은 신뢰도와 유효성을 얻기 위하여 공간 다이버시티와 같은 여러 가지 다이버시티 기법들이 OFDM 시스템에 적용되고 있다<sup>[4]</sup>.

최근 들어, 블록 대각화와 같은 프리코딩 기법을 이용하여 시스템 용량을 개선하는 다중 사용자 MIMO시스템에 대한 연구가 많이 되고 있다. 블록 대각화는 같은 주

\*광운대학교 전파공학과

© 교신저자

접수일자 2010.5.28 수정일자 2010.11.5

게재확정일자 2010.12.15

과수와 시간에서 다른 사용자들이 전송 할 때 생기는 동일 채널 간섭을 줄이는데 사용된다. 그리고 DPC 복잡도보다 복잡도가 낮으며, 다중 사용자 MIMO 채널을 단일 사용자 MIMO 채널로 바꾼다<sup>[5-6]</sup>.

본 논문에서는 802.11n 시스템을 위한 순환 지연 다이버시티(CDD : Cyclic Delay Diversity) 기법을 적용한 다중 사용자 MIMO OFDM 시스템을 제안한다. 지연 다이버시티(DD : Delay Diversity)는 하나의 신호를 각각 다른 값으로 지연시켜 서로 다른 안테나를 통해 전송하는 송신 다이버시티 기법으로, 수신측에서는 별다른 추가적인 연산없이 적용할 수 있다. 하지만 DD-OFDM 시스템에서 허용 가능한 최대 지연은 CP(Cyclic Prefix)의 길이에 의해 크게 제한된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 CDD를 사용한다. 그리고 동일 채널 간섭 제거와 시스템의 복잡도를 줄이기 위해 블록 대각화를 사용했다. 이는 모의실험을 통해 CDD 기법을 적용함으로써 CDD를 적용하지 않은 MIMO OFDM 시스템보다 큰 시스템 성능의 향상을 가져오는 것을 보인다<sup>[7]</sup>.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 MIMO OFDM 시스템의 블록 대각화와 WLAN 채널 모델에 대해 설명하고, 3장에서는 제안한 CDD를 적용한 다중 사용자 MIMO OFDM에 대해 설명한다. 4장에서는 제안한 시스템 모델의 모의실험 결과를 보여주고, 5장에서는 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

### 1. 다중 사용자 MIMO OFDM시스템의 블록 대각화

본 논문에서는 다중 사용자 MIMO 하향링크 채널 환경에서 K명의 사용자와 하나의 기지국이 존재한다고 가정한다. 기지국은  $N_t$ 개의 안테나를 가지고  $i^{th}$  사용자는  $n_{i,r}$ 개의 안테나를 가진다. 전체 사용자들의 수신 안테

나 개수의 합은  $N_R = \sum_{i=1}^K n_{i,R}$ 와 같이 정의된다. 기지국으로부터  $i^{th}$  사용자로 송신되는 신호를  $L_i$  차원 벡터  $d_i$ 로 하고, 여기에 곱해지는  $N_t \times L_i$  프리코딩 행렬을  $T_i$ 라고 하면  $i^{th}$  사용자의 수신단에서 수신신호  $r_i$ 는 행렬  $H_i$ 로 정의된다. 수신된 행렬  $r_i$ 는 다음과 같이 나타

낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_i &= H_i \sum_{k=1}^K T_k d_k + n_i, \\ &= H_i T_i d_i + \sum_{k=1, k \neq i}^K H_i T_k d_k + n_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $n_i$ 는 백색 가우시안(Gaussian) 잡음이며, 분산은  $E[w_i w_i^*] = \sigma^2 I$ 이다.  $H_i$ 는  $n_{r,i} \times N_t$  채널 행렬로 각각의 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 independent and identically distributed 복수 가우시안 랜덤 분포로 나타난다.

