

인지무선 주파수 분배 과정에서 옥션게임을 이용한 최적 가격 및 옥션 주기 결정 방법

박진석*, 강건규*, 이상영*, 백선우*, 유상조^o

Optimal Price and Auction Period Decision Method Based on Auction Game Theory for Spectrum Allocation in Cognitive Radio Networks

Jin-Seok Park*, Keon-Kyu Kang*, Sang-Young Lee*, Sun-Woo Baek*, Sang-Jo Yoo^o

요 약

인지무선(cognitive radio)기술은 특정 주파수에 대해 권한을 가진 주 사용자가 자신의 주파수를 사용하지 않을 때 생기는 유휴 대역을 특정 주파수에 대해 권한이 없는 부 사용자가 사용할 수 있도록 하는 기술이다. 본 논문에서는 인지무선 네트워크에 옥션 게임 이론을 적용시켜, 주파수 가격과 옥션 주기를 동시에 고려한 주 사용자의 이득을 최대화 할 수 있도록 하는 알고리즘을 제안한다. 부 사용자들이 제시한 주파수양의 비율에 따라 주 사용자의 주파수를 분배하는 옥션이 반복적으로 진행되면서 주 사용자는 최적의 주파수 가격을 찾게 되며, 찾아진 주파수 가격 정보와 본 논문에서 새로 제시한 주 사용자의 효용함수를 이용해 최적의 옥션 주기를 찾게 된다. 동시에 주 사용자는 찾아진 최적의 옥션 주기에 맞는 주파수 가격을 최종적으로 결정하게 된다.

Key Words : cognitive radio, auction game, spectrum allocation, auction algorithm, utility function

ABSTRACT

Cognitive radio technology gives secondary users chances that they can use specific spectrum of the primary user when the primary user doesn't use it. This paper proposes the algorithm that maximizes the benefit of the primary user considering spectrum price and auction period by using the auction game theory. According to the ratio of spectrum that secondary users bid, primary user allocates spectrum to secondary users. In the process of repeated auction, the primary user gets to find the optimal price of spectrum. Using the price and the proposed utility function of primary user, we derive the optimal auction period. At the same time, the primary user finally determines the price of spectrum appropriate for the optimal period.

I. 서 론

최근 무선통신 기술의 급속한 발전으로 인해 다

양한 휴대기기의 주파수 사용량이 급격하게 증가하면서 효율적인 주파수 사용이 중요한 문제로 부상하였다. 기존의 고정 주파수 할당 방식은 주파수를

※ 본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초사업연구임(No.2011-0021152)

• First Author : 인하대학교 정보통신공학과 멀티미디어 통신망 연구실, threek823@gmail.com, 학생회원

◦ Corresponding Author : 인하대학교 정보통신공학과 멀티미디어 통신망 연구실, sjyoo@inha.edu, 종신회원

* 인하대학교 정보통신공학과 멀티미디어 통신망 연구실, plok5308@hanmail.net, simba1988@nate.com, rope12@naver.com 준회원
논문번호 : KICS2013-08-346, 접수일자 : 2013년 8월 26일, 최종논문접수일자 : 2013년 10월 31일

융통성 있게 사용하지 못하므로, 주파수 자원을 보다 효율적이고 융통성 있게 사용하기 위해 인지무선(cognitive radio)기술이 제안되었다¹¹.

인지무선 기술은 특정 주파수에 대해 권한을 가진 주 사용자(PU: Primary User)가 자신의 주파수를 사용하지 않을 때 생기는 유휴 대역(spectrum hole)을 특정 주파수에 대해 권한이 없는 부 사용자(SU: Secondary User)가 사용할 수 있도록 하는 기술이며¹², 현재 스펙트럼 센싱(spectrum sensing)기술¹³, 스펙트럼 결정(spectrum decision)기술, 스펙트럼 공유(spectrum sharing)기술¹⁴ 등의 여러 분야에서 연구가 이루어지고 있다.

그 중 스펙트럼 공유 기술은 주 사용자의 유휴 대역을 어떤 방식으로 부 사용자와 공유하는가에 대한 기술로써 통신 속도와 품질을 결정하기 때문에 가장 중요하게 연구되고 있으며, 이에 따라 본 논문에서도 스펙트럼 공유 기술에 관하여 연구를 진행 하였다.

스펙트럼 공유 기술 방식은 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 주 사용자에게 피해가 가지 않는 한도 내에서 부 사용자가 주 사용자의 주파수에 접근할 수 있도록 허락해 주는 것이며, 다른 하나는 주 사용자들이 사용하지 않는 주파수를 부 사용자들에게 돈을 받고 대여하는 것이다. 전자 모델의 경우 구조가 간단하다는 장점이 있고, 후자 모델의 경우 주 사용자의 부하가 증가하지만 유휴 대역을 이용하여 이익을 창출 할 수 있다는 장점이 있다. 이 때, 가장 이슈가 되는 점은 부 사용자들의 요구량에 따른 적절한 주파수의 분배와 최적화된 가격을 통해 주 사용자의 이익과 부 사용자들의 이익의 이상적인 값을 찾는 것이다.

주 사용자가 사용하지 않는 주파수를 부 사용자에게 대여하는 상황은 한 사람이 여러 사람을 대상으로 재화를 파는 경매 상황으로 볼 수 있다. 각각의 부 사용자들은 상대방에 이득에는 관심이 없고 오로지 자신의 이득만 최대화 하려고 노력하는 이기적인 사용자라고 볼 수 있기 때문에 게임이론으로 분석하기에 적합하다. 이러한 이유로 주 사용자가 부 사용자에게 주파수를 대여하는 상황을 다양한 옥션게임(auction game)을 이용해 분석하는 연구가 많이 진행되고 있다¹⁵⁻¹⁷.

