

## 다른 이차사용자의 신뢰 벡터를 추적하여 이차사용자 사이의 충돌을 줄이기 위한 동적 스펙트럼 접속 방식

이유태\*

### Dynamic Spectrum Access Using Belief Vector Tracking Method for Other Competing Secondary Users

Yutae Lee\*

Department of Information and Communication Engineering, Donggeui University, Busan 614-714, Korea

#### 요 약

동적 스펙트럼 접속 방식에서 각 이차사용자는 자신의 성능을 높이기 위하여 채널의 상태를 추적하여 채널이 사용되지 않을 가능성이 가장 높은 채널을 선택하게 된다. 다수의 이차사용자가 동일한 동적 스펙트럼 접속 방식에 따라 동작한다면, 대부분의 이차사용자는 비슷한 결과의 채널 상태 추적 정보를 얻게 된다. 이로 인해 각 이차사용자가 동일한 채널을 선택할 가능성이 높아지고, 이차사용자 사이의 충돌이 발생할 가능성이 높아진다. 본 논문은 이러한 이차사용자 사이의 충돌을 줄이기 위하여 다른 이차사용자의 신뢰 벡터를 추적하여 그 결과를 채널 선택에 이용하는 동적 스펙트럼 접속 방식을 제안한다. 시뮬레이션 결과는 본 논문에서 제안한 방식이 다른 이차사용자를 고려하지 않는 방식에 비해 성능이 더 나아진다는 것을 보여준다.

#### ABSTRACT

To achieve better performance in dynamic spectrum access networks, each secondary user tracks channels and chooses a good channel to transmit its packet. When all secondary users adopt the same dynamic spectrum access policy, they have similar channel information, which leads secondary users to choose the same channel and more collisions among them. To relieve this problem, we propose an access policy using belief vector tracking method for other competing secondary users. Simulation results are provided to show that the proposed policy yields better performance than the existing policies which do not take into account what other secondary users are doing.

**키워드** : 동적 스펙트럼 접속, 신뢰 벡터 추적, 충돌 회피, 성능 분석

**Key word** : Dynamic Spectrum Access, Belief Vector Tracking, Collision Avoidance, Performance Evaluation

접수일자 : 2013. 09. 17 심사완료일자 : 2013. 10. 08 게재확정일자 : 2013. 10. 21

\* **Corresponding Author** Yutae Lee(E-mail:ylee@deu.ac.kr, Tel:+82-51-890-1682)

Department of Information and Communication Engineering, Donggeui University, Busan 614-714, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.11.2547>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

무선 통신 기술의 발전으로 무선 통신 서비스에 대한 수요가 급속하게 증가함에 따라 주파수 자원의 부족 문제가 크게 대두되고 있다. 주파수 부족 문제를 해결할 수 있는 기술로써 인지 무선망에 대한 관심이 증가하고 있다[1, 2]. 이러한 인지 무선망을 실현하기 위해서는 효율적인 동적 스펙트럼 접속 기술의 개발이 선행되어야 한다.

동적 스펙트럼 접속 방식에서 각 이차사용자는 자신의 성능을 높이기 위하여 채널의 상태를 추적하여 채널이 일차사용자에 의해 사용되지 않을 가능성이 가장 높은 채널을 선택하게 된다[3]. 이차사용자는 다른 이차사용자가 어떤 동작을 취할 것인지를 고려하지 않은 채 자신의 트래픽을 전송하기 위한 최선의 채널을 선택한다. 다수의 이차사용자가 동일한 동적 스펙트럼 접속 방식에 따라 동작한다면, 대부분의 이차사용자는 비슷한 결과의 채널 상태 추적 정보를 얻게 된다. 이로 인해 서로 다른 이차사용자가 동일한 채널을 선택할 가능성이 높아지고, 이차사용자 사이의 충돌이 발생할 가능성이 높아진다. 즉, 동일한 동적 스펙트럼 접속 방식에 따라 동작하는 이차사용자가 모두 좋은 채널만 선택하기를 원한다면, 그들은 서로 충돌하게 될 것이며 다른 채널에서의 전송 기회조차 잃어버리게 될 것이다.

