

전파 인지 네트워크에서 전력 제어를 위한 게임 알고리즘

Game Algorithm for Power Control in Cognitive Radio Networks

노창배*, 닐리메쉬 할더*, 송주빈*

Chang-Bae Rho*, N. Halder* and Ju-Bin Song*

요 약

게임 이론을 적용한 기술은 전파 인지 시스템에서 전파 자원을 효율적으로 이용할 수 있는 유용한 방법으로 그 연구가 활발히 진행되고 있다. 전파 자원 관리 시스템은 그 효율성에 따라서 전파 통신 시스템의 성능을 좌우하게 되므로 효율적인 알고리즘의 연구가 요구된다. 본 논문에서는 이러한 분산 전력 제어가 적용적으로 구현되도록 하기 위하여 게임 이론을 적용한 새로운 시도를 해석적으로 제안하였다. 기존의 연구 결과들은 전력 제어를 게임 이론적으로 해석하는 가능성만을 보인 반면, 본 논문에서는 전파 인지 네트워크에서 내쉬 균형(Nash Equilibrium)을 구하는 구체적인 알고리즘을 제안하였다. 네트워크에 접속된 부사용자들이 공동으로 만족하는 내쉬 균형 즉, 최적 전력 제어를 달성하도록 하는 방법을 제안하였다. 특히, 전파 인지 네트워크가 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 기술을 사용할 경우를 가정하여 이에 대한 적응적 전력 제어를 위한 게임 이론적 모델을 적용하였다. 게임 이론적인 알고리즘을 적용한 결과 DSSS 네트워크에서 $K=63$ 이고 $N=12$ 인 경우 내쉬 균형에 도달하기 위한 반복 횟수가 최대 200 이하인 결과를 보였다.

Abstract

Recently effective spectrum resource technologies have been studied using a game theoretical approach for cognitive radio networks. Radio resource management is required an effective scheme because the performance of a radio communication system much depends on it's effectiveness. In this paper, we suggest a game theoretical algorithm for adaptive power control which is required an effect scheme in cognitive radio networks. It will be a distributed network. In the network distributed cognitive radio secondary users require an adaptive power control. There are many results which are suggested some possibility of game theoretical approaches for communication resource sharing. However, we suggest a practical game algorithm to achieve Nash equilibrium of all secondary users using a Nash equilibrium theorem in this paper. Particularly, a game model was analyzed for adaptive power control of a cognitive radio network, which is involved in DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) techniques. In case of $K=63$ and $N=12$ in the DSSS network, the number of iteration was less than maximum 200 using the suggested algorithm.

Key words : Cognitive radio, game theoretical power control, Nash equilibrium for power control

* 경희대학교 전자·전파공학과(Department of Electronics and Radio Eng., Kyung Hee University)

· 교신저자(corresponding author) : 송주빈

· 투고일자 : 2009년 2월 12일

· 심사(수정)일자 : 2009년 2월 16일 (수정일자 : 2009년 3월 4일)

· 게재일자 : 2009년 4월 30일

I. 서 론

비면허 주파수 대역에서 다양한 서비스를 제공하는 전파 통신 시스템이 증가되고 있는 반면 새로운 서비스를 제공하기 위한 시스템을 위한 주파수 자원은 더욱 제약되고 있다 [1]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 제안된 기술이 전파 인지 기술이다 [2][3]. 게임 이론을 적용한 기술은 이러한 전파 인지 시스템에서 전파 자원을 효율적으로 이용할 수 있는 유용한 방법으로 평가되어 초기 연구가 진행되고 있다 [4][5]. 게임 이론을 적용한 전파 자원 관리의 개념적인 제안은 제시한 결과는 다수 있지만 [5], 실제로 시스템에 적용하여 구체적인 정량적인 알고리즘으로 구현되어 제시된 결과는 아직 많지 않다. 전파 인지 시스템에서 전력 제어 알고리즘은 전파 자원 관리 (Radio Resource Management) 모듈에 구현되어야 하고 특히 새로운 분산 전파 자원 관리 기능이 요구된다. 전파 인지 네트워크에서 전파 자원 관리는 각 전파 인지 단말들이 분산적으로 처리하여야 하므로 매우 복잡한 처리가 될 것으로 예측된다. 전파 자원 관리 시스템은 그 효율성에 따라서 전파 통신 시스템의 성능을 좌우하게 된다 [6]-[8]. CDMA (Code Division Multiple Access) 및 TDMA (Time Division Multiple Access) 시스템뿐만 아니라 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) 시스템에서도 효율적인 전파 자원 관리가 필수적으로 요구된다.