이전의 연구에서는 게임에 참가하는 부 사용자들이 자신의 전력이나 SINR을 일종의 입찰가격으로 제시하거나¹⁸, 부 사용자 자신이 필요한 주파수 대역을 입찰한 후 주 사용자에게 의해 할당받는 방식을

택하였다^{9,10}. 그리고 이전의 연구는 제시하는 옥션 게임 알고리즘을 사용할 경우 부 사용자들은 내쉬 균형(Nash equilibrium)에 도달하며, 그 도달 지점은 파레토 효율(Pareto efficiency)을 만족한다는 것을 보였다. 하지만 옥션 주기를 고려하지 않은 채, 주 사용자와 부 사용자의 이득을 최대화 할 수 있는 가격 결정에만 목적을 두었다. 본 논문에서는 주 사용자가 자신의 주파수를 대여하는 상황에서 주파수를 얼마나 오래 대여해야 가장 이득이 되는지, 즉 옥션 주기를 고려하여 가격을 결정하는 구조를 고려하였다. 주 사용자의 입장에서 주파수를 길게 대여하면 자신이 필요할 때 사용하지 못할 가능성이 커진다. 반면 주 사용자가 주파수를 짧게 대여하면 부 사용자들이 옥션게임에 참여하지 않거나 돈을 적게 지불할 가능성이 커진다. 이러한 이유로 주 사용자는 자신의 상황에 따라 가장 적합한 옥션 주기(auction period)를 정해야 한다.

본 논문에서는 이전의 연구¹⁰에서 제시된 부 사용자의 통신 가치 변화에 따라 주파수 가격 변화 관계를 실험적으로 구해내었다. 그리고 주 사용자가 옥션 주기를 길게 하면 부 사용자의 통신 가치도 늘어난다는 가정을 한 뒤, 그에 따른 주파수 가격 변화를 예상하였다. 마지막으로 주 사용자가 자신의 주파수를 사용하지 못할 때 느끼는 피해 정도를 고려하여 주 사용자의 효용함수(utility function)을 제시하였고, 제시한 효용함수를 이용해 주 사용자가 어떤 과정을 통해 최적의 옥션 주기를 결정하는지 보였다. 또한 주 사용자가 최적의 옥션 주기를 결정 하였을 때 그 선택이 내쉬균형이라는 것도 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 인지무선 주파수 분배 옥션 메커니즘에 대해서 설명하고, 시스템 모델을 설명한 뒤, 여러 가지 옥션 종류들을 설명한다. 또한 본 논문에서 사용된 옥션에 대해서 설명한다. 3장에서는 최적 주파수 가격 및 옥션 주기를 결정하는 방법에 대해서 설명하고, 이전의 연구¹⁰에서 제시된 방법을 이용해 최적 주파수 가격을 구한 뒤, 본 논문에서 제시한 방법으로 최적 옥션 주기를 구한다. 그 후 구해진 옥션 주기에 맞는 주파수 가격을 다시 구하게 된다. 4장에서는 모의실험을 통해 여러 가지 결과들을 보이고, 각 부 사용자들의 입찰 변화를 보여주며, 주 사용자가 결정하는 주파수 가격의 변화도 보여준다. 또한 시뮬레이터를 이용해 구한 최적의 가격과 이론적으로 구한 가격이 같게 나오는 것을 보인다. 마지막으로 제안한 알고리즘을 이용했을 경우 고정된 옥션 주

기일 때보다 주 사용자의 이득이 증가하였다는 사실을 보인다. 5장은 본 논문의 결론을 기술한다.

II. 인지무선 주파수 분배 옥션 메카니즘

2.1. 시스템 모델

본 논문에서는 한명의 주 사용자(PU)와 N명의 부 사용자(SU)로 구성된 간단한 시스템을 가정한다. 부 사용자들의 그룹은 $N = \{1, \dots, N\}$ 으로 나타낸다.

네트워크의 주 사용자는 자신의 가용 주파수 중에서 자신의 통신을 위해 남겨야하는 주파수를 제외한 주파수를 분배하여 주파수 효율성을 높인다. 그룹 내의 부 사용자들은 자신들의 통신을 위해 주 사용자로부터 주파수를 할당받기 위하여 각각 주 사용자가 정한 주파수당 가격(p)에 따라 입찰을 수행한다.

주 사용자는 경매하지 않고 주 사용자 자신이 직접 사용하는 주파수 양 B_{req} 를 확보하기 위해 부 사용자에게 β 를 제시한다. β 의 값은 모든 부 사용자들이 가장 큰 입찰 주파수를 제시했을 경우에도 주 사용자의 주파수가 보호될 수 있도록 결정된다. 수식으로 표현하면 다음과 같다^[10].

$$\beta = \frac{B_{req}NB_{tot}}{B_{tot} - B_{req}} \quad (1)$$

여기서 B_{tot} 는 주 사용자가 소유한 주파수를 의미한다.

본 논문 모델의 통신 과정은 두 구간으로 이루어져 있다. 그림 1에서와 같이 첫 번째 옥션 절차 구간(T_A)에서 각각의 부 사용자들은 자신들의 요구량에 따라 주파수양을 입찰하게 되고, 동일 구간 내에서 주 사용자는 일정한 메카니즘에 의해 부 사용자들에게 주파수를 할당하게 된다. 그 다음 두 번째 데이터 전송 구간(T_D)에서는 각각의 부 사용자와 주 사용자가 데이터를 전송하게 되고, 지정된 시간 이후에는 다시 옥션 절차 구간으로 돌아와 주파수 입찰을 시작하게 된다. 이때 옥션 절차 구간과 데이터 전송 구간을 더한 시간을 옥션 주기($T_A + T_D$) 라고 정의 한다.

주 사용자가 주파수 가격을 높게 설정할 경우 부 사용자들이 옥션에 참여하지 않을 확률이 커진다. 반면 주파수 가격을 낮게 설정할 경우 부 사용자들

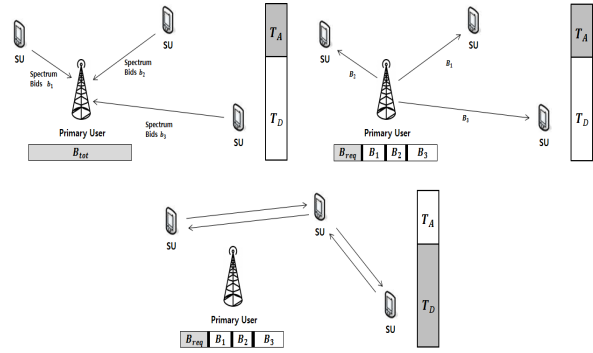


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

이 옥션에 참여하여도 크게 이득을 얻을 수 없다. 옥션 주기를 길게 설정할 경우 주 사용자들은 자신의 주파수를 사용하지 못하는 경우가 많아지게 되고, 옥션 주기를 짧게 설정할 경우는 부 사용자들이 가격을 적게 지불할 확률이 커지게 된다. 그렇기 때문에 주 사용자는 최적의 주파수 가격(p^*)과 옥션 주기(T^*)를 구해야 한다.

