

게임이론을 이용한 OFDM 시스템의 전력제어

준희원 이령경*, 조해근*, 고은경*, 임연준*, 정희원 황인관*, 송명선**

Game Theory based Power Control for OFDM System

Ryoung-kyoung Lee*, Hae-keun Cho*, Eun-kyoung Ko*, Yeon-jun Lim* *Associate Members*,
In-kwan Hwang*, Myung-sun Song** *Regular Members*

요약

본 논문에서는 CR(Cognitive Radio)의 가장 적합한 인공지능 기술로 주목받고 있는 게임이론을 전력 제어 방식에 적용해 OFDM 시스템 기반의 사용효율과 효용에 대한 성능 평가 결과를 제시하였다. 사용자와 네트워크 동시 최적화를 위한 효용함수식을 정의했으며 모의실험을 통해 FOM(Figure of Merit)과 형평성(Fairness)에서 기존의 전력제어 방식보다 월등한 성능을 입증 하였다. 또한 게임이론을 이용한 전력 제어 방식은 통신 환경을 인지하고 연산하여 적합한 최적의 서비스를 제공하는 CR의 여러 분야에 확장 적용 가능성을 제시하였다.

Key Words : Game Theory, Cognitive Radio, OFDM, Power Control, Nash Equilibrium

ABSTRACT

In this paper, the Game Theory based power control for OFDM system is studied, which has attained intensive interest as a core artificial intelligent technology for Cognitive Radio and its efficiency is evaluated using performance metrics such as system throughput and fairness. Utility Function for joint user centric and network centric power control is defined and simulation results show that game theory based power control is far better than closed loop power control. The contribution of this paper is to formalize the game theory based power control toward the Cognitive Radio that recognizes and adapts to the radio communication environments.

I. 서론

제 4세대 이동통신 시스템이 기존의 다양한 통신 시스템들을 수용해야하는 통합망으로 발전하고 있다. 이런 다양한 통신 환경에 효율적인 단말로서는 인지 기능이 부여된 CR(Cognitive Radio)이 연구되어야 할 것이며 고갈되어 가는 주파수 자원의 개발 측면뿐만 아니라 실질적인 유무선 통합을 이루기 위해서는 보다 완전한 CR 개발이 선행되어야 할 것이다. CR의 일차적인 응용분야로 RRM(Radio Resource

Management)을 예로 들 수 있다. RRM은 일반적으로 spectrum pooling 기능을 기본으로 하고 있으며, 이를 효율적으로 수행하기 위하여 전력 제어를 수반한다.

CR의 가장 적합한 인공지능 기술로 주목받고 있는 게임이론을 GPRS 및 CDMA 시스템에 적용한 논문들이 발표되었다. Nan Feng은 CDMA 시스템을 기반으로 사용자관점에서 이득과 네트워크 관점에서 이득 분석에 게임이론을 적용해 최적화하는 방법을 분석하였다^[1]. Samir Ginde는 게임이론을 적용한 GPRS 시스템에 대한 링크제어를 분석하였다^[2].

※ 이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원 및 한국전자통신연구원의 위탁연구비 지원에 의하여 연구되었음.

(This work was supported by the research grants of the Chungbuk National University in 2005, and Electronics and Telecommunication Research Institute.)

* 충북대학교 전자공학과 ({rkle, chohk, goek, yjlim, ikhwang}@chungbuk.ac.kr), ** 한국전자통신연구원 (mssong@etri.re.kr)
논문번호 : KICS2007-01-007, 접수일자 : 2007년 1월 9일, 최종논문접수일자 : 2007년 3월 22일

본 연구에서는 게임이론을 적용한 전력 제어를 OFDM 방식을 사용하는 WLAN 802.11a를 기반으로 성능을 분석하였다. 사용자와 네트워크의 동시 최적화를 위한 수식을 정의해 기존의 전력제어 방식에 비해 성능이 향상됨을 보였다.