본 논문에서는 이러한 분산 전력 제어가 적응적으로 구현되도록 하기 위하여 게임 이론을 적용한 새로운 시도를 해석적으로 제안하였으며, 전파 인지 네트워크 내에서 부사용자 (Secondary Users)들이 모두 만족하는 내쉬 균형 (Nash Equilibrium)을 구하여 네트워크에 접속된 부사용자들이 공동으로 만족하는 최적 전력 제어를 달성하도록 하는 방법을 제안하였다. 특히, 전파 인지 네트워크가 DSSS 기술을 사용할 경우를 가정하여 이에 대한 적응적 전력 제어를 위한 게임 이론적 모델을 적용하였다.

본 논문에서 제안된 알고리즘은 전파 인지 네트워크의 효율적인 분산 적응 전력 제어를 위하여 전파 자원 관리 시스템에 구현될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 전력 전송의 게임 모델화 및 알고리즘

전파 인지 네트워크에서 적응적 분산 전력 제어를 게임 모델화할 수 있다. 따라서, 분산 네트워크에서 플레이어 (Players)는 결정 가능한 권한을 갖는 노드의 집합으로 정의될 수 있다. 예를 들면, 네트워크에서 $N = 1, 2, \dots, n$ 노드를 의미한다. 액션 (Actions)은 $i \in N$ 인 각 노드를 위한 유용한 전력의 집합으로 정될 수 있다. 즉,

$$P_i = \{p : p \in [P_{i, \min}, P_{i, \max}]\} \quad (1)$$

이다. 여기서 P 는 전력을 나타낸다. p_i 가 i 노드에서 송신 전력이고 g_i 가 i 링크의 이득이라고 하면 $y_i = p_i g_i$, ($i = 1, 2, \dots, m$)은 i 노드에서 수신 전력으로 정의할 수 있다. i 노드에서 QoS (Quality of Service)는 다음과 같이 정의된 SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)로 측정될 수 있다.

$$SINR_i = \frac{y_i}{\sum_{j \neq i} y_j + e} \quad (2)$$

여기서 e 는 외부 잡음 전력이다.

각 노드는 자신의 SINR 정보를 각 노드에 전달한다고 가정한다. 각 노드는 다른 노드의 SINR 정보를 전달받고 각 노드의 전송 전력을 적응적으로 할당한다. 따라서 유틸리티 함수를 SINR을 기본으로 하여 정의할 수 있다. SINR을 기본으로 하는 i 노드의 유틸리티 함수 (Utility Functions) u_i 를 정의하면

$$u_i = (\sqrt{i \times SINR_i}) - c_i(p_i) \quad (3)$$

$$= \left(\left[\sqrt{i \times \left(\frac{y_i}{\sum_{j \neq i} y_j + e} \right)} \right] \right) - c_i(p_i)$$

과 같다. 여기서 $c_i(p_i)$ 는 i 노드에서 코스트 함수이다. 이는 $c_i(p_i) = p' * p_i$ 로 설명될 수 있다.

본 제안 시스템에서 게임은

$$G = \langle N, P, \{u_i\} \rangle \quad (4)$$

로 정의될 수 있다.

본 논문에서 각 노드의 전력 제어 게임은 유용한 전력 벡터로부터 전력을 선택하고 유틸리티 함수를 증감함으로써 내쉬 균형을 이루는 정상 상태의 해를 구하는 방식으로 제안한다. 본 논문에서 내쉬 균형 즉, 정상 상태란 네트워크에서 각 노드들이 제안된 게임 알고리즘에 따라 게임을 수행한 후 네트워크의 모든 노드들이 네트워크에서 자원을 가장 최적으로 사용하도록 하는 전력을 결정하는 것을 완료한 상태를 의미한다.

