

# 인지 라디오의 채널할당 모델 설계 및 분석

## Design and Analysis of Cognitive Radio Channel Allocation Model

이광의\*, 노철우\*\*, 김경민\*\*

동의대학교 멀티미디어공학과\*, 신라대학교 컴퓨터정보공학부\*\*

Kwang-Eui Lee(kelee@deu.ac.kr)\*, Cheul-Woo Ro(cwro@silla.ac.kr)\*\*,  
Kyung-Min Kim(sillamin@silla.ac.kr)\*\*

### 요약

인지 라디오(Cognitive Radio: CR) 기술은 우선 사용자와 CR 사용자가 무선 자원을 공유하여 무선 자원의 효율을 증가시킬 수 있는 기술이다. 본 논문에서는 셀에서의 채널사용에 대한 부분정보만이 CR 사용자에게 알려져 있음을 가정하고 채널 할당 모델을 설계한다. 모델은 우선 사용자가 CR 사용자에게 의하여 간섭받지 않도록 설계하였으며, CR사용자의 채널 재획득과정을 포함한다. 설계된 인지 라디오에서의 채널 할당 모델을 분석하기 위하여 이에 대한 페트리 넷 모델 개발하였으며 성능분석을 수행 한다. 성능 지표로는 우선사용자 채널 점유율 변화에 따른 CR 사용자의 호 분실률과 처리율을 계산한다.

■ 중심어 : | 인지라디오 | 페트리넷 | SRN | 채널 할당 |

### Abstract

Cognitive Radios are encouraging solutions to improve the utilization of the radio spectrum. In this paper, we propose channel allocation model for cognitive radio and analyse the performance of the model with Petri Nets. We design the model with an assumption that only partial information about current channel allocation information is known to CR users. The model is designed to communicate efficiently avoiding interference with primary and CR users and contains channel reobtaining process of CR users. The dropping rate and throughput of CR users under the various channel utilization of primary users are given as performance index.

■ keyword : | Cognitive Radio | Petri Nets | SRN | Channel Allocation |

## 1. 서론

다양한 무선 통신 기술의 출현으로 무선 통신 환경에서 한정된 무선 자원에 대한 수요가 증가되고 있다. 부족한 무선자원을 효율적으로 관리하기 위한 기술로 CR(Cognitive Radio) 기술이 대두되고 있다[1].

CR 기술은 SDR(Software Defined Radio) 기술을 기

반으로 주변 환경을 인지하여 가용한 무선 자원을 선정하고 통신하는 기본적인 기능과 여러 가지 환경 파라미터를 지속적으로 갱신하는 학습 알고리즘이 결합된 기술이다[2-4]. CR 기술은 스펙트럼을 효율적으로 사용하기 위해 전송 속도, 변조 방식, 전송 전력제어 등 여러 가지 매개 변수를 수시로 재설정 및 제어하고, 통신 채널이 외부의 환경적인 영향 등으로 간섭을 받을 때 가장 적합한

채널을 찾아 이동할 수 있어야 한다. 또한 CR 시스템을 사용하기 위해서는 우선 사용자에게 대한 간섭이 없는 조건하에서 이용 가능한 채널을 효율적으로 사용하여야 한다[2]. 즉, CR 기술은 허가된 우선 사용자(Primary User)와 CR 사용자가 무선 자원을 공유하여 무선 자원의 효율을 증가시킬 수 있는 기술이다[5].

본 논문에서는 우선 사용자의 셀 영역과 CR 사용자의 센싱 영역의 비율에 따른 채널 할당 모델을 개발한다. 논문 구성은 다음과 같다. II장에서 CR 사용자에게 대한 채널 할당 모델의 구성과정을 보이고, III장에서 설계된 인지 라디오 모델에 대한 페트리 넷 모델을 제안한다. IV장에서 성능지표에 대한 수치결과를 분석하고, V장에서 결론을 맺는다.