II. 게임이론 기반 전력제어 알고리즘

2.1 게임이론

게임이론은 경쟁주체가 상대방의 행동을 고려하며 자신의 이익을 효과적으로 달성하기 위한 수단을 합리적으로 선택하는 행동을 수학적으로 분석하는 이론이다. 이 게임이론은 2차 세계대전 이후 급속히 발전하면서 전쟁은 물론 국내외 정치, 경제, 경영과 우리 일상생활에도 폭넓게 적용돼 왔다. 이처럼 게임 이론이 자리 매김을 하는데 Nash가 제안한 Nash Equilibrium이 중요한 촉매 역할을 했다. 그는 경쟁관계에 있는 개인, 기업, 혹은 조직들이 동시에 결정을 내려야 하는 경우에 대한 분석에 초점을 맞추어 자신의 선택이 어떻게 상대방의 결정에 영향을 미치고 역으로 상대방의 전력이 자신에게 어떤 영향을 미치는가를 감안해 게임 참여자가 결정을 내리는지를 이론적으로 설명했다. 이런 과정을 통해 참여자들이 모두가 상대방이 내린 결정 선택 하에서는 자신의 선택이 최선이라고 여기는 결과에 이르면 이를 Nash Equilibrium에 도달했다고 지칭된다.

2.2 게임이론의 적용

각 단말기의 목적은 적은 송신전력으로써, 사용 효율(throughput)을 최대로 하는 것이다. 높은 전력 소비는 배터리의 수명을 감소시키고, 결국 다른 co-channel 링크에 간섭을 일으키게 된다. 그리하여 식(1)과 같이 효용함수(utility function)를 정의하였다. 식(1)은 송신전력을 크게 사용할수록 사용효율은 증가하고 또한 이에 따른 페널티(penalty)도 증가하도록 이루어졌다.

$$U_i(P, \gamma_i) = \frac{T_i}{P_i} - KP_i^q \quad (1)$$

첫 번째 항은 SINR(signal to ratio)에 따른 사용효율을 나타낸 것이다. 단말기 i 송신전력을 P_i , 사용효율을 T_i 로 표시한다. 두 번째 항은 페널티 함수(penalty function)를 나타낸 것으로 단말기 i 에

할당된 송신전력 P_i 의 함수가 된다. 인덱스 q 는 송신전력의 과다 사용에 대한 페널티를 지수로 나타낸 것이다. 각 단말기들은 자신의 사용효율을 최대로 하기 위해 송신전력을 키우려는 반면 다른 사용자에 미치는 간섭에 대한 페널티 항의 값에 따라 최적화된 효용함수를 얻게 된다.

2.3 NE (Nash Equilibrium)로의 수렴 방법

단말기 i 는 다른 링크의 간섭이 증가함에 따른 코스트를 고려하여 송신전력을 증가시킴으로 사용효율이 최대가 되도록 시도한다. 또한 각 단말기들은 전력레벨과 부호율에 대한 선택권을 갖고 있다. 단말기 i 의 전력 레벨 집합 $P_i = \{p: p \in [P_{i,max}, P_{i,min}]\}$ 는 연속적이며 또한 닫혀 있다. 부호율 집합은 이산적이라고 가정한다. 이 두 가지의 파라미터의 선택은 각 단말기 i 의 action pair A_i 를 구성하고, 식(2)처럼 표현한다.

$$A_i = \{(P_i, \gamma_i) | P_i \in [P_{i,min}, P_{i,max}], \gamma_i \in \{\gamma_1 \sim \gamma_8\}\} \quad (2)$$

γ_i 는 SINR값으로 WLAN 802.11a의 부호율에 따라 8가지로 구성된다.

• 1 단계

각 사용자 $i \in I$ 는 이전 게임에서 주어진 $(P_j)_{j \in I \setminus \{i\}}$ 와 2 단계의 γ_i , $P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max}$ 을 기반으로, 식(3)으로부터 송신전력을 갱신시키며, 처음의 초기 상태 전력은 $(P_j)_{j \in I}$ 로 가정한다. 사용자 i 의 최적화 루틴 결과는 사용자 $(i+1)$ 의 루틴에 초기 조건으로 이용된다.

$$P_{i,eqm} = \max_{P_i} U_i(P_i, P_{-i}, \gamma_i), \quad i \in I \quad (3)$$

• 2 단계

P_{eqm} 이 찾아지고 나면, 식(3)를 이용하여 γ 을 찾는다.

$$\gamma_{i,eqm} = \arg \max_{\gamma_i} U_i(\gamma_i, P_{eqm}), \quad i \in I \quad (4)$$

• 게임의 종료

$n-1$ 번째 루프와 n 번째 루프의 마지막을 포함하는 $(A_j)_{j \in I}$ 에 변화가 무시할 정도로 작으면, NE로 수렴하는 것으로 보고 게임을 종료시킨다.