DSSS 네트워크에서 셀 내에서 이동 노드들이 랜덤하게 분포되어 있으며 K 확산 인자를 갖는다. DSSS 시스템이 단일 채널을 사용하면 요구된 QoS를 성취하기 위하여 전력 제어가 매우 중요한 문제가 된다. 전력 제어를 위한 QoS는 역시 SINR로 정의할 수 있는데 i 노드의 SINR은

$$SINR_i = \frac{g_i p_i}{\frac{1}{K} \sum_{j \neq i}^N g_j p_j + e} \quad (5)$$

로 정의된다.

따라서 유틸리티 함수는 다음과 같이 다시 정의된다.

$$u_i = \frac{g_i p_i}{\frac{1}{K} \sum_{j \neq i}^N g_j p_j + e} - c_i(p_i) \quad (6)$$

본 논문에서 분산 전파 인지 DSSS 네트워크의 게임 모델화를 위하여 내쉬 균형의 존재를 분산적으로 구하기 위하여 다음과 같은 정리를 제안한다.

정리 : 전략 게임 $G = \langle N, A, R \rangle$ 은 다음과 같은 조건에서 $\forall i \in N$ 이면 내쉬 균형이 적어도 하나는 존재한다.

조건 : 액션의 집합 A_i 는 비어있지 않고 compact 이고 유클리드 공간에서 convex 부분집합이다. (본

정리에서 사용된 집합 이론 용어는 [9][10]에서 정의되었다.)

전력 제어 게임에서 내쉬 균형이 적어도 하나는 존재한다. 이를 증명하기 위하여 내쉬 균형 정리를 전력 제어 게임에 적용할 수 있다.

증명 : 액션 집합 P_i 는 비어있지 않고 convex이다. 각 P_i 는 경계 값 $P_{i, \min}$ 과 $P_{i, \max}$ 레벨을 포함하기 때문에 닫혀있다. P_i 에서 모든 전력 레벨은 경계 값 내에 있다. 그러므로 P_i 들은 compact이다. 그래서 전력 제어 게임은 내쉬 균형 점을 갖게 된다. 각 노드에 대하여 전력 제어 게임의 목적은 $i \in N$ 에 대하여 남겨진 플레이어의 액션 즉, $(P_j)_{j \in N \setminus i}$ 이 유틸리티 함수를 최대화하는 액션 P_i 를 찾는 것이다. 이는 스칼라 목적 함수의 반복적 최적화 문제로써 접근함으로 분산 전력 제어의 해를 구할 수 있게 된다. 이 반복적 과정은 각 노드 $i \in N$ 에 대하여 $(P_j)_{j \in N \setminus i}$ 가 주어지고 유틸리티 함수를 계산하여 최대화하는 알고리즘으로 구현한다. 즉,

$$P_{i, eqm} = \max_{P_i} [u_i(P_i, P_{-i})], \forall i \in N \quad (7)$$

을 최대화하는 알고리즘이다. 전파 인지 네트워크에서 모든 노드가 제안된 반복적 알고리즘을 사용하여 처리되고 각 노드의 최적 유틸리티를 찾을 때 까지는 반복 과정 간에는 고정된다고 가정한다. 전력의 최대 최소 값의 경계가 정의되어 있으므로 반복 횟수의 최대 최소가 존재하여 알고리즘은 구현 가능한 유한 개의 처리과정을 갖게 된다.