식 1의 두 번째 항은 서로 다른 사용자들이 같은 주파수와 시간대를 사용하는 동일 채널에서 발생하는 간섭을 의미한다. 블록 대각화는 동일 채널 간섭을 제거하는데 효율적이다. 동일 채널 간섭 제거의 조건은 아래와 같다.

$$H_k T_i = 0, \quad \forall i \neq k \quad (2)$$

본 논문에서는 프리코딩 행렬을 찾고 SNR을 추정하기 위해서 기지국이 이미  $\{H_k\}_{k=1}^K$ 을 알고 있다고 가정하였다.

$T_i$ 을 구하기 위해서 사용자  $i$ 의 채널 행렬을 제외한  $(K-1)n_{i,r} \times N_T$  채널 행렬인  $H_i$ 의 빈 공간에 프리코딩 행렬을 삽입한다.  $H_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$H_i = [H_1^T \dots H_{i-1}^T H_{i+1}^T \dots H_K^T]^T, \quad (3)$$

동일 채널 간섭 제거의 조건은 특이값 분해(SVD : Singular Value Decomposition)을 이용함으로써  $H_i$ 의 빈 공간을 찾는 것을 만족해야 한다.  $H_i$ 의 SVD는 아래와 같이 정의된다.

$$H_i = U_i \Delta_i [V_i^1 V_i^0]^*, \quad (4)$$

여기서 \*는 Hermitian 연산을 나타낸다.  $U_i$ 는  $(K-1)n_{i,r} \times (K-1)n_{i,r}$  원전 특이 행렬의 단위 행렬이고,  $\Delta_i$ 는  $(K-1)n_{i,r} \times (K-1)N_T$  대각화 행렬

이다.  $V_i^1$ 와  $V_i^0$ 는 각각  $H_i$ 행렬의 첫  $N_i$  오른쪽 고유 벡터와 마지막  $N_T - N_i$  오른쪽 고유벡터를 의미한다. 그러므로  $V_i^0$ 는  $H_i$  행렬의 영 공간에 속한 하나의 기저 행렬이 된다. 그러나  $N_T - N_i > n_{i,r}$ 인 경우  $V_i^0$ 만으로는 프리코딩 행렬의 차원이 초과될 수 있으므로, 프리코딩 행렬의 차원을 맞추어 주면서 시스템의 용량을 최대화하고 복잡도를 줄이기 위하여 다음과 같은 과정을 거친다. 이를 위해 SVD의  $H_i$ 에  $V_i^0$ 를 곱하면 아래와 같다.

$$H_i \widetilde{V}_i^0 = U_i [\Delta_i \ 0] [V_i^1 \ V_i^0]^* \quad (5)$$

여기서  $V_i^1$ 는  $H_i \widetilde{V}_i^0$  행렬에 의해 생성된  $n_{i,r}$ 차 기저 행렬이 된다. 따라서  $V_i^1$ 와  $\widetilde{V}_i^0$ 을 곱함으로써  $n_{i,r}$  차원의 직교 기저 벡터를 생성할 수 있다. 그러므로 다음과 같은 형태로 프리코딩 행렬을 결정하면 된다.

$$T_i = \widetilde{V}_i^0 V_i^1 \quad (6)$$

$T_i$ 는 동일 채널 간섭 제거의 조건을 만족하는 식 6에 의해 계산된다.

## 2. WLAN 채널 모델

WLAN 채널 모델은 Medbo et al.에 의해 제안되었다 [8-9]. [8]에 의하면 다섯 개의 delay profile 모델이 각각 다른 환경에서 제안되었다.(모델 A-E)

- 1) 모델 A는 전형적인 사무환경에서의 모델로 NLOS 특성을 지니고 50ns rms 지연 확산 된다.
- 2) 모델 B는 넓은 개방된 공간과 사무환경에서의 모델로 NLOS 특성을 지니고 100ns rms 지연 확산 된다.
- 3) 모델 C는 넓은 개방된 공간(실내 및 실외)에서의 모델로 NLOS 특성을 지니며 150ns rms 지연 확산 된다.
- 4) 모델 D는 모델 C와 같은 환경에서 LOS 특성을 지니고 140ns rms 지연 확산 된다
- 5) 모델 E는 넓은 개방된 공간(실내 및 실외)에서 NLOS 특성을 지니며 250ns rms 지연 확산 된다.