기존의 많은 동적 스펙트럼 접속 방식은 이차사용자 사이의 충돌에 의해 효율성이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 IEEE 802.11 등에서의 이진 백오프 방식을 이차사용자들 사이에 도입하는 방법이 있다[4, 5]. 이 방식은 이차사용자가 채널에 접속하는 시점을 랜덤하게 선택하여 충돌을 막고자 하는 방법이다. 논문[6]은 myopic 방식[7, 8]를 보완한 Myopic/CA 방식을 제안하여 이차 사용자 사이의 충돌을 줄이고자 했다. Myopic/CA 방식에서 각 이차사용자는 가장 좋은 채널 선택을 고집하는 것이 아니라, 몇 개의 좋은 채널 중 하나를 랜덤하게 선택한다.

본 논문에서는 이차사용자들이 동일한 채널을 선택할 가능성을 줄이기 위한 다른 방법으로써 다른 이차사용자의 신뢰 벡터를 추적하는 방식을 제안한다. 제안한 방식을 시뮬레이션을 통해 다른 이차사용자를 고려하지 않는 방식과 비교한다.

## II. 네트워크 모델

본 논문에서는  $N$  개의 독립된 채널이 있는 환경을 고려하며, 각 채널의 대역폭은  $B_i, i = 1, 2, \dots, N$ ,라 한다. 각 채널은 일차사용자에 의해 사용되고 있는 상태 0 (점유)와 사용되고 있지 않은 상태 1(미점유) 중 하나의 상태에 있게 된다. 슬롯  $t$ 에서 일차사용자에 의한 채널  $i$ 의 점유 여부는 두 상태 0과 1을 갖는 이산 시간 마르코프 체인  $\{S_i(t), t = 1, 2, \dots\}$ 로 모형화한다. 채널  $i$ 가 상태 0에서 다음 슬롯에 상태 1로 바뀔 확률을  $\alpha_i$ , 상태 1에서 다음 슬롯에서도 상태 1에 머물러 있을 확률을  $\beta_i$ 라 하자.

이차사용자는  $N$  개의 채널에서 자신의 트래픽을 전송할 기회를 찾고 있다. 이차사용자들은 서로 간에 정보의 교환 없이 독립적으로 채널을 센싱하고 접속을 시도한다. 이차사용자들은 한 슬롯에서 최대 하나의 채널만 센싱하고, 한 번에 하나의 채널에 접속할 수 있다고 가정한다[9, 10].

각각의 이차사용자는 각 채널에 대한 자신의 이전 센싱 결과와 접속 결과를 바탕으로 각 채널이 일차사용자에 의해 점유되어 있지 않을 확률에 대한 신뢰 벡터 정보를 갖고 있다[3, 11]. 슬롯의 시작 시점에 전송할 패킷이 있는 각 이차사용자는 자신의 신뢰 벡터를 기반으로 센싱할 채널을 선택하고, 센싱 결과와 신뢰 벡터를 기반으로 어떤 채널에 패킷을 전송할지 결정한다. 이 때 해당 슬롯에서 패킷을 성공적으로 전송할 가능성을 가장 높일 수 있는 방향으로 센싱할 채널과 접속 시도할 채널을 선택한다.

본 논문에서는 다른 이차사용자와의 충돌을 줄이기 위하여 각 이차사용자는 다른 이차사용자의 신뢰 벡터 값을 추적한 추적 벡터 정보를 결정한다. 각 이차사용자는 자신의 신뢰 벡터와 함께 이 추적 벡터 정보를 이용하여 자신이 센싱할 채널과 접속 시도할 채널을 선택한다.

## III. 센싱 및 접속 방식

센서의 거짓 경보 확률을  $\epsilon$ , 미검출 확률을  $\delta$ 라 하자. 본 논문에서는 미검출 확률이 일차사용자가 허용할 수 있는 최대 충돌 확률보다 크지 않는 센서를 선택한다고

하자. 이 경우 채널이 일차사용자에 의해 점유되어 있지 않다고 센싱될 때 자신의 패킷을 전송하게 되면, 일차사용자가 허용할 수 있는 충돌 확률을 만족시킬 수 있다.