III. OFDM 시스템에서의 게임이론 기반 전력제어

모의실험은 5GHz 대역의 U-NII(Unlicensed N-II) 밴드에 OFDM을 사용한 WLAN 802.11a을 기반으로 하였다³⁾. 표 1에 변조방식에 따른 부호율을 나타내었다. NBPSC는 반송파 당 부호화된 비트 수를 의미하며 NCBPS는 OFDM 심볼 당 부호화된 비트수, NDBPS는 심볼 당 데이터 비트수를 나타낸다. 표 2에 WLAN 802.11a 의 부반송파수 및 심볼 주기 등 모의실험에 쓰인 파라미터를 나타내었다.

표 1. Rate-dependent parameters

Data Rate	Modulation	Coding rate	NBPSC	NCBPS	NDBPS
6 Mbit/s	BPSK	1/2	1	48	24
9 Mbit/s	BPSK	3/4	1	48	36
12 Mbit/s	QPSK	1/2	2	96	48
18 Mbit/s	QPSK	3/4	2	96	72
24 Mbit/s	16QAM	1/2	4	192	96
36 Mbit/s	16QAM	3/4	4	192	144
48 Mbit/s	64QAM	2/3	6	288	192
54 Mbit/s	64QAM	3/4	6	288	216

표 2. Timing related parameters

Parameter	Value
N _{SD} : Number of data subcarriers	48
N _{SP} : Number of pilot subcarriers	4
N _{ST} : Number of subcarriers, total	52
Δ _F : Subcarrier frequency spacing	0.3125 MHz
T _{FFT} : IFFT/FFT period	32μs
T _{PREAMBLE} : PLCP preamble duration	16μs
T _{SIGNAL} : duration of the SIGNAL BPSK-OFDM symbol	4.0μs
T _{GI} : Guard Interval duration	0.8μs
T _{GI2} : Training symbol Guard duration	1.6μs
T _{SYM} : Symbol interval	4μs
T _{SHORT} : short training sequence duration	8μs
T _{LONG} : long training sequence duration	8μs

$$T_i(a_i, p) = \frac{L}{M} R f(\gamma_i(a_i, p)) \quad (5)$$

$$f(\gamma_i(a_i, p)) = [1 - 2\text{BER}(\gamma_i(a_i, p))]^M \quad (6)$$

단말기 i 의 사용효율을 식 (5)와 같이 정의할 수 있다. M 은 프레임의 데이터 비트수를 나타내고, L 은 프레임의 정보 비트수이다. R 은 전송률이고, $f(\cdot)$ 은 효율함수이며 앞서 구한 BER 성능곡선을 통해 구했다¹⁾.

식(7)과 식(8)의 프레임의 데이터 비트수를 나타내는 M 과 정보 비트수를 나타내는 L 의 값을 얻기

위한 식이다. 표 2의 timing related parameter를 통해 T_M 과 T_L 를 얻는다. 식(9)는 사용효율식에 T_M 과 T_L 을 대입해 얻은 식이다.

$$T_M = T_{\text{preamble}} + T_{H,PHY} + T_{\text{sym}} \times \text{ceil} \left(\frac{16 + 6 + 8 \times 28 + 8 \times L_{\text{DATA}}}{N_{\text{DBPS}}} \right) \quad (7)$$

$$T_L = T_{\text{sym}} \times \text{ceil} \left(\frac{8 \times L_{\text{DATA}}}{N_{\text{DBPS}}} \right) \quad (8)$$

$$T_i(a_i, p) = \frac{L}{M} R_i [1 - 2\text{BER}(\gamma_i(a_i, p))]^M = \frac{T_L}{T_M} R_i [1 - 2\text{BER}(\gamma_i(a_i, p))]^M \quad (9)$$

WLAN 802.11a의 프레임 구조 중 Header 신호는 BPSK 1/2 변조 방식을 이용하고, ACK 신호는 Data 신호에 맞춰 8가지의 변조 방식을 이용한다³⁾. 그러므로 식 (9)의 효율함수 식은 Header, Data, ACK 신호로 나뉘어 정의되어야 한다.

$$T_i(a_i, p) = \frac{T_L}{T_M} R_i [1 - 2\text{BER}(\gamma_i(a_i, p))]_{\text{BPSK}}^{l_1} \times [1 - 2\text{BER}(\gamma_i(a_i, p))]_{\text{Modulation}}^{l_2 + l_3} \quad (10)$$

$$l_1 = 24 \text{ bits} \quad (11)$$

$$l_2 = \text{ceil} \left(\frac{16 + 6 + 8 \times 28 + 8 \times L_{\text{DATA}}}{N_{\text{DBPS}}} \right) \times N_{\text{DPBS}}$$

$$l_3 = \text{ceil} \left(\frac{16 + 6 + 8 \times 14}{N_{\text{DBPS}}} \right) \times N_{\text{DBPS}}$$

식 (11)에 l_1 은 Header, l_2 는 Data, l_3 은 ACK 비트수를 나타낸다.