각 채널모델은 표 1에 구분되어 나타내었다. 그리고 각 모델의 중단점 거리  $d_{BP}$ 는 아래와 같다<sup>[10]</sup>.

$$\begin{aligned} L(d) &= L_{FS}(d), & d \leq d_{BF}, \\ L(d) &= L_{FS}(d_{BP}) + 35 \log_{10}(d/d_{BP}), & d > d_{BP} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $d$ 는 송·수신단 사이의 거리이다. 경로 손실 모델 파라미터는 표 1에 나타나 있다. 표에서 로그 정규화 음영 페이딩의 표준 편차 또한 포함되었다. 평균이 0인 가우시안 확률분포는 아래와 같다.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

표 1. 경로 손실 모델 파라미터  
Table 1. Path loss model parameters

New Model	$d_{BP}$ (m)	Shadow fading std. dev. (dB) before dBP (LOS)	Shadow fading std. dev. (dB) after dBP (NLOS)
A	5	3	4
B	5	3	4
C	5	3	5
D	10	3	5
E	20	3	6
F	30	3	6

## III. 순환 지연 다이버시티를 적용한 다중 사용자 MIMO OFDM 시스템

이번 장에서는 제안한 CDD를 적용한 다중 사용자 MIMO OFDM 시스템을 설명한다. 제안한 시스템의 블록도는 그림 1과 같다.

기지국의 전송 신호는 컨벌루션 부호화기, 변조, IFFT, 보호구간 삽입, 프리코더를 통해 전송된다. 프리코더 신호는 기지국의 각 안테나에서 더해진다. 프리코딩 행렬은 각 사용자를 추정된 다음 기지국으로 피드백하는 채널 행렬을 사용함으로써 계산된다. 그리고 순환지연은 CDD를 적용할 수 있는 OFDM 심볼의 모든 부분에서 발생한다. 주파수 공간 다이버시티를 얻기 위해서 주파수 공간 코드 기법들이 사용되었다.

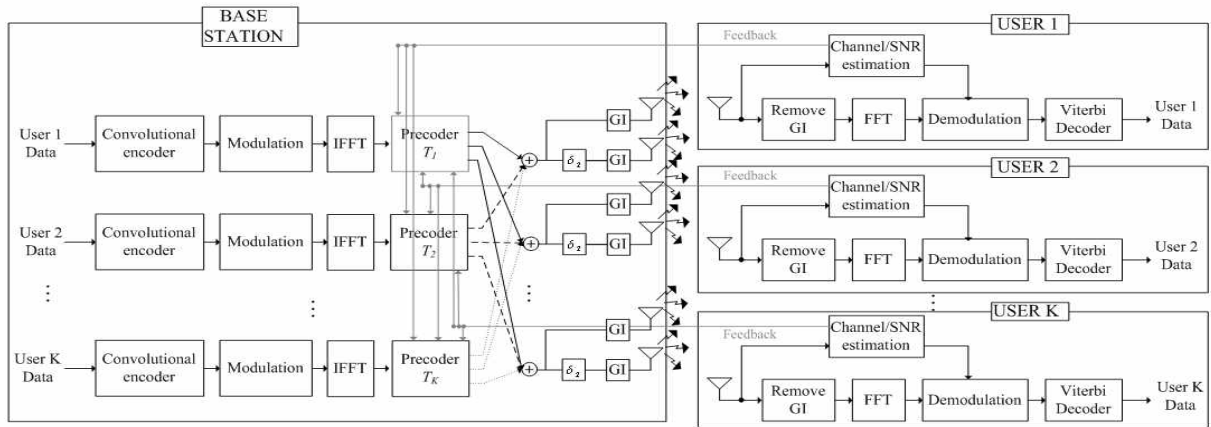


그림 1. CDD를 적용한 다중 사용자 MIMO OFDM 시스템  
Fig. 1. Multi-User MIMO OFDM system with CDD

본 논문에서 제안한 기법은 수신기 측면에서 진행되며, 진행과정은 기지국의 역 과정으로 수행된다. 그리고 각 사용자들은 채널 추정을 수행하고 기지국으로 채널 상태 정보를 전송한다. 본 논문에서는 사용자와 기지국이 이미 완벽한 채널 상태 정보를 알고 있다고 가정하였다.