이차사용자는 일차사용자가 현재 채널을 사용하고 있는지 아닌지 정확하게 알 수 없으며, 이차사용자들은 네트워크에 대한 정보를 공유하지 않는다고 가정한다. 두 이차사용자가 있는 경우에 이차사용자 중 임의의 하나를 태그드(tagged) 이차사용자로 선택하여 설명하면 다음과 같다. 다른 이차사용자도 여기에서 설명하는 태그드 이차사용자와 동일한 방식으로 동작한다. 슬롯  $t$ 의 시작 시점에서 이 태그드 이차사용자는 과거에 채널을 센싱한 결과와 채널에 접속한 결과에 근거하여 각 채널에 대해 자신이 가진 최신 정보를 신뢰 벡터  $\Lambda(t) \equiv (\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_N(t))$ 에 요약한다. 여기서 신뢰 확률  $\lambda_i(t)$ 는 태그드 이차사용자가 과거에 채널을 센싱한 결과와 접속한 결과가 주어졌을 때, 채널  $i$ 가 슬롯  $t$ 의 시작 시점에서 일차사용자에 의해 점유되어 있지 않을 조건부 확률이다. 태그드 이차사용자는 다른 이차사용자의 신뢰 벡터에 대한 최신 정보를 추적 벡터  $\Omega(t) \equiv (\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_N(t))$ 에 요약한다. 여기서  $\omega_i(t)$ 는 다른 이차사용자가 슬롯  $t$ 의 시작 시점에서 채널  $i$ 가 일차사용자에 의해 점유되어 있지 않다고 믿는 신뢰 확률을 태그드 이차사용자가 추적한 값이다. 이 추적 벡터  $\Omega(t)$ 는 다른 이차사용자의 신뢰 벡터와는 같지 않을 수 있다.

본 논문에서는  $\Lambda(t)$ 와  $\Omega(t)$ 에 근거하여 해당 슬롯에서 처리율을 가장 높일 수 있는 동적 스펙트럼 접속 방식을 제안한다. 슬롯  $t$ 에서의 기대 보상값  $R(t)$ 를 슬롯  $t$ 에서 전송할 수 있는 트래픽의 양으로 정의하자. 슬롯  $t$ 의 시작 시점에서 채널 상태가 변하기 전에 태그드 이차사용자의 신뢰 벡터와 추적 벡터가  $\Lambda(t)$ 와  $\Omega(t)$ 일 때, 태그드 이차사용자가 채널  $a$ 를 선택하고 다른 이차사용자가 채널  $b$ 를 선택한다고 태그드 이차사용자가 믿고 있다면, 그 슬롯에서 태그드 이차사용자의 기대 보상값  $R(t)$ 는

$$R(t) = \begin{cases} R_a(\Lambda(t)) + R_a(\Omega(t)), & a \neq b, \\ 0, & a = b, \end{cases} \quad (1)$$

이다. 여기서

$$R_a(x_1, x_2, \dots, x_N) \equiv [x_a \beta_a + (1 - x_a) \alpha_a] B_a \quad (2)$$

는 이차사용자의 채널에 대한 신뢰 벡터 또는 추적 벡터가  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 이고 선택된 채널이  $a$ 인 경우, 해당 슬롯에 전송할 수 있는 트래픽의 양이다. 네 개의 채널  $a_1^*(t), b_1^*(t), a_2^*(t), b_2^*(t)$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$a_1^*(t) \equiv \operatorname{argmax}_{a \in \{1, \dots, N\}} R_a(\Lambda(t)) \quad (3)$$

$$b_1^*(t) \equiv \operatorname{argmax}_{b \in \{1, \dots, N\}} R_b(\Omega(t)) \quad (4)$$

$$a_2^*(t) \equiv \operatorname{argmax}_{a \in \{1, \dots, N\} - \{a_1^*(t)\}} R_a(\Lambda(t)) \quad (5)$$

$$b_2^*(t) \equiv \operatorname{argmax}_{b \in \{1, \dots, N\} - \{b_1^*(t)\}} R_b(\Omega(t)) \quad (6)$$

태그드 이차사용자에 의해 선택된 채널을  $a^*(t)$ 라 하고, 다른 이차사용자가 선택한다고 태그드 이차사용자가 믿고 있는 채널을  $b^*(t)$ 라 하자. 슬롯  $t$ 에서의 기대 보상값이 최대가 되도록 센싱할 채널을 선택해야 한다면, 태그드 이차사용자는  $a^*(t)$ 와  $b^*(t)$ 를 다음과 같이 선택하면 된다. 먼저  $a_1^*(t) \neq b_1^*(t)$ 인 경우,

$$a^*(t) = a_1^*(t), b^*(t) = b_1^*(t) \quad (7)$$

이다.  $a_1^*(t) = b_1^*(t)$ 인 경우,

$$R_{a_1^*(t)}(\Lambda(t)) + R_{b_2^*(t)}(\Omega(t)) > R_{a_2^*(t)}(\Lambda(t)) + R_{b_1^*(t)}(\Omega(t)) \quad (8)$$