모의실험에서는 주파수 재사용률을 1로 가정하였으며, 17개의 BS와 17명의 사용자를 갖고 각 BS마다 1명의 사용자를 할당하는 시스템을 가정했다. 17명의 사용자마다 자신의 효율을 최대화 할 수 있는 송신전력과 변조방식을 선택하도록 설계하였다. WLAN 802.11a의 목표 BER 10^{-5} 을 만족하는 S/N 비 값으로 최소 수신 감도를 구한다. 식(12)의 송신 전력과 수신 전력의 관계식으로, 이를 이용해 최소 수신 감도를 만족하는 셀 반경 d 을 구할 수 있다.

$$P_R \text{ [dB]} = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) + 10 \log P_T + 10 \log G_T + 10 \log G_R \quad (12)$$

d 는 단말기의 위치에 따른 BS와의 거리, P_R 은 수신전력, P_T 는 송신전력, G 는 안테나 이득을 의미한다. 표 3에 각 변조방식에 따른 최소 수신 감도와 셀 반경을 정리하였다.

게임이론의 적용을 통해 사용자는 각 링크에서 다른 링크의 간섭이 증가함에 따른 코스트를 고려하여 송신전력을 증가함으로써 사용효율이 최대가 되도록 시도한다. 식(14)의 T_i 는 사용자의 사용효율을 나타내고, T_{ref} 는 기준 사용효율로 시스템의 최소 사용효율과 최대 사용효율의 평균값이다. P_i 는 사용자의 전력을 의미하며, P_{max} 은 최대 출력 전력으로 40mW이고, P_{ref} 는 변조 방식에 따른 최소 수신 감도를 만족하는 기준 송신전력이다. l, k, q 는 가변적인 값이므로 범위를 정해놓았다. 즉 단말기 i 가 T_{ref} 와 P_{ref} 보다 큰 값으로 송신을 원하는 경우에는 다른 링크 간섭에 대한 페널티를 감수해야한다.

표 5. 변조 방식에 따른 셀 반경

Data rate	Rx power(P_R)	Distance[m]
6 Mbit/s	-98 dBm	2400 m
9 Mbit/s	-95 dBm	1700 m
12 Mbit/s	-95 dBm	1700 m
18 Mbit/s	-92 dBm	1200 m
24 Mbit/s	-89 dBm	850 m
36 Mbit/s	-85 dBm	540 m
48 Mbit/s	-81 dBm	340 m
54 Mbit/s	-80 dBm	300 m

$$U_i = \left(\frac{T_i}{(P_i/P_{max})^l} \right) - \lambda_0 \left(\frac{T_i}{T_{ref}} \right)^k \left(\frac{P_i}{P_{ref}} \right)^q \quad (14)$$

($0 \leq l \leq 1, 0 < k \leq 1, 1 \leq q$)

IV. 모의 실험 결과

성능 평가 지수(Figure of Merit)를 정의하였다. FOM1은 사용 전력 당 시스템 사용효율의 링크에 의해 소비된 최고전력의 부분합에 대한 비율이다. FOM2은 효용의 합이고 FOM3은 시스템 사용효율이다.

$$FOM1: \frac{\sum_i T_i}{\sum_i P_i/P_{max}} \quad (15)$$

$$FOM2: \sum_i U_i \quad (16)$$

$$FOM3: \sum_i T_i \quad (17)$$

형평성 평가를 Shannon의 균등도 지수로 표현하면 다음과 같다. Shannon 지수는 0과 최대 1의 값을 갖는다. 완벽하게 균등하면 1의 값을 갖고 0은 독점영역을 나타낸다.

$$E_H = \frac{H}{\max H} \quad (18)$$

여기서 $H = -\sum q_i \log(q_i)$ 이고 $\max H = \log N$ 이다. N 명의 사용자의 사용효율 $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$, 사용자 i 의 사용효율은 $q_i = (T_i / \sum T_i)$, $(\sum_{i=1}^N q_i = 1)$ 로 정의한다.