부 사용자는 주 사용자의 주파수를 구입함으로써 통신을 할 수 있다. 부 사용자가 주 사용자에게 구입한 주파수는 B_i 로 나타낸다. 부 사용자는 자신의 통신 환경에 따라 통신의 가치(r_i)을 결정하게 된다. 자신의 통신이 중요한 의미를 갖는 경우는 r_i 값을 크게 설정할 것이고, 자신의 통신이 중요하지 않은 의미를 갖는 경우는 r_i 값을 작게 설정할 것이다. 또한 부 사용자는 자신이 사용하고 있는 통신 방법에 따른 주파수 효율성(k_i)을 알 수 있다고 가정한다^[10].

2.2. 옥션 알고리즘

이번 절에서는 옥션게임의 개념에 대해 설명하고 기존의 존재하는 옥션들에 대해 설명한다. 게임이론 옥션 모델은 다음과 같은 구성 요소로 이루어져 있다.

- 결과 집단 Ω
- 플레이어 집단 N 에 속해있는 플레이어 i , 플레이어 i 의 타입 $\theta_i \in \Theta_i$
- 플레이어 i 의 전략 $s_i(\theta_i) \in S_i$
- 효용함수 $u_i(o, \theta_i)$, $o \in \Omega$

일반적으로 플레이어들은 판매자들과 구매자들로

이루어져 있으며, 플레이어들의 전략은 입찰함수나 유보가격을 의미한다. 각 플레이어들의 이득은 모든 플레이어들의 전략의 조합으로 구해진다¹¹¹.

옥션 이론에는 여러 가지 성질들이 있다. 첫 번째는 분배적 효율성은 모든 옥션에서 가장 높은 입찰을 한 플레이어가 항상 이긴다는 것이며, 두 번째로는 옥션 이론에서는 계산 효율적인 것이 바람직하다는 것이다. 마지막 성질은 서로 다른 옥션들의 수익을 알기 위해서는 다음과 같은 이론을 만족해야 한다는 것이다.

수입등가정리 : 다음과 같은 조건을 만족하는 옥션 방식들은 같은 총수익을 가지고 각각 입찰자들에게 같은 이득 기대치를 갖는다.

- 가장 높은 입찰가를 제시한 입찰자가 승리 한다.
- 가장 낮은 입찰가를 제시한 입찰자는 이득이 0 이다.
- 입찰자들은 위험 중립하다.

여기서 특별한 경우로 모든 입찰자들이 공통가치를 갖는 경우의 경매에서는 가장 높은 가치를 가진 입찰자가 승리할 수 있으므로, 입찰가가 계속해서 올라가게 된다. 따라서 승리자가 지불해야 하는 입찰가가 너무 높아지게 된다. 이를 승자의 저주라고 한다.

옥션이론은 입찰 방법이나 낙찰 방법 등의 차이를 가지고 여러 가지 분야로 세분화 되어있다. 그 중 가장 잘 알려진 옥션들은 다음과 같다.

- i) **First-price auction** 간단하게 판매자가 가장 높은 입찰가를 제시한 입찰자에게 물건을 팔게 되고, 입찰자는 입찰가와 동등한 가격을 지불하는 옥션 방법이다. 반대로 **Procurement auction** 은 가장 적은 입찰가를 제시한 입찰자가 입찰가와 동등한 가격을 지불하고 물건을 획득한다.
- ii) **Second-price auction** 가장 높은 입찰가를 제시한 입찰자가 물건을 획득하지만, 가격을 지불할 때는 두 번째로 높게 제시된 입찰가를 지불한다.
- iii) **Vickrey-Clarke-Groves(VCG) Vickrey auction** 에서 정직한 입찰값에 대한 이점을 유지하고 좀 더 일반화한 메카니즘이다. VCG에서 각각 플레이어들은 그들이 물건을 원하는 상태를 다른 플레이어들에게 알려주는 기회비용을 지불한다.

그다음 플레이어 i 가 옥션에 참여함으로써 생기는 손실 값과 지불하는 비용 값은 같도록 설정한 가격이 지불 가격이 된다¹¹².

본 논문에 사용된 옥션 알고리즘¹¹⁰에서 플레이어는 한 명의 판매자와 여러 명의 구매자들로 이루어져 있다. 주 사용자는 자신의 타입에 따라 가지고 있는 총 주파수(B_{tot})와 자신이 사용하는 주파수(B_{req})가 달라지며, 각 부 사용자들은 자신의 타입에 따라 통신의 가치(r_i), 주파수 효율성(k_i)이 달라진다. 주 사용자의 전략은 주파수 가격(p)을 결정하는 것과 옥션 주기(T)를 결정하는 것이며, 부 사용자의 전략은 입찰 주파수(b_i)를 결정하는 것이다. 주 사용자의 효용함수는 주파수 가격과 옥션 주기에 따른 결과 값이 되며, 부 사용자의 효용함수는 입찰 주파수와 할당 받은 주파수에 따른 결과 값이 된다. 마지막으로 결과 집단(Ω)은 옥션 게임 결과 주 사용자가 결정한 주파수 가격과 옥션 주기가 된다.

입찰 방법과 낙찰 방법에 따라 여러 가지 옥션 알고리즘이 앞에 제시되어 있는데, 가장 높은 입찰가를 제시한 입찰자가 승리하고, 가장 낮은 입찰가를 제시한 입찰자의 이득이 0인 앞의 옥션 알고리즘과 달리, 본 논문에서는 각 구매자의 입찰가의 비율에 따라 재화를 분배하게 된다. 각 구매자는 입찰가의 절대 값이 아닌 다른 구매자의 입찰가에 대한 상대적인 값으로 주파수를 얻게 된다. 그렇기 때문에 각 구매자는 옥션에 참여하면 항상 주파수를 얻을 수 있게 된다.