이면

$$a^*(t) = a_1^*(t), b^*(t) = b_2^*(t) \quad (9)$$

이고,

$$R_{a_1^*(t)}(\Lambda(t)) + R_{b_2^*(t)}(\Omega(t)) < R_{a_2^*(t)}(\Lambda(t)) + R_{b_1^*(t)}(\Omega(t)) \quad (10)$$

이면

$$a^*(t) = a_2^*(t), b^*(t) = b_1^*(t) \quad (11) \quad i \neq b^*(t) \text{ 이고 } b^*(t) \neq 0 \text{ 일 때,}$$

이고, 나머지 경우면  $a^*(t)$ 를 랜덤하게 선택하고  $b^*(t) = 0$ 으로 표시한다. 여기서  $b^*(t) = 0$ 이라는 것은 다른 이차사용자가 랜덤하게 채널을 선택할 것이라고 태그드 이차사용자가 믿고 있다는 것을 의미한다.

슬롯  $t$ 에서 채널  $a$ 에 대한 센싱 결과를  $\Theta_a(t)$ 로 나타내고, 채널이 점유되어 있다고 센싱하면 0의 값을 가지고 그렇지 않은 경우 1의 값을 가진다고 하자. 또한 채널  $a$ 에서의 전송 결과를  $K_a(t)$ 로 나타내고, 전송에 실패하면 0의 값을 가지고 성공하면 1의 값을 가진다고 하자. 각 슬롯  $t$ 의 끝에서 태그드 이차사용자는 선택 채널  $a^*(t)$ ,  $b^*(t)$ , 센싱 결과  $\Theta_{a^*(t)}(t)$ , 전송 결과  $K_{a^*(t)}(t)$ 의 값에 따라 신뢰 벡터  $\Lambda$ 를 다음과 같이 갱신한다. 여기서  $\lambda_i^+(t) \equiv \lambda_i(t)\beta_i + \{1 - \lambda_i(t)\}\alpha_i$ 이다:  
 $i \neq a^*(t)$ 일 때,

$$\lambda_i(t+1) = \lambda_i^+(t); \quad (12)$$

$i = a^*(t)$  이고  $\Theta_i(t) = 0$ 일 때,

$$\lambda_i(t+1) = \frac{\lambda_i^+(t)\epsilon}{\lambda_i^+(t)\epsilon + \{1 - \lambda_i^+(t)\}(1-\delta)}; \quad (13)$$

$i = a^*(t)$  이고  $\Theta_i(t) = 1, K_i(t) = 1$ 일 때,

$$\lambda_i(t+1) = 1; \quad (14)$$

$i = a^*(t)$  이고  $\Theta_i(t) = 1, K_i(t) = 1, b^*(t) \neq 0$ 일 때,

$$\lambda_i(t+1) = 0; \quad (15)$$

$i = a^*(t)$  이고  $\Theta_i(t) = 1, K_i(t) = 1, b^*(t) = 0$ 일 때,

$$\lambda_i(t+1) = \frac{\lambda_i^+(t)(1-\epsilon)^2/N}{\lambda_i^+(t)(1-\epsilon)^2/N + \{1 - \lambda_i^+(t)\}\delta}. \quad (16)$$

태그드 사용자는 추적 벡터  $\Omega$ 를 다음과 같이 갱신한다. 여기서  $\omega_i^+(t) \equiv \omega_i(t)\beta_i + \{1 - \omega_i(t)\}\alpha_i$ 이다:

$$\omega_i(t+1) = \omega_i^+(t); \quad (17)$$

$i = b^*(t)$  일 때,

$$\omega_i(t+1) = \lambda_i(t+1)(1-\epsilon) + \frac{[\lambda_i(t+1)\epsilon + \{1 - \lambda_i(t+1)\}(1-\delta)]\omega_i^+(t)\epsilon}{\omega_i^+(t)\epsilon + \{1 - \omega_i^+(t)\}(1-\delta)}; \quad (18)$$

$i = a^*(t)$  이고  $b^*(t) = 0, \Theta_i(t) = 1, K_i(t) = 1$ 일 때,

$$\omega_i(t+1) = \frac{N-1}{N}\omega_i^+(t) + \frac{1}{N}\lambda_i(t+1)\epsilon \frac{\omega_i^+(t)\epsilon}{\omega_i^+(t)\epsilon + \{1 - \omega_i^+(t)\}(1-\delta)}; \quad (19)$$