각각의 사용자는 자신의 성능을 최대로 하면서 페널티 요소에 의해 전체 네트워크의 최적화를 이루도록 설계하였다.

FOM1, FOM2, FOM3을 통해서 성능 평가 하였다. 그림 1에서 3은 전력 제어를 하지 않고 송신한

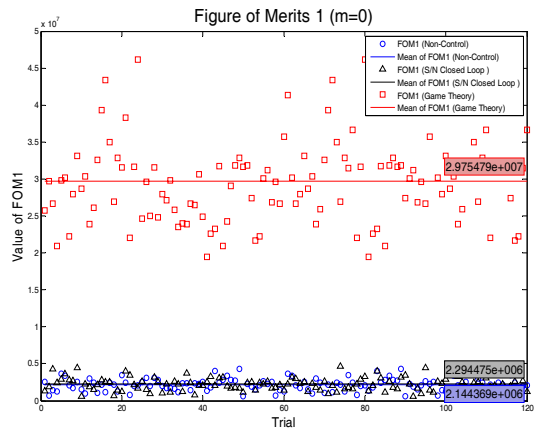


그림 1. 게임이론 성능 평가 (FOM1)

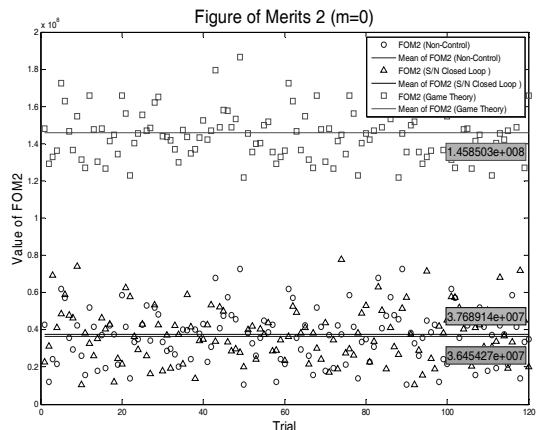


그림 2. 게임이론 성능 평가 (FOM2)

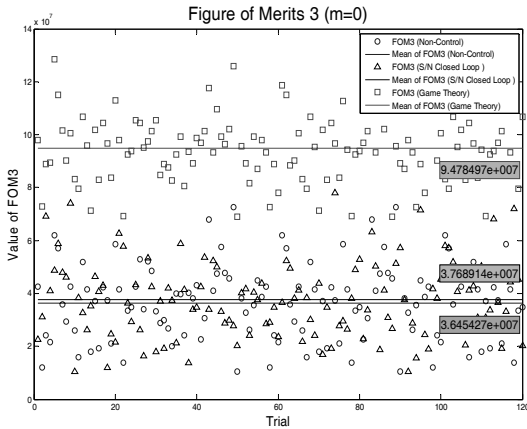


그림 3. 게임이론 성능 평가 (FOM3)

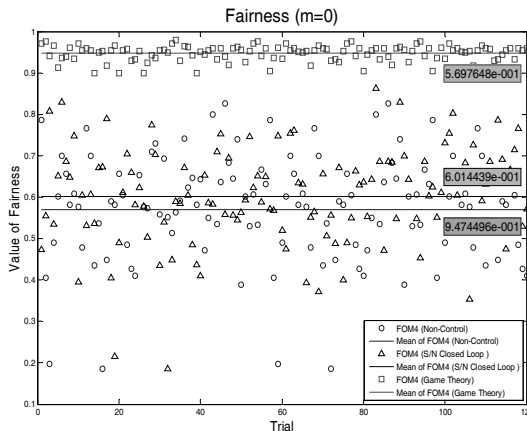


그림 4. 게임이론 성능 평가 (Fairness)

경우, 기존의 연구결과로서 S/N기준의 페루프 전력 제어 방식을 적용한 경우, 그리고 제한한 게임이론으로 최적화한 경우를 도시하고 있으며, 모든 FOM의 경우에 있어서 게임이론이 월등히 개선된 효율을 나타내고 있다.

형평성의 평가를 알아보면, 그림 4의 결과는 전력 제어를 하지 않은 경우, S/N기준의 페루프 전력 제어 방식을 적용한 경우, 그리고 게임이론으로 최적화한 경우에 대한 균등도 지수를 도시하고 있으며, 게임이론은 거의 완전한 형평성을 보이고 있다.