III. 게임 모델 적용 및 모의실험 결과

내쉬 균형 해법 모델을 적용하기 위하여 전파 인지 에드혹 (ad-hoc) 네트워크를 고려한다. 노드들이 랜덤하게 분포한다고 가정한다. 사용 가능한 전력 집합 P 가 0에서 10 사이라고 한다. 이 때 외부 잡음 $e = 0.001$ 이고 단위 전력 프라이스가 (price)=0.5라고 한다. 네트워크에서 랜덤하게 분포된 노드의 수가

17이라고 하고 각 노드는 랜덤한 순서로 유틸리티를 성취하기 위하여 전송 전력을 랜덤한 순서로 최적 전략을 찾는다고 가정한다. 제안한 전력 제어 게임 방법을 적용하여 각 노드는 정상 상태 즉, 내쉬 균형에 도달 하게 된다.

그림1은 각 노드의 유틸리티를 최대화하는 내쉬 균형에 도달하는 반복 과정의 연산 수에 대한 전력의 변화를 보인 것이다. 그림2는 각 노드의 유틸리티를 보인 것이다. 각 이동 노드는 전력 제어 게임 후에 최대 유틸리티에 도달하게 되고 이 때 내쉬 균형을 보이게 된다. 각 실험들은 각 노드의 유틸리티 변화를 보인 것이다. 그림3은 제안한 알고리즘을 통하여 각 노드들이 내쉬 균형에 도달하는 반복 시간을 보인 것이다.

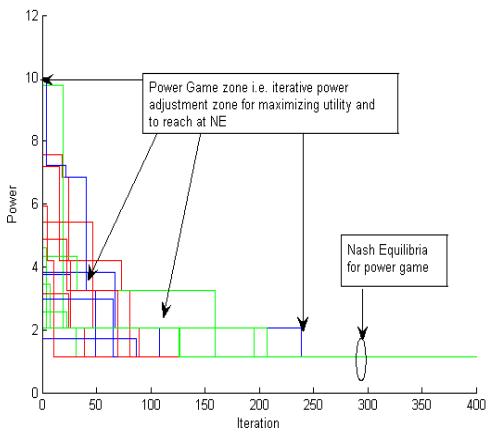


그림 1. 내쉬 균형에 도달하는 각 노드의 전력
Fig. 1. Power of each node meets the Nash equilibrium.

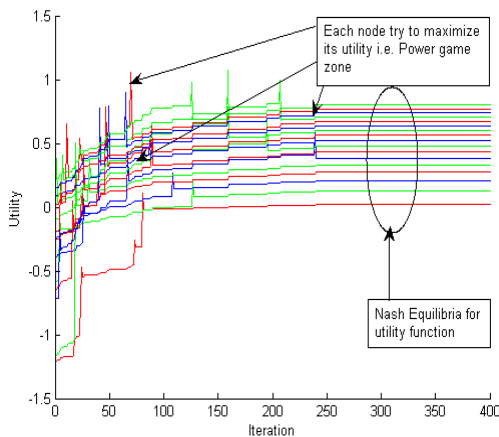


그림 2. 각 노드의 유틸리티와 내쉬 균형
Fig. 2. Utility of each node and its Nash equilibrium.

다음으로 DSSS 기술을 사용하는 전파 인지 네트워크를 고려한다. $K = 63$ 이고 $N = 12$ 인 DSSS 네트워크를 고려한다. 이 때 각 전파 인지 노드들은 랜덤하게 분포된다고 가정한다. 그림4는 모의 실험을 위한 DSSS 네트워크 모델을 보인 것이다. 네트워크의 중심은 전파 인지 기지국이고 12 전파 인지 단말들이 랜덤하게 분포되어 있다. 거리 단위는 km이다.

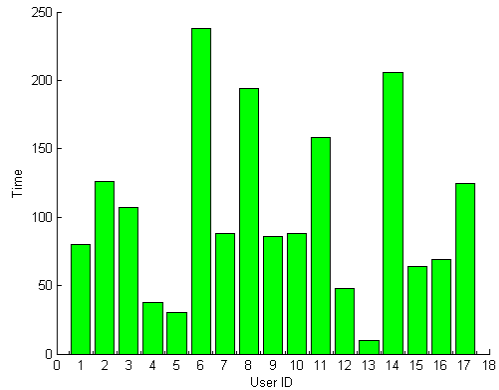


그림 3. 내쉬 균형에 도달하기 위한 각 노드의 요구 시간
Fig. 3. Time required by each node to reach its Nash equilibrium.