#### IV. 실험 및 결과

모의실험 파라미터는 아래 표 2와 같고 WLAN 채널 모델에 따른 오류 성능을 실험하였다. 이에 따른 전송 신호는 802.11n WLAN 실내 채널 모델 C와 D를 통해 전송하였으며, 기지국과 사용자는 채널 상태정보를 완벽히 알고 있다고 가정하였다. 각 사용자는 하나의 안테나를 사용하며 총 사용자의 수는 2명이고 기지국의 안테나 수도 또한 2개이다. 만약 사용자의 다수의 안테나를 사용하면 높은 BER 성능을 얻을 수 있는 반면에 시스템 복잡도가 증가하게 된다.

표 2. 모의실험 파라미터  
Table 2. Simulation parameters

Channel	WLAN channel model C and D
Modulation	QPSK, 16QAM
Channel coding	Convolution coding 1/2, 3/4
Number of users	4 (multi-user)
Number of each user's antennas	1
Number of base station's antennas	4 (multi-user)
FFT point	64

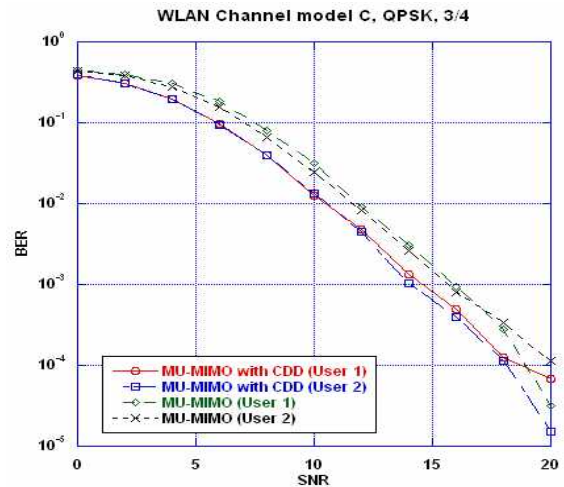


그림 2. 채널 모델 C에서의 BER 성능  
Fig. 2. BER performance with channel model C

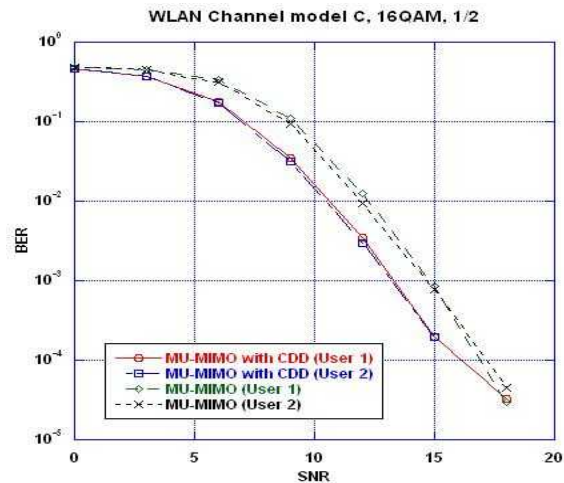


그림 3. 채널 모델 C에서의 BER 성능  
Fig. 3. BER performance with channel model C

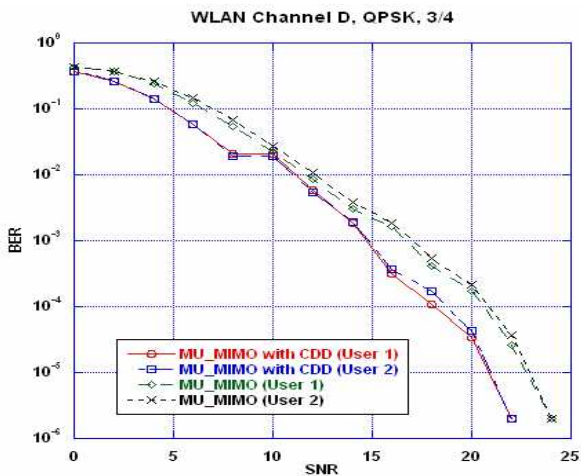


그림 4. 채널 모델 D에서의 BER 성능  
Fig. 4. BER performance with channel model D

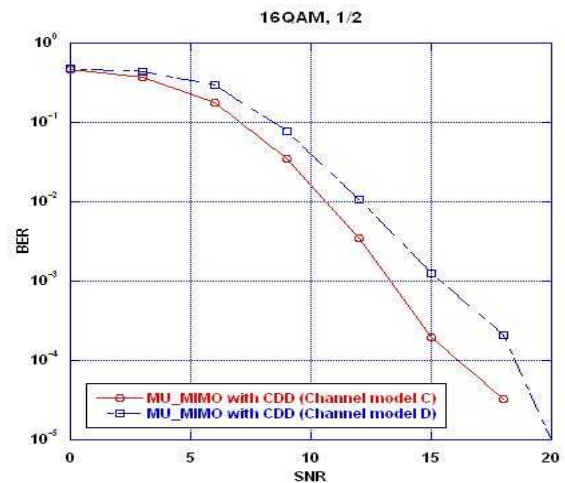


그림 7. 채널 모델 C와 D에서의 BER 성능  
Fig. 7. BER performance with channel model C and D

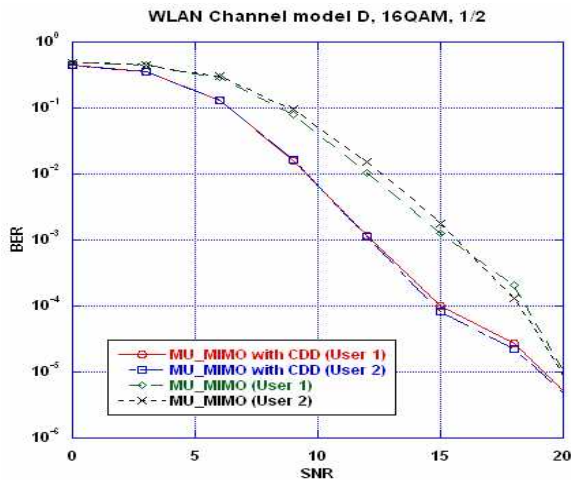


그림 5. 채널 모델 D에서의 BER 성능  
Fig. 5. BER performance with channel model D

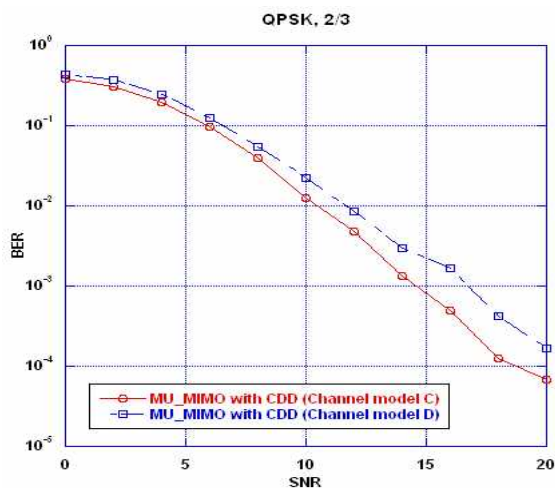


그림 6. 채널 모델 C와 D에서의 BER 성능  
Fig. 6. BER performance with channel model C and D