III. 최적 주파수 가격 및 옥션 주기 계산과정

3.1. 옥션 주기가 고정된 상태에서 최적 주파수 가격 결정 과정

인지무선 네트워크 상황에서 주 사용자는 부 사용자들에게 주파수를 경매하게 되는데, 이 때 주 사용자는 부 사용자들에게 옥션 주기(T)와 주파수 가격(p)을 알려준다. 본 논문에서는 옥션 주기가 고정된 상태(초기 상태, $T=1$)에서 최적 주파수 가격(p^*)을 구한 뒤, 구해진 정보를 이용해서 최적의 옥션 주기(T^*)와 그에 맞는 최적 주파수 가격(p^{**})을 다시 결정하게 된다. 먼저 옥션 주기가 고정된 상태에서 최적 주파수 가격 결정 과정은 기존 논문¹⁰¹의 절차와 같이 다음의 과정으로 진행된다.

Step1. 주 사용자가 부 사용자에게 주파수당 가격 (p)과 옥션 주기(T)를 알려준다. 이 때, 초기 값 p 는 다음의 식을 이용해 구한다.

$$p_i = r_i k_i B_{tot} \frac{(N-1)B_{tot} + \beta}{(NB_{tot} + \beta)^2} \quad (2)$$

$$p = \min_{\forall i} (p_i) \quad (3)$$

Step2. 각각의 부 사용자는 주 사용자에게 입찰 주파수량(b_i)을 결정하여 알려준다. 이 때 부 사용자는 현재 게임에 플레이어가 몇 명인지(N)와 다른 사용자들의 입찰 주파수량의 조합(b_{-i})을 모르기 때문에 자신이 필요한 b_i 보다 낮게 결정한다.

Step3. 주 사용자는 부 사용자들이 결정한 b_i 값을 아래의 식에 대입하여 부 사용자들에게 주파수를 분배한다.

$$B_i = \frac{b_i}{\sum_{j \in N} b_j + \beta} B_{tot} \quad (4)$$

(B_i : 부 사용자 i 에게 할당된 주파수)

예를 들어, $b_1 = 10, b_2 = 30, b_3 = 20, \beta = 20$ 이라면 위 식에 의해 그림 2에서와 같이 각각의 B_i 가 다음과 같이 구해진다.

$$B_1 = \frac{B_{tot}}{8}, B_2 = \frac{3B_{tot}}{8}, B_3 = \frac{2B_{tot}}{8} \quad (5)$$

Step4. 부 사용자들은 주 사용자에게 할당받은 B_i 를 이용해서 통신을 하게 된다. 부 사용자들은 같은 주파수를 할당 받았더라도 그 주파수를 사용하는 효율성(k_i)이 다르다. 또한 같은 양의 데이터를 전송했더라도 느끼는 가치(r_i)가 다르다. 그러므로 B_i 를 통해 얻은 이득은 $r_i k_i B_i$ 로 나타낼 수 있다. 반면 단위 주파수당 가격이 p 이므로 부 사용자가 지불한 금액은 pb_i 로 나타낼 수 있다. 그러므로 부 사용자 i 의 효용함수는 다음과 같이 표현된다.

$$U_{SU,i} = r_i k_i B_i - pb_i \quad (6)$$

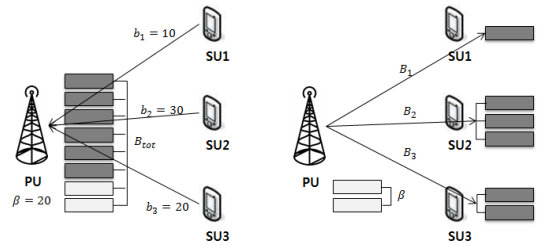


그림 2. 주파수 분배 예시
Fig. 2. Example of spectrum sharing

모든 부 사용자들은 이득을 최고로 높이려고 행동할 것이다. 그러므로 옥션이 종료되고 다음 옥션에서의 b_i 는 다음의 식을 이용해서 구하게 된다.

$$b_i(t+1) = b_i(t) + \alpha b_i(t) \frac{\partial U_{SU,i}}{\partial b_i(t)} \quad (7)$$

(α : speed adjustment parameter)

step3, step4가 반복되면서 b_i 는 균형 상태에 도달하게 된다. 균형 상태를 식으로 나타내면 식(8)과 같다.

$$|b_i(t+1) - b_i(t)| < \epsilon \quad (8)$$

Step5. b_i 가 균형 상태에 도달하면 주 사용자는 모든 b_i 가 B_{tot} 보다 작는지 확인하게 된다. 즉, 다음의 식을 만족하는지 확인하게 된다.

$$B_{tot} > b_i (\forall i) \quad (9)$$

만약 위 조건이 만족되지 않는다면 그 이유는 각 부사용자들이 느끼는 이득에 비해 주파수당 가격(p)이 작기 때문이다. 이득에 비해 p 가 작기 때문에 균형 상태가 주 사용자의 총 주파수보다 높게 결정된 것이다. 그러므로 주 사용자는 p 를 올리게 된다. 이후 다시 step1부터 진행하게 된다.

$$p = p + \Delta p \quad (10)$$

위 조건을 만족하는 경우에는 주 사용자가 결정한 가격 p 가 적절하게 결정된 것이다. 적절한 p 가 결정되었으므로 다음의 단계로 넘어가게 된다.

3.2. 제안된 최적 옥션 주기 결정 및 최적 옥션 주기에 따른 주파수 가격 결정 과정

부 사용자는 옥션 주기(T)가 길수록 옥션을 통해 얻은 주파수에 큰 가치를 부여할 것이다. 옥션 주기가 길어질수록 통신을 오랫동안 끊이지 않고 할 수 있기 때문이다. 또한 그림3에서와 같이 옥션 주기가 옥션 진행 시간보다 크면 클수록 통신은 안정적이게 될 것이다. 이러한 이유로 본 논문에서는 부 사용자들이 느끼는 주파수의 가치(r_i)는 T 의 변화에 따라 다음과 같이 변한다고 가정한다.