## II. CR 채널 할당 모델

### 1. 전체 채널 정보에 기반한 사용자 모델

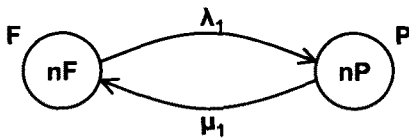


그림 1. 우선 사용자 모델

[그림 1]은 기본적인 우선 사용자 모델이다. 상태 F는 아직 할당되지 않은 채널(Free channel)을 의미하며,  $nF$ 는 할당되지 않은 채널 수로 가용 채널 수를 나타낸다. 상태 P는 우선 사용자를 의미하고  $nP$ 는 현재 채널을 사용하는 우선 사용자의 수가 된다. 우선 사용자를 위해 할당된 전체 채널 수를  $N$ 으로 가정하고, 우선 사용자가 새로운 채널을 요구하는 발생률은  $\lambda_1$  포아송 분포를 따르며 각 요청에 대한 서비스율은  $\mu_1$  지수분포를 따른다고 가정한다.

식 (1)은 채널 요청에 따른 상태 F와 P에 대한 채널 수의 변화를 나타낸다. 가용 채널 수  $nF$ 가 0보다 크면 채널 요청은 승인되며,  $nF$ 가 0이면,  $nF$ 와  $nP$ 의 값은 변화가 없고 새로운 요청은 차단된다.

$$\begin{cases} nF > 0, & nF = nF - 1 \\ & nP = nP + 1 = N - nF \\ nF = 0, & nF = 0 \\ & nP = N \end{cases} \quad (1)$$

[그림 2]는 기본 모델에 비용을 지불하지 않는 CR 사용자를 추가한 CR 모델이다.

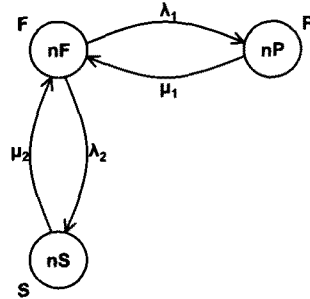


그림 2. CR 모델

CR 사용자는 우선 사용자에게 어떠한 간섭도 주지 않아야 한다. 즉, 우선 사용자는 CR 사용자의 존재 여부에 따라 우선 사용자의 사용 방법과 서비스 질이 변경되어서는 안 된다. [그림 2]에서 상태 S는 CR 사용자를 의미하며,  $nS$ 는 현재 채널을 사용하는 CR 사용자수를 의미한다. CR 사용자가 새로운 채널을 요구하는 발생률이  $\lambda_2$  포아송 분포를 따르고 각 요청에 대한 서비스율이  $\mu_2$ 라고 가정한다. 이 경우 CR 사용자가 채널을 사용하면 우선 사용자가 그 채널을 사용할 수 없게 된다. 그러나 우선 사용자는 CR 사용자의 채널 사용 여부에 간섭을 받지 않도록 하여야 하므로 [그림 2]의 CR 모델은 다음의 [그림 3]과 같이 변경할 수 있다.

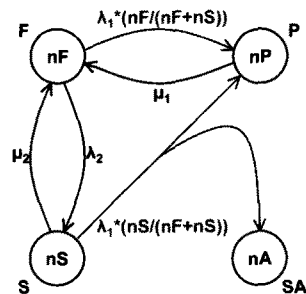


그림 3. 우선 사용자가 CR 사용자의 간섭을 받지 않도록 개선된 모델

[그림 3]에서 우선 사용자는 다른 우선 사용자가 사용하지 않는 임의의 채널을 요청하게 된다. 이때, 요청되는 채널은 실제로 사용되지 않는 채널이거나 CR 사용자가 사용하는 채널일 수 있다. 이는  $nF$ 와  $nS$ 의 비율이 되며 우선 사용자의 채널 요청은 [표 1]과 같이 전체 요청의 수와 이에 따른 승인의 수는 CR 사용자가 없던 경우와 동일해진다.