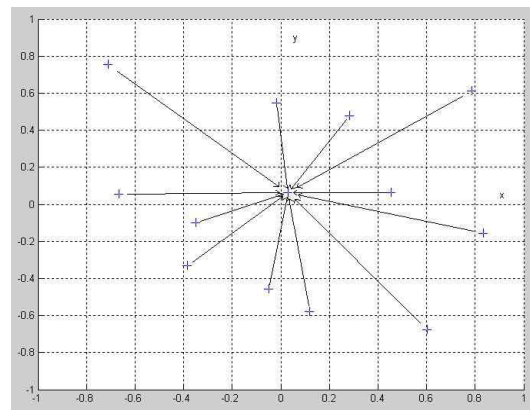


그림 4. 모의 실험을 위한 DSSS 네트워크 모델
Fig. 4. DSSS network model for simulation.

각 전파 인지 이동 단말들은 제안된 알고리즘을 사용하여 분산적으로 전력을 제어하여 최적의 유틸리티에 도달하도록 작동한다. 그림5는 알고리즘의 주요 동작을 볼 수 있도록 단순화한 프로그램을 보인 것이다. 알고리즘에서 각 노드는 그의 현재 유틸리티 함수 값을 계산하고 전력이 변화 단위로 변화될 때 어떻게 그의 유틸리티 값이 변화될 것인가를 예측하

게 된다. 유틸리티 값이 가장 큰 값에 도달하면 전력 레벨의 조절하게 된다.

```

UTIL: Calculate utility function,  $u_i$ 
UTIL: Predict utility function,  $u_i$ 
for Cur_Power_Level +step dB
UTIL: Predict utility function,  $u_i$ 
for Cur_Power_Level -step dB
If UTIL+ is largest
Cur_Power_Level=Cur_Power_Level +step dB
If UTIL- is largest
Cur_Power_Level=Cur_Power_Level -step dB
If UTIL is largest
Cur_Power_Level=Cur_Power_Level
    
```

그림 5. 제안된 알고리즘의 비교 반복 전력 제어 알고리즘부

Fig. 5. The part of relative iterative power control for the suggested algorithm.

그림6은 제안된 알고리즘에 의하여 각 노드가 네쉬 균형을 성취하였을 때 각 이동 노드의 유틸리티를 보인 것이다. 각 노드의 유틸리티가 그림7과 같이 네쉬 균형을 이루면 각 노드의 전력 제어 게임은 정상 상태가 된다.

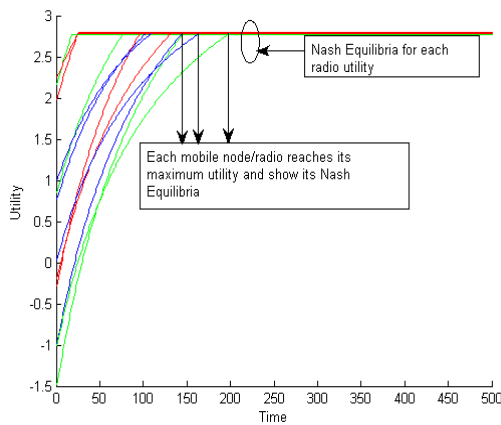


그림 6. DSSS 네트워크에서 각 노드의 네쉬 균형을 위한 유틸리티

Fig. 6. Nash equilibrium for each radio utility in the DSSS network.

그림8은 그림4에 제시된 네트워크 모델을 적용하였을 경우 제안된 알고리즘을 적용하여 네트워크에서 전파 인지 사용자들이 네쉬 균형을 이루어 정상 상태에 도달할 때 요구되는 각 노드들의 반복 시간을 보인 것이다.