$i = a^*(t)$  이고  $b^*(t) = 0, \Theta_i(t) = 1, K_i(t) = 0$ 일 때,

$$\omega_i(t+1) = \frac{N-1}{N}\omega_i^+(t) + \frac{1}{N} \left[ \frac{\{1 - \lambda_i(t+1)\}(1-\delta)\omega_i^+(t)\epsilon}{\omega_i^+(t)\epsilon + \{1 - \omega_i^+(t)\}(1-\delta)} + [\lambda_i(t+1)(1-\epsilon) + \{1 - \lambda_i(t+1)\}\delta] \times \frac{\omega_i^+(t)(1-\epsilon)^2/N}{\omega_i^+(t)(1-\epsilon)^2/N + \{1 - \omega_i^+(t)\}\delta} \right]; \quad (20)$$

그 외의 경우, 즉  $i \neq a^*(t), b^*(t) = 0$ 이거나  $i = a^*(t), b^*(t) = 0, \Theta_i(t) = 0$ 일 때,

$$\omega_i(t+1) = \frac{N-1}{N}\omega_i^+(t) + \frac{1}{N}\lambda_i(t+1)(1-\epsilon) + \frac{1}{N} \left[ \frac{\{1 - \lambda_i(t+1)\}\delta\omega_i^+(t)(1-\epsilon)^2/N}{\omega_i^+(t)(1-\epsilon)^2/N + \{1 - \omega_i^+(t)\}\delta} + \frac{[\lambda_i(t+1)\epsilon + \{1 - \lambda_i(t+1)\}(1-\delta)]\omega_i^+(t)\epsilon}{\omega_i^+(t)\epsilon + \{1 - \omega_i^+(t)\}(1-\delta)} \right]. \quad (21)$$

#### IV. 시뮬레이션 분석

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 방식을 분석한다. 이차 사용자는 포화 트래픽 환경에서 한 번에 하나의 채널만 센싱하고, 센싱은 즉각적으로 이루어지며 오류는 없다고 가정한다. 채널이 일차사용자에 의해 점유될 확률을 0.5로 유지한다.

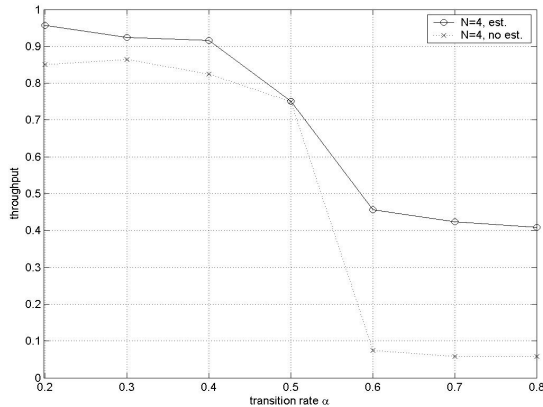


그림 1. 전이 확률  $\alpha$ 에 따른 처리율  
Fig. 1 Throughput against  $\alpha$

그림 1은 채널이 일차사용자에 의해 점유된 상태에서 다음 슬롯에 점유되지 않을 확률  $\alpha$ 를 변화시키며 처리율을 살펴본 것이다. 그림에서 실선으로 그려진 그래프는 본 논문에서 제안한 방식을 사용한 결과이고, 점선으로 그려진 그래프는 다른 이차사용자에 대한 추적 벡터를 고려하지 않은 경우이다. 본 논문에서 제안한 방식이 추적 벡터를 고려하지 않은 방식보다 시스템 처리율에 있어서 더 좋은 성능이 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 전이 확률  $\alpha$ 가 0.5일 때 두 방식의 처리율이 같아지는데, 이것은  $\alpha$ 가 0.5일 때 두 방식 모두 채널을 랜덤하게 선택하는 것과 같아지기 때문이다. 전이 확률  $\alpha$ 가 0.5보다 큰 경우는 채널 상태의 변화가 심해지는 경우에 해당하는데, 이 경우 채널 상태를 예측하는 것이 더 힘들어지므로, 전체적으로 처리율이 떨어지는 것으로 나타난다. 하지만 이 경우에 본 논문에서 제안한 방식과 추적 벡터를 사용하지 않는 방식 사이의 성능 격차가 커짐을 알 수 있다.