표 1. CR 사용자를 고려한 채널 발생률

	채널 발생률
가용 채널 요청 발생률	$\frac{nF}{(nF+nS)} \lambda_1$
CR 사용자가 사용하는 채널에 대한 요청 발생률	$\frac{nS}{(nF+nS)} \lambda_1$

우선 사용자가 CR 사용자가 사용 중인 채널을 요청한 경우 CR 사용자는 그 채널을 우선 사용자에게 양보하고 다른 채널을 검색하여 가용 채널이 있는 경우 채널을 계속 사용하게 된다. 따라서 채널을 반납한 CR 사용자 상태 SA로 나타낸다.  $nA$ 는 채널 사용 중 우선 사용자에게 채널을 반납하고 다른 채널을 검색 중인 CR 사용자 수를 나타낸다. 이러한 CR 사용자는 새로운 가용 채널이 있는 경우 그 채널을 이용하여 통신을 계속할 수 있으므로 [그림 4]와 같은 모델을 얻을 수 있다.

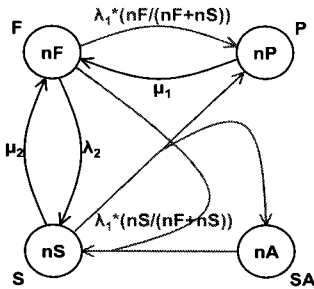


그림 4. CR 사용자의 채널 재획득 모델

2. 부분 채널 정보에 기반한 사용자 모델

[그림 4]는 CR 사용자가 현재 셀에서 채널 사용 상황을 모두 파악하는 경우이다. 그러나 일반적으로 CR 사용

자는 센싱 반경  $r$ 을 가지고 있고 그 영역은 셀의 반경  $R$ 보다 작으며, 이는 [그림 5]와 같다.

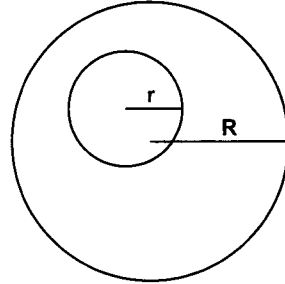


그림 5. CR 사용자의 센싱영역

그러므로 CR 사용자는 현재 셀에서 채널 사용 상황에 대한 커버 영역 비율은 식 (2)와 같다.

$$C = \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \quad (2)$$

따라서  $\lambda_2$ 로 발생하는 요청에 대하여 항상 채널을 이용할 수 있는 것은 아니다. CR 사용자가 자신의 센싱 영역을 기준으로 사용되지 않는 채널로 판단된 채널을 이용하고자 할 때, 그 채널이 자신의 센싱 영역 밖에서 사용하는 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 실제 사용되는 채널 수는  $N - nF$  즉,  $nP + nS$ 가 된다. 이 중에서 CR 사용자가 감지할 수 있는 채널 수는  $C(nP + nS)$ 이다. 사용되는 채널 중 알려진 채널 수를  $A$ , 알려지지 않은 사용되는 채널 수를  $B$ 라고 하면 이 비율은 다음 식 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{cases} A = C(nP + nS) \\ B = (1 - C)(nP + nS) \end{cases} \quad (3)$$

CR 사용자는  $N - A$ 개의 채널 중에 임의의 채널을 선택하게 되며, 이 중  $B$ 개의 채널은 실패를 하게 되므로 실패 확률  $pF$ 와 성공 확률  $pS$ 는 식 (4)와 같다.

$$\begin{cases} pF = \frac{B}{N - A} \\ pS = 1 - pF = 1 - \frac{B}{N - A} \end{cases} \quad (4)$$

[그림 4] 모델에 성공/실패 모델을 추가하게 되면 [그림 6]과 같이 된다.

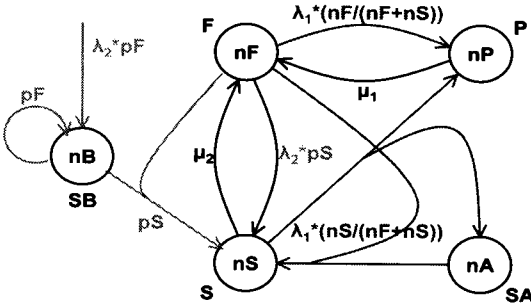


그림 6. 센싱 영역을 갖는 경우의 CR 모델

상태 SB는 채널 선정에 실패한 CR 사용자를 의미한다. [그림 6]과 같이  $\lambda_2 P_F$  확률로 요청 실패로 인하여 상태 SB로 가게 되며,  $\lambda_2 P_S$  확률로 성공하여 상태 S로 가게 된다. 상태 SB에 있는 CR 사용자는 채널을 재선택하며, 성공과 실패의 비율은 여전히  $pS$ 와  $pF$ 가 된다. 또한 이 경우 가용 채널을 검색하기 위한 재시도 기간까지 약간의 패널티를 고려할 수 있다.