$$r_i \propto T^2 \quad (11)$$

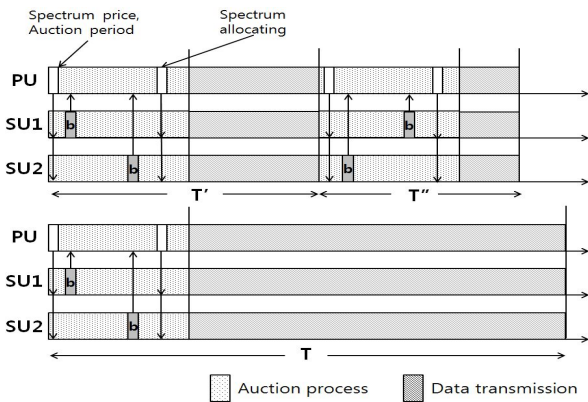


그림 3. 옥션 주기(T)의 변화에 따른 데이터 전송 시간 변화
Fig. 3. The data transmission time for auction period(T) transition

결국 주 사용자가 T 를 변화시키면 부 사용자들이 느끼는 r_i 이 변하게 된다. 또한 각 부 사용자들의 r_i 이 변하면 p^* 값이 변하게 된다. 부 사용자들의 r_i 변화에 따라 변하는 p^* 는 수식적으로 구해내기 어렵다. 부 사용자 N 명이 반복적인 알고리즘을 통해 p^* 을 결정해내기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 먼저 시뮬레이션을 통해 여러 가지 상황 속에서 r_i 의 변화에 따른 p^* 의 변화를 관찰하였다. 그림4는 뒤에 나오는 모의실험 파라미터에서 통신 가치 ($r_1 = 1, r_2 = 1.5, r_3 = 2$)의 배율에 따른 p^* 를 구한 그래프이다. 같은 방법으로 r_i 를 여러 가지 값으로 변화시키면서 시뮬레이션을 한 결과 r_i 와 p^* 의 관계가 선형이라는 것을 귀납적 추론을 이용해 알아내었다. 즉 모든 부 사용자들의 r_i 이 선형적으로 증가할 경우 결정되는 p^* 도 선형적으로 증가된다.

$$r_i \propto p^* \quad (12)$$

주 사용자는 결국 자신이 T 를 변화시킬 경우 부

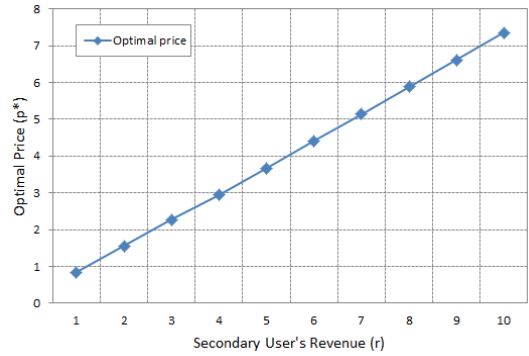


그림 4. 부 사용자의 통신 가치 배율에 따른 최적 가격 변화
Fig. 4. Optimal price for secondary user's revenues

사용자의 r_i 의 변화를 알 수 있고, 그에 따른 p^* 의 변화를 알게 된다. T 와 p^* 는 다음의 관계를 갖게 된다.

$$p^* = cT^2 \quad (13)$$

(c : scaling factor)

서론에서 제시했던 본 논문의 주요 목표인 최적 옥션 주기(T^*)를 찾기 위해 T 에 따른 주 사용자의 이득과 손해를 식으로 표현하였다. 주 사용자는 옥션이 시작할 때마다 부 사용자들에게 돈을 받으므로 주 사용자가 얻는 이득은(최적의 가격일 때) p^*/T 라고 표현할 수 있다. 반면 주 사용자는 옥션을 시작하기 전에 남겨두었던 주파수 외에 옥션 주기 내에서 더 필요한 주파수가 생기면 옥션을 통해 일정부분 손해를 봤다고 볼 수 있다. T 가 길수록 이와 같은 상황이 발생할 확률이 증가할 것이며, 상황이 발생했을 경우 피해도 커질 것이다. 그렇기 때문에 우리는 주 사용자가 주파수를 사용하지 못할 경우의 손해를 $\chi \exp(T)$ 로 표현하였다. 여기서 χ 는 손해계수(damage degree)를 의미한다. 즉, 주 사용자의 통신이 중요한 통신일수록 손해계수의 값은 크게 설정해야 한다. 여기서 손해정도는 경매 주기 동안 주사용자가 원하는 사용량 B_{req} 와 관련이 있으므로 시간에 따라 변하는 특성을 가져야 하지만, 본 논문에서는 χ 와 B_{req} 의 관계는 다루지 않았다. 이득과 손해를 합쳐 주 사용자의 효용 함수를 구하면 다음과 같다.

$$U_p = \frac{p^*}{T} - \chi \exp(T) \quad (14)$$

위의 효용 함수는 이전에 구한 p^* 와 T 의 관계식을 통해 다음과 같이 변형된다.

$$U_p = \frac{cT^2}{T} - \chi \exp(T) \quad (15)$$

$$= cT - \chi \exp(T) \quad (16)$$

위 식을 살펴보면 첫 번째 항은 T 에 따라 선형적으로 증가한다. 반면 두 번째 항은 T 에 따라 지수적으로 감소한다. 지수적으로 감소하는 값이 선형적으로 증가하는 값보다 커질 경우 이득이 낮아질 것이다. 이득을 가장 크게 하는 T 를 구하기 위해서 효용 함수를 시간 T 에 대해서 미분하면 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

$$\frac{dU_p}{dT} = c - \chi \exp(T) \quad (17)$$

미분 방정식이 0이 되는 최적 T 를 찾으면 다음과 같다.

$$c - \chi \exp(T^*) = 0 \quad (18)$$

$$c = \chi \exp(T^*)$$

$$\frac{c}{\chi} = \exp(T^*)$$

$$T^* = \ln\left(\frac{c}{\chi}\right)$$

마지막으로 c 값을 계산하면 T^* 를 구할 수 있다. c 값을 구하는 원리는 다음과 같다. 본 논문에서의 옥션 알고리즘은 초기 T 값을 1로 놓았다. 그 후 반복 알고리즘을 통해 p^* 가 구해진다. 식(13)에 따르면 $p^* = cT^2$ 이므로 $T=1$ 을 대입하면 $c = p^*$ 가 된다.