그림 2에서 5까지의 각각의 그래프는 변조 기법과 채널 모델에 따른 CDD를 적용한 다중 사용자 MIMO 시스템과 적용하지 않은 다중 사용자 MIMO 시스템의 성능을 비교하여 보여준다. 그림 2와 3을 통해 채널 모델 C를 사용하였을 때 CDD를 적용하여 약 2 ~ 3dB 정도의 이득을 얻었음을 확인할 수 있다. 이와 마찬가지로 그림 4와 5에서도 채널 모델 D를 통해 전송하였을 때 CDD를 적용한 시스템의 우수한 성능을 확인할 수 있다. 마지막으로 그림 6과 7은 채널 모델 C와 D를 통해 전송하였을 때 채널 모델에 따른 BER 성능 차이를 보여준다.

## V. 결론

다중 사용자 MIMO OFDM 시스템은 주파수 자원이 한정되어 있는 무선 통신 시스템에서 스펙트럼 효율을 높이는데 많이 사용된다. 그래서 본 논문에서는 WLAN 실내 채널 환경 모델 C와 D에서의 CDD 기법과 블록 대각화 프리코딩 기법을 적용한 다중 사용자 MIMO OFDM 시스템을 제안하고 BER 성능을 분석하였다. 모의실험 결과로부터 기존의 다중 사용자 MIMO OFDM 시스템과 비교하였을 때 제안한 시스템이 더 좋은 성능을 얻을 수 있음을 확실히 알 수 있다. 이를 통해 본 논문의 결과는 고속 WLAN과 무선 멀티미디어 통신시스템에 응용이 될 수 있을 것이라 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. Jankiraman, Space-Time Codes and MIMO Systems, Artech House Publishers, 2004.
- [2] D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge University Press, 2005.
- [3] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 21, no. 5, June 2003, pp. 684-702.
- [4] L. Hanzo, M. Munster, B. J. Choi, and T. Keller, OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting, John Wiley & Sons, 2003.
- [5] C. Windpassinger, R. F. H. Fischer, T. Vencel, and J. B. Huber, "Precoding in multi-antenna and multi-user communications," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 3, no. 4, July 2004, pp. 1305-1316.