마지막으로 상태 SA의 CR 사용자 역시 새로운 채널을 요청할 때 실패할 가능성이 생기므로 상태 SA는 상태 SB와 동일한 기능을 수행한다. 따라서 [그림 6]은 [그림 7]과 같이 수정된다.

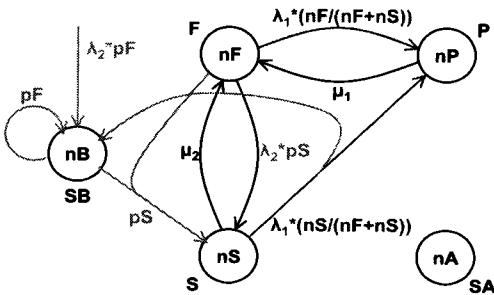


그림 7. 센싱 영역을 갖는 경우의 수정된 CR 모델

[그림 7]에서 상태 SA는 필요하지 않으므로 최종적인 모델은 [그림 8]과 같다.

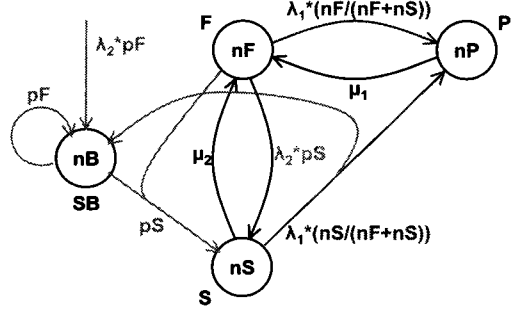


그림 8. 센싱영역을 갖는 경우의 최종 CR 모델

### III. 페트리 넷 모델링

#### 1. SRN

모델링 도구로 잘 알려진 추계적 페트리 넷은 모델 규격을 명세화할 수 있는 다양한 그래픽 기능을 가지고 있으며 대응되는 연속시간 마르코프 체인의 해에 의해 페트리 넷 모델의 해를 구할 수 있다. 추계적 페트리 넷은 각 천이에 발사시간을 할당한 페트리 넷의 확장모델이다. 천이가 지수분포의 발사시간을 가지는 천이를 시간천이(timed transition)이라고 하고 0의 발사시간을 가지는 천이 즉 시간의 지체 없이 바로 발사되는 천이를 즉시천이(immediate transition)이라고 한다. GSPN(Generalized SPN)[4]은 최소한 하나의 즉시천이가 발사 가능한 무형(vanishing) 마킹과 시간천이들의 마킹인 유형(tangible) 마킹으로 구성된다. GSPN에 마킹 종속, 다중 금지 아크, 가드 함수 등의 모델링 기능을 강화하여 복잡한 시스템을 간결한 모델로 모델링할 수 있게 해준 모델이 stochastic reward net (SRN)이다[6]. SRN에서 각 유형 마킹은 하나 이상의 보상률(reward rate)을 배정받을 수 있다. 시간천이의 발사율, 다수의 입출력 아크 그리고 하나의 마킹에 대한 보상률과 같은 파라미터는 SRN에서 장소에 있는 토큰 수에 대한 함수로 기술된다. SRN에서 모든 출력 값은 보상률 함수의 기댓값으로 표현된다. 시스템의 성능지표 값을 얻기 위해서는 SRN 모델에 적당한 보상률 값을 배정하여 구할 수 있다. SRN 모델의 해를 구하기 위해 SRN 소프트웨어

도구인 SPNP[7]를 사용한다. SRN은 SPNP에 의해 마르코프 보상 모델(MRM)로 변환되며 MRM의 성능분석으로 SRN에서 지정한 성능지표를 구하게 된다. 즉 SRN 모델은 다음 단계에 의하여 해석적-수치적으로 해를 구한다.