그림 5는 T 에 따른 주 사용자의 이득을 구하기 위해 모든 조항에 대해 시뮬레이션을 통해 구한 값을 보여준다. 표 2의 조건에 대해 식 (18)을 이용해 T^* 를 구하면 3.71이 나온다. 그림 5의 그래프를 살펴보면 T 가 3.7일 때 주 사용자의 이득이 가장 높다는 것을 알 수 있다. 즉 본 논문에서 제시한

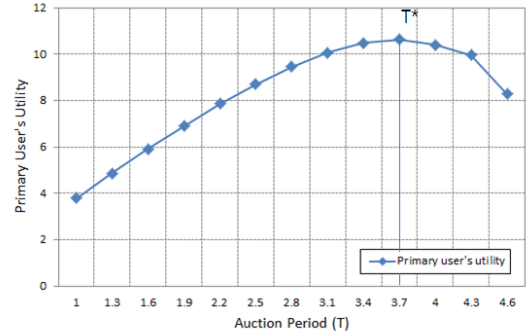


그림 5. T 의 변화에 따른 주 사용자의 이득
Fig. 5. Primary user's utility for auction period

방법을 이용해 수학적으로 도출한 T^* 가 최적의 옥션 주기라는 것을 확인할 수 있다.

이전의 논문^[10]에서 부 사용자들이 내쉬균형에 도달하는 과정을 보였었다. 본 논문에서 추가한 주 사용자 입장의 옥션 주기 결정에서도 T^* 에 이를 경우 T 를 변화시키면 자신의 이득이 낮아지게 되므로 자신의 전략을 변화시키지 않을 것이라는 것을 확인할 수 있다. 결국 주 사용자가 추가된 옥션 게임에서 주 사용자와 부 사용자 모두 내쉬균형에 도달 한다는 것을 확인할 수 있다.

T^* 를 구한 이후에 주 사용자는 변경된 옥션 주기 T^* 에 대해 자신이 얻을 것으로 예상되는 최적 주파수 가격(p^{**})을 식(13)을 이용해 바로 구할 수 있다.

$$p^{**} = p^* T^{*2} \quad (19)$$

최적의 옥션주기와 그에 따른 주파수 가격을 찾아내는 가격을 정리하면 다음과 같다.

Step6. 주 사용자는 찾아진 최적의 p^* 를 이용하여 최적의 T^* 를 구하게 된다. T 가 변하면 부 사용자들이 느끼는 주파수 가치(r_i)가 변하게 되므로 주 사용자는 다시 최적의 주파수 가격 (p^*)을 구해낸다. 구해낸 T^* 와 p^* 를 부 사용자들에게 알려주어 옥션을 계속 진행하게 된다.

본 논문의 옥션 알고리즘은 앞에서 설명한 것과 같이 Step1부터 Step6까지 진행이 된다. Step1부터 Step6까지 정리하면 다음과 같다.

표 1. 주파수 옥션 알고리즘
Table 1. Spectrum auction algorithm

<p>1 .Initialization</p> <ul style="list-style-type: none"> - for SU $\forall i$ choose r_i, k_i and initial b_i - for PU calculate initial p (2),(3)
<p>2. Information transmission</p> <ul style="list-style-type: none"> - PU gives information to SUs p, T
<p>3. During a period of T_A</p> <ul style="list-style-type: none"> - SUs bid frequency to PU - PU allocates spectrum to SUs (4) - SUs calculate utility function $U_{SU,i}$ (6)
<p>4. Equilibrium check</p> <ul style="list-style-type: none"> - If SUs satisfy (9) then go to step 5 else PU raises a price and go to step 2
<p>5. Calculates p^{**}, T^*</p> <ul style="list-style-type: none"> - PU finds p^* - PU calculates p^{**}, T^* by using p^* (11) - (19)

표 2. 모의실험 파라미터
Table 2. Simulation parameter

PU parameter		SU parameter	
B_{tot}	10MHz	N	3
χ	0.1	r_1, r_2, r_3	8,12,10
-	-	k_1, k_2, k_3	1,1,1

각각의 부 사용자들은 주 사용자가 설정한 주파수 가격과 옥션 주기를 통하여 자신의 입찰 주파수 양을 계속해서 변경한다. 주 사용자는 부 사용자들이 입찰하는 양을 보고 주파수 가격과 옥션 주기를 변경한다.

그림 6을 살펴보면 옥션이 반복될수록 부 사용자들의 b_i 가 균형 상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 또한 통신에 대한 가치가 높은 부 사용자일수록 높은 b_i 가 결정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 통신을 통해 이득을 많이 보는 만큼 많은 주파수를 확보하려는 생각 때문이다.

IV. 모의실험

본 장에서는 본 논문에서 제안하는 기법을 이용한 옥션 알고리즘의 정확한 동작 여부를 확인하기 위하여 매트랩을 통한 시뮬레이션 환경을 구현하였다. 부 사용자의 입찰 주파수 값이 평형상태에 도달하면서 구해진 주 사용자의 효율적인 주파수 가격과 수식으로 구해본 값의 오차를 확인해 보았다. 또한 주파수 가격의 증가폭을 변화시켜 보면서 오차와의 관계를 확인하였다.

실험은 1000m×1000m의 인지무선 네트워크 환경을 가정하였으며, 네트워크에는 한 개의 주 사용자와 세 개의 부 사용자가 존재한다. 주 사용자가 사용하는 총 주파수는 표 2와 같이 10MHz를 사용하고 손해 계수는 0.1로 고정하였다. 부 사용자의 통신 가치는 각각의 부 사용자에게 ($r_1 = 8, r_2 = 12, r_3 = 10$)을 부여하였고, 주파수 효율성(k_i)은 모든 부 사용자에게 1로 고정 값을 부여하였다.

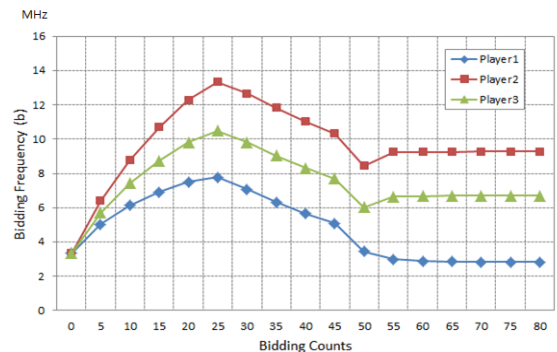


그림 6. b_i 의 균형상태

Fig. 6. b_i 's equilibrium

그림 7은 경매진행(bidding count)에 따라 주파수 가격이 어떻게 변화하는지를 보여준다. 초기 30회의 옥션에서는 p 가 고정되어있다. 첫 step 5에 도달하려면 step 3와 step 4의 많은 반복이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그 이후에는 step 5의 조건문에 따라 부 사용자들의 b_i 가 균형 상태에 도달한 것을 보고 p 를 올리게 된다. 110회의 옥션까지 p 를 올린 뒤, step6에 도달함을 확인할 수 있다. step6에서 바로 T^* 가 결정되고 그에 따른 주파수 가격 p^{**} 가 결정되는 것을 확인할 수 있다.