- [6] Q. H. Spencer, C. B. Peel, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "An introduction to the multi-user MIMO downlink," IEEE Commun. Mag., vol. 42, no. 10, Oct. 2004, pp. 60-67.
- [7] G. Bauch and J. Shamim Malik, "Parameter optimization, interleaving and multiple access in OFDM with cyclic delay diversity," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 1, pp. 505 - 509, May. 2004.
- [8] J. Medbo and P. Schramm, "Channel models for HIPERLAN/2," ETSI/BRAN document no. 3ERI085B.
- [9] J. Medbo and J-E. Berg, "Measured radiowave propagation characteristics at 5 GHz for typical HIPERLAN/2 scenarios," ETSI/BRAN document no. 3ERI084A.
- [10] V.J. Rhodes, "Path loss proposal for the IEEE 802.11 HTSG channel model Ad Hoc group," April 22, 2003.

## 저자 소개

박 인 환(정회원)



- 2010년 2월: 광운대학교 전자공학과 공학사
- 2010년 3월~현재: 광운대학교 전자공학과 석사과정
- <주관심분야: 디지털통신, 무선통신, 디지털 방송 전송 기술>

김 윤 현(정회원)



- 2006년 2월: 광운대학교 전자공학과 공학사
- 2006년~2008년: 광운대학교 전자공학과 석사
- 2008년~현재: 광운대학교 전자공학과 박사과정

<주관심분야: 디지털 통신, 협력통신, Cognitive Radio>

김 진 영(정회원)



- 1998년 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2000년 미국 Princeton University, Research Associate
- 2001년 SK 텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2001년~현재 광운대학교 전자공학과 부교수

2009년~2010년 2월 미국 MIT 공대 Visiting Scientist

<주관심분야: 디지털통신, 무선통신, 채널부호화>