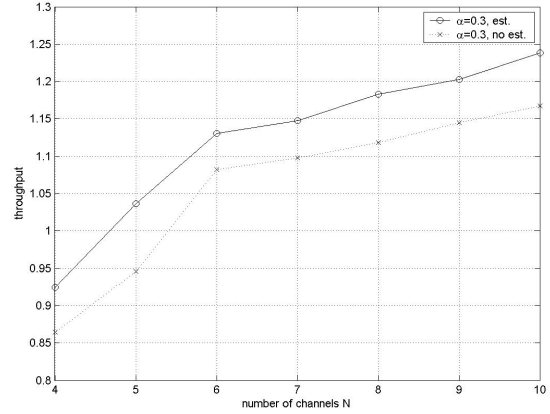


그림 2. 채널 수  $N$ 에 따른 처리율  
Fig. 2 Throughput against  $N$

그림 2는 채널 수  $N$ 을 변화시키며 처리율을 살펴본 것이다. 그림 1과 같이 그림 2에서도 실선으로 그려진 그래프는 본 논문에서 제안한 방식을 사용한 결과이고, 점선으로 그려진 그래프는 다른 이차사용자에 대한 추적 벡터를 고려하지 않은 경우이다. 채널의 수를 4개에서 10개까지 변화할 때 본 논문에서 제안한 방식이 추적 벡터를 고려하지 않은 방식보다 시스템 처리율에 있어서는 더 좋은 성능이 보이고 있다는 것을 알 수 있다.

#### V. 결론

본 논문은 이차사용자 사이의 충돌을 줄이기 위하여 다른 이차사용자의 신뢰 벡터를 추적하여 그 결과를 센싱할 채널을 선택하는데 이용하는 동적 스펙트럼 접속 방식을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 방식과 추적 벡터를 사용하지 않는 방식을 비교한 결과, 본 논문의 실험 환경에서 본 논문에서 제안한 방식이 시스템 처리율에 있어서 더 좋은 성능을 보이며, 채널 상태의 변화가 큰 경우 그 성능 향상의 정도가 커지는 것을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2012학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음 (과제번호 2012AA171)

### REFERENCES

- [ 1 ] Y. Lee and Y. J. Lee, "Modelling and analysis of non-saturated opportunistic spectrum access networks," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 15, pp. 883-884, Jul. 2011.
- [ 2 ] G. Xiang, J. Lee, and H. Park, "Cooperative node selection for the cognitive radio networks," *The Journal of the Korean Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 287-293, Feb. 2013.
- [ 3 ] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, and Y. Chen, "Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a POMDP framework," *IEEE Journal in Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 589-600, Apr. 2007.
- [ 4 ] J. S. Zhu, "Performance analysis of truncated binary exponential backoff MAC protocol for cognitive radio in the IEEE 802.16m network," M. Sc dissertation, Korea University, Korea, 2011.
- [ 5 ] L. Zhai and X. Zhang, "Modified 802.11-based opportunistic spectrum access in cognitive radio networks," *ETRI Journal*, vol. 34, no. 2, pp. 276-279, Apr. 2012.
- [ 6 ] Y. Lee, "Modified myopic policy with collision avoidance for opportunistic spectrum access," *Electronics Letters*, vol. 46, no. 12, pp. 871-872, Jun. 2010.
- [ 7 ] Q. Zhao, B. Krishnamachari, and K. Liu, "On myopic sensing for multi-channel opportunistic access: structure, optimality, and performance," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 5431-5440, Feb. 2008.
- [ 8 ] S. H. Ahmad, M. Liu, T. Javidi, Q. Zhao, and B. Krishnamachari, "Optimality of myopic sensing in multichannel opportunistic access," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 9, pp. 4040-4050, Sep. 2009.
- [ 9 ] S. Huang, X. Liu, and Z. Ding, "Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks," in *Proceeding of the 27th Conference on Computer Communications: IEEE INFOCOM 2008*, Phoenix: AZ, pp. 1-6, 2008.
- [ 10 ] Y. Lee, "Opportunistic spectrum access in unslotted primary networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E93B, no. 11, pp. 3141-3143, Nov. 2010.
- [ 11 ] Y. Lee, "Opportunistic spectrum access in cognitive networks," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 17, pp. 1022-1024, Aug. 2008.



이유태(Yutae Lee)

2001년 3월-현재 동의대학교 정보통신공학과 교수  
1998년 3월-2001년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원  
1997년 8월 한국과학기술원 수학과 이학박사  
※관심분야 : 통신망 performability 분석, 복잡계 분석, 동적 스펙트럼 접속