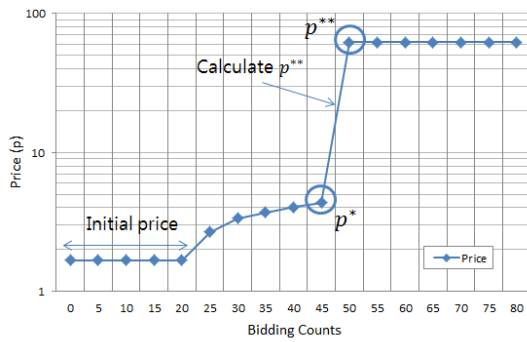


그림 7. 주 사용자의 p 변화
Fig. 7. Change of primary user's p

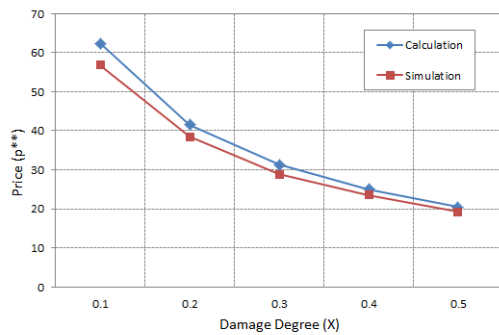


그림 8. 부 사용자들의 r_i 에 따라 이론적으로 구한 p^{**} 와 시뮬레이션을 이용해 구한 p^{**} 의 비교
Fig. 8. Comparison of calculated p^{**} and simulated p^{**}

그림 8을 통해 이론으로 구한 p^{**} 와 시뮬레이션을 이용해 구한 p^{**} 가 같게 나오는지 확인하였다. 그래프를 보면 약간의 차이가 있음을 알 수 있는데 그 이유는 p 는 Δp 만큼 씩 증가하기 때문에 p 값은 연속적으로 증가하지 않고 이산적으로 증가한다. 이러한 이유로 오차가 발생함을 확인하였고, 실제로 Δp 를 작게 할수록 오차가 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 그림 8을 살펴보면 손해 계수가 높아질수록 주파수 가격(p^*)이 작아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 최적의 옥션 주기(T^*)가 작아지기 때문에 그에 따른 주파수 가격이 낮게 형성되는 것이다.

그림 9는 손해 계수의 변화에 따른 최적의 옥션 주기(T^*)를 구한 것이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 주 사용자가 느끼는 피해 정도가 크면 T^* 가 작아지게 된다. 같은 옥션 주기일 때라도 주 사용자가 자신이 필요할 때 주파수를 사용하지 못함으로써

느끼는 피해가 크다면 주 사용자의 이득은 낮아지게 된다. 그렇기 때문에 주 사용자는 최고의 이득을 얻기 위해서는 느끼는 피해가 클수록 옥션 주기를 낮게 결정할 것이다.

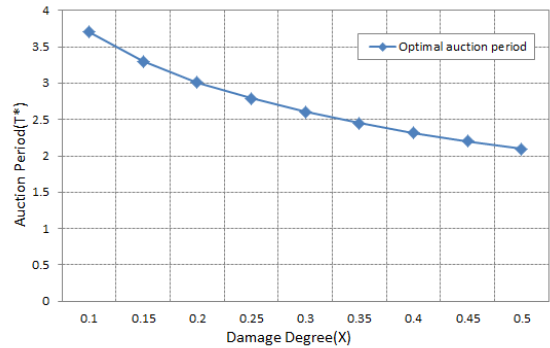


그림 9. 손해 계수 변화에 따른 최적 옥션 주기 변화
Fig. 9. Optimal T^* vs. damage degree changes

그림 10은 부 사용자의 통신 가치 변화에 따른 최적의 옥션 주기(T^*)를 구한 것이다. 부 사용자들이 느끼는 통신 가치가 클수록 부 사용자들은 주 사용자에게 입찰을 높게 할 것이다. 주 사용자 입장에서는 부 사용자들이 느끼는 통신 가치가 클 때 옥션 주기를 길게 할수록 자신이 입는 피해보다도 더 많은 이득을 얻게 된다. 그렇기 때문에 부 사용자들이 느끼는 통신가치가 증가함에 따라 주 사용자가 결정하는 최적의 옥션 주기도 증가하게 된다.

마지막으로 그림 11은 옥션 주기가 단순히 1, 2, 3, 4로 설정되어 있을 때와, 최적의 옥션 주기를 찾았을 때 주 사용자의 이득을 비교한 그래프이다. 옥션 주기를 고정했을 때보다 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용해 최적의 옥션 주기를 찾았을 경우 주 사용자의 이득이 항상 높다는 것을 확인할 수 있다. 손해 계수에 따라 주 사용자가 결정하는 최적의 옥션 주기가 변하므로 그림 10과 같이 그래프가 나타났다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

동적인 주파수 분배는 인지 무선 기술에서 중요한 부분이다. 본 논문은 옥션 게임을 이용한 새로운 주파수 분배 방식을 제안하였다. 최적의 주파수 가격만을 위주로 분석한 이전 연구^[10]와 달리 우리는 주파수 가격(p)과 옥션 주기(T)를 동시에 고려하였다. 주 사용자 입장에서 옥션 주기를 길게 했을 경우 자신이 필요할 때 주파수를 사용하지 못할 확률