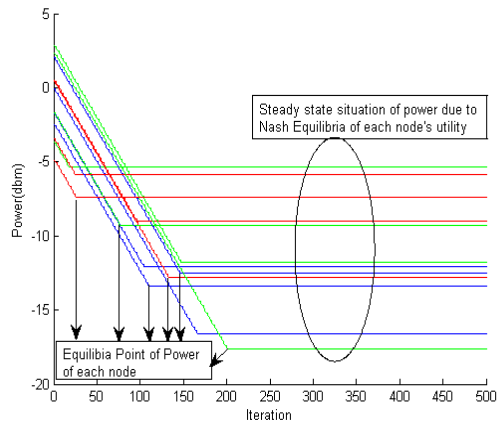


그림 7. DSSS 네트워크에서 네쉬 균형에 도달하기 위한 전력 제어 게임 결과

Fig. 7. Power control game results to reach Nash equilibrium in the DSSS network.

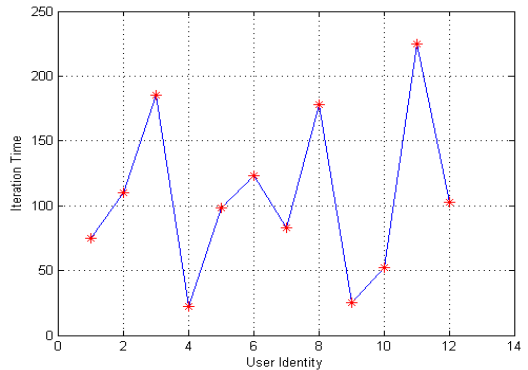


그림 8. DSSS 네트워크에서 네쉬 균형에 도달하기 위한 각 노드들의 반복 시간

Fig. 8. Time required to reach Nash equilibrium in the DSSS network.

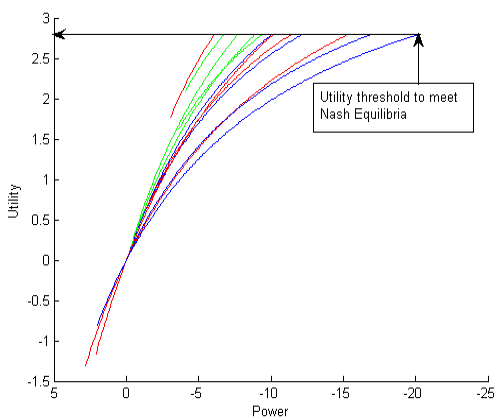


그림 9. DSSS 네트워크에서 전력에 대한 네쉬 균형에 도달하기 위한 유틸리티 결과

Fig. 9. Power vs. utility to meet Nash equilibrium in the DSSS network.

그림9는 그림10에서 보인 게임을 사용하여 전력 제어 게임 알고리즘을 수행한 결과 네쉬 균형에 각 노드들이 도달하기 위한 전력 제어와 유틸리티의 트레이드 오프 (trade off) 결과를 보인 것이다.

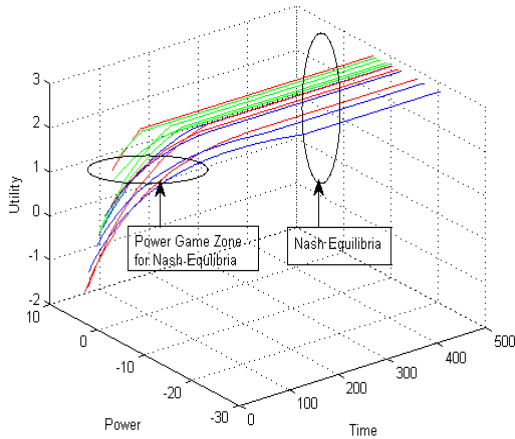


그림 10. DSSS 네트워크에서 전력 제어 게임
Fig. 10. Power control game in the DSSS network.

IV. 결 론

본 논문에서는 전파 인지 네트워크에서 요구되는 분산 전력 제어를 구현하기 위하여 게임 이론적 모델을 적용한 알고리즘을 제안하였다. 전파 인지 네트워크에서 적응적 전력 제어를 게임 이론을 이용하여 해석적으로 유도하였다.