V. 결론

각 사용자들은 자신의 사용효율을 최대로 만드는 변조방식과 부호율을 선택하면서 페널티의 값에 따라 다른 사용자에게 간섭이 크게 되면 자신의 송신 전력을 줄이는 단계를 수행하게 된다. 그러면서 전

체 17명의 사용자는 각각의 최적화를 이루며 동시에 네트워크 효율의 최적화도 이루게 된다. 이런 전력 제어를 그 값의 변화가 거의 없을 때까지 수행하여 NE를 이루게 된다. 성능평가는 120번의 다른 경우를 발생 시켜 신뢰성을 높였다. 각 경우에 대한 결과를 그림1에서 4까지 도시하였다. 기존의 S/N기준의 페루프 전력제어 방식을 적용한 경우보다 향상된 성능을 보여주고 있다.

본 논문에서는 WLAN에서의 OFDM 게임이론 전력 제어에 대한 성능 분석을 하였으나 이를 이용하여 WRAN 채널 환경 및 CR의 여러 다양한 분야에서도 확장 적용 가능성을 보여주고 있다.

참고 문헌

- [1] Nan Feng, "Joint Network-Centric and User-Centric Radio Resource Management in a Multicell System ", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 7, pp 1114-1118, Jul. 2005.
- [2] Samir Ginde, James Neel, R. Michael Buehrer, "Game Theoretic Analysis of Joint Link Adaptation and Distributed Power Control in GPRS ", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.2, pp. 732-737, Oct. 2003.
- [3] IEEE 802.11a: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer specifications: High Speed Physical Layer in the 5GHz.
- [4] Cem U.Saraydar, Narayan B.Mandayam, David J. Goodman, "Efficient Power Control via Pricing in Wireless Data Networks ", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 2, pp. 291-303, Feb. 2002.
- [5] Nan Feng, Siun Choun Mau, Narayan B.Mandayam, "Pricing and Power Control for Joint Network-Centric and User-Centric Radio Resource Management ", *IEEE Trans. Commun.* vol. 52, no. 9, pp 1547-1557, Sep. 2004.
- [6] Chi Wan Sung, Wing Shing Wong, "A Noncooperative Power Control Game for Multirate CDMA Data Networks ", *IEEE Trans. wireless Commun.*, vol. 2, no. 1, pp 186-194, Jul. 2003.

이 령 경 (Ryoung-kyoung Lee) 준회원



2006년 2월 : 충북대학교 전기전
자컴퓨터 공학부 졸업
2006년 3월 : 충북대학교 대학원
전파공학과 재학
<관심분야> Cognitive Radio,
MIMO, UWB

임 연 준 (Yeon-jun Lim) 준회원



2006년 2월 : 충북대학교 전기전
자컴퓨터 공학부 졸업
2006년 3월 : 충북대학교 대학원
전파공학과 재학
<관심분야> RFID, Cognitive
Radio, MIMO

조 해 근 (Hae-keun Cho) 준회원



2006년 2월 : 충북대학교 전기전
자컴퓨터 공학부 졸업
2006년 3월 : 충북대학교 대학원
전파공학과 재학
<관심분야> Cognitive Radio,
OFDM, RFID

황 인 관 (In-kwan Hwang) 정회원



1979년 2월 : 이주대학교 전자공
학과 졸업
1990년 6월 : Polytechnic Univer-
sity, E.E, Dep 박사
1997년 3월 : 한국전자통신연구원
위성망 연구실장 책임연구원
1997년 3월~현재 : 충북대학교 전
기전자컴퓨터공학부 교수
<관심분야> WiBro, UWB, Cognitive Radio

고 은 경 (Eun-kyoung Ko) 준회원



2006년 2월 : 충북대학교 전기전
자컴퓨터 공학부 졸업
2006년 3월 : 충북대학교 대학원
전파공학과 재학
<관심분야> MIMO, UWB,
Cognitive Radio

송 명 선 (Myung-sun Song) 정회원



1984년 2월 : 충남대학교 전자공
학과(학사)
1986년 2월 : 충남대학교 대학원
전자공학과(석사)
1986년 1월~현재 : 한국전자통신
연구원 인지무선연구팀장
<관심분야> Cognitive Radio, 밀
리미터파 시스템