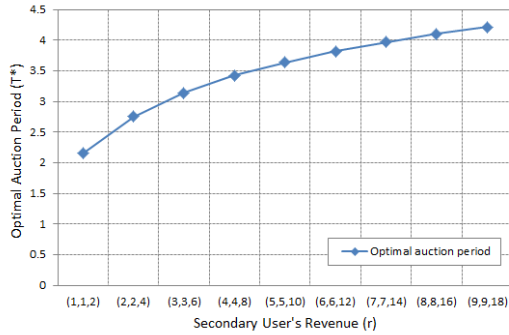


그림 10. 부 사용자의 통신 가치 변화에 따른 최적 옥션 주기 변화
Fig. 10. Optimal T vs. secondary user's revenue

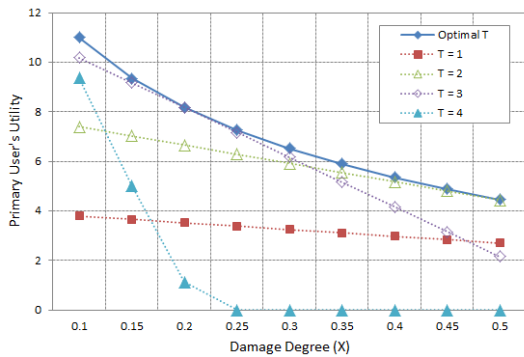


그림 11. 옥션 주기 변화에 따른 주 사용자의 이득 비교
Fig. 11. Primary user's utility for different T values

이 증가한다. 그러나 부 사용자 입장에서 보면 옥션 주기가 짧을 경우 해당 옥션을 통해 얻는 주파수의 가치를 낮게 생각할 것이다. 이와 같은 점을 고려하여 본 논문에서는 주파수 가격과 옥션 주기를 고려한 주 사용자를 위한 효용 함수를 만들었다. 부 사용자의 통신 가치 변화에 따른 최적의 주파수 가격 결정 관계를 실험을 통해 구해낸 뒤에, 주 사용자 입장에서 옥션 주기를 어떻게 결정하느냐에 따라 최적의 주파수 가격이 어떤 식으로 형성 될 것인지를 추론하여 최적의 옥션 주기를 구해내었다. 최적의 옥션 주기를 정했을 때 주 사용자의 이득이 가장 높은 것을 확인하였으며, 결국 주 사용자가 전략을 변화시키지 않을 것이므로 내쉬 균형에 도달했다는 것을 설명하였다. 또한 최적의 옥션 주기를 결정 한 뒤 그에 맞는 주파수 가격을 다시 결정하였다. 이론적으로 계산한 최적의 주파수 가격과 실험적으로 구한 최적의 주파수 가격이 같게 나오는 것과 최적의 옥션 주기를 찾았을 때 주 사용자의 이득이 최대값이 되는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안

한 옥션 주파수 분배 방식은 인지 무선 네트워크에서 주 사용자와 부 사용자의 이득을 최대화 하는 옥션 주파수 분배 방식에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

References

- [1] J. Mitola and G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [2] K. J. Ko, S. H. Hwang, B. J. Jeong, and C. J. Kim, "Cognitive radio technologies and standardization activities," *KICS Inform. Commun. Mag.*, vol. 27, no. 8, pp. 1-7, July 2010.
- [3] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 32-39, Apr. 2008.
- [4] Z. Ji and K. J. R. Liu, "Cognitive radios for dynamic spectrum access-dynamic spectrum sharing: a game theoretical overview," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 5, pp. 88-94, May 2007.
- [5] Y. Zhang, D. Niyato, P. Wang, and E. Hossain, "Auction-based resource allocation in cognitive radio systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 11, pp. 108-120, Nov. 2012.
- [6] S. H. Chun and R. J. La, "Auction mechanism for spectrum allocation and profit sharing," in *Proc. Int. Conf. Game Theory Networks (GameNets '09)*, pp. 497-507, Istanbul, Turkey, May 2009.
- [7] A. Gopinathan and Z. Li, "A prior-free revenue maximizing auction for secondary spectrum access," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 86-90, Shanghai, China, Apr. 2011.
- [8] L. Chen, D. Iellamo, M. Coupechoux, and P. Godlewski, "An auction framework for spectrum allocation with interference constraint in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1-9, San Diego,

U.S.A., Mar. 2010.

- [9] Y. Chen , Y. Wu, B. Wang, and K. J. R. Liu, "Spectrum auction games for multimedia streaming over cognitive radio networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 8, pp. 2381-2390, Aug. 2010.
- [10] X. Wang, Z. Li, P. Xu, Y. Xu, and X. Gao, "Spectrum sharing in cognitive radio networks-an auction-based approach," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybernetics, Part B: Cybernetics*. vol. 40, no. 3, pp. 587-596, June 2010.
- [11] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T.Basar, and A. Hjorungnes, *Game Theory in Wireless and Communication Networks*, 1st Ed, Cambridge Univ. Press, 2012.
- [12] L. Anderegg and S.Eidenbenz, "Ad hoc-VCG: a truthful and cost-efficient routing protocol for mobile ad hoc networks with selfish agents," in *Proc. 9th Annu. Int. Conf. Mobile Comput. Networking (MobiCom '03)*, pp. 245-259, New York, U.S.A., June 2003.

박진석 (Jin-Seok Park)



2013년 8월 인하대학교 정보통신공학과 졸업
 2013년 9월~현재 한국과학기술원 전산학과 석사과정
 <관심분야> Cognitive Radio, Game theory, Auction theory

강건규 (Keon-Kyu Kang)



2013년 2월 인하대학교 정보통신공학과 졸업
 2013년 3월~현재 인하대학교 정보통신 공학과 석사과정
 <관심분야> Cognitive Radio, Game theory, Spectrum Sensing

이상영 (Sang-Young Lee)



2008년 3월~현재 인하대학교 정보통신공학과 학사과정
 <관심분야> Cognitive Radio, Game theory

백선우 (Sun-Woo Baek)



2008년 3월~현재 인하대학교 정보통신공학과 학사과정
 <관심분야> Game theory, Auction theory

유상조 (Sang-Jo Yoo)



1988년 2월 한양대학교 전자통신공학과 졸업
 1990년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업
 2000년 8월 한국과학기술원 전자전산학과 졸업
 1990년 3월~2001년 2월 KT 연구 개발본부
 2001년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수
 <관심분야> 초고속 통신망, 무선 MAC 프로토콜, 인터넷 QoS, Cross-layer 프로토콜 설계, Cognitive Radio Network