기본적인 QoS 파라미터인 SINR을 이용하여 유틸리티 함수를 유도하여 적응적 전력 제어를 위하여 이에 기반한 네쉬 균형 해법 모델을 이용한 게임 알고리즘을 제안 하였다. 제안한 알고리즘을 DSSS 네트워크 모델을 사용하여 컴퓨터 모의 실험을 통하여 모든 전파 인지 사용자들이 만족하는 네쉬 균형이 존재함을 보였다. 네쉬 균형이 존재하는 것은 시스템으로 구현 가능하다는 것을 보인 것이다. $K=63$, $N=12$ 인 DSSS 네트워크에 제안 알고리즘을 적용한 결과 모든 노드가 만족하는 전력을 성취하기 위한 반복 횟수가 최대 200회 이하인 것을 보였다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 전파 인지 네트워크의 전파 자원 관리 시스템을 위한 알고리즘으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 향후 게임 이론

적 모델을 적용한 효율적인 프로토콜 개발 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] I.F. Akyildiz, C. Lee, M.C. Vuran, and S. Mohanty, "Next generation dynamic spectrum access cognitive radio wireless networks: A survey", *Elsvier Computer Networks Journal*, vol.50, pp.2127-2159, 2006.
- [2] J. Mitola III., "Cognitive radio for Flexible multimedia communications", *MoMuC'99*, pp.3-10, 1999.
- [3] S.N. Shankar, C.T. Chou, K. Challapali, and S. Mangold, "Spectrum agile radio: capacity and QoS implications of dynamic spectrum assignment", *Proceedings on GLOBECOM '05*, vol.5, 2005.
- [4] D. Goodman and N. Mandayam, "Power control for wireless data", *IEEE Personal Communications*, April 2000.
- [5] A.B. MacKenzie and S.B. Wicker, "Game theory in communications: Motivation, explanation, and application to power control", *GLOBECOM 2001*.
- [6] A. Hills and B. Friday, "Radio resource management in wireless LANs", *IEEE Communications Magazine*, vol.42, pp.9-14, 2004.
- [7] Cameron, Rick, and B. Woerner, "Performance analysis of CDMA with imperfect power control", *IEEE Transactions on Communications*, vol.44, pp. 777-781, 1996
- [8] K. Gilhousen, I. Jacobs, R. Padvani, A.J. Viterbi, L. Weaver, and C. Wheatley III, " On the capacity of a cellular CDMA system", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.40, pp.303-312, 1991.
- [9] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*, MIT press, Cambridge, MA, 1991.
- [10] M.J. Osborne and A. Rubinstein, *A Course in Game Theory*, MIT Press, 1994.

노 창 배 (盧昌培)



2001년 2월 : 대전대학교 컴퓨터공학과(공학사)
2003년 8월 : 한남대학교 전산교육 전공(교육석사)
2006년 8월 : 경희대학교 전자전파공학과(박사수료)
2008년 3월 ~ 현재 : 대덕대학 정보

통신학부 초빙교수

관심분야 : Cognitive radio networks, 모바일 컴퓨팅, 분산 데이터베이스, 휴대용 데이터베이스 등

닐리메쉬 할더

2005년 9월 : Dept. of Computer Science & Engineering, Khulna University (공학사)

2006년 3월 ~ : 경희대학교 전자전파공학과 박사과정
관심분야 : Cognitive radio networks, Communication resource sharing, 모바일 컴퓨팅, 분산네트워크 등

송 주 빈 (宋湊斌)



2001년 12월 : Dept. of Electronic & Electrical Eng., University College London, University of London(공학박사)
1992년 1월 ~ 1997년 5월: 한국전자통신연구원(선임연구원)
2001년 9월 ~12월: Dept. of

Electronic & Electrical Eng., University College London(Research Fellow)

2002년 3월 ~ 2003년 9월: 국립한밭대학교 정보통신컴퓨터공학부(전임강사)

2003년 9월 ~ 현재 : 경희대학교 전자전파공학과 부교수
관심분야 : 전파인지 네트워크(cognitive radio networks), 센서네트워크, 4G 통신시스템, communication resource sharing 등