첫째, 모델로부터 도달성 그래프가 생성되며 둘째, 도달성 그래프는 MRM으로 변환된다. 셋째, MRM은 수치적으로 해를 구하며, 마지막으로 구해진 해의 기댓값으로 성능지표를 계산한다.

### 2. CR 채널 할당 SRN 모델

그림 9는 우선 사용자와 CR 사용자를 고려한 CR 채널 할당 SRN 모델이다. 우선 사용자는 N개의 사용 가능한 채널을 가지고 있다고 가정한다. 장소 F의 토큰 수는 사용 가능한 채널 수를 나타내며 초기 토큰 수는 N이다. 우선 사용자와 CR 사용자의 채널 요청은 천이  $tpin$ 과  $tsin$ 으로 각각 나타낼 수 있으며 이들 요청에 대한 평균 발생률은 각각  $\lambda_1, \lambda_2$ 인 포아송 분포로 발생하고, 각 요청에 대한 서비스율은 평균이  $\mu_1, \mu_2$ 인 지수분포를 따른다고 가정한다.

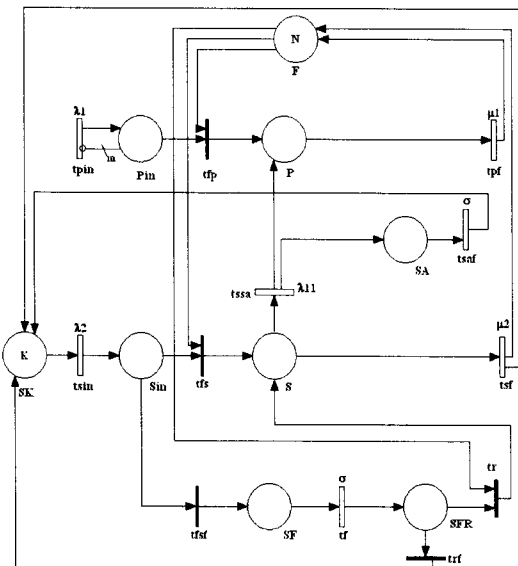


그림 9. CR 사용자 수를 고려한 SRN 모델

우선 사용자가 요청하는 채널은 현재 가용한 채널이거나 CR 사용자가 사용하는 채널이며 이들 채널에 대한 발생률은 각각 천이  $tpin$ 과 천이  $tsin$ 의 발생률로 나타내지며 다음 [표 2]의 천이에 대한 rate 함수[7]로 구할 수 있다.

표 2. 우선 사용자의 채널 발생률

천이 rate 함수	
천이 $tpin$	<pre>double fun_lam1() {     if (#("F")==0 &amp;&amp; #("S")==0) return(lam1);     else return(lam1*(#("F")/(#("F")+#("S")))); }</pre>
천이 $tsin$	<pre>double fun_lam11() {     if (#("F")==0 &amp;&amp; #("S")==0) return(lam1);     else return(lam1*(#("S")/(#("F")+#("S")))); }</pre>

[표 2]에서 #("장소")는 해당 장소의 토큰 수를 나타낸다. 장소 F의 토큰 수는 가용 채널 수 이고, 장소 S의 토큰 수는 CR 사용자에 의해 사용되고 있는 채널 수를 나타낸다.

천이  $tsin$ 은 CR 사용자의 채널 요청에 대한 발생률을 나타낸다. 즉시 천이  $tfs$ 와  $tfsf$ 는 CR 사용자의 채널 요청에 대한 성공과 실패확률을 나타내며 식 (4)의  $pS, pF$  값을 적용한다.

장소 SF는 채널 점유에 실패한 CR 사용자를 의미하며, 천이  $tf$ 의 발생률  $\delta$ 는 채널 재시도 기간까지 시간을 나타낸다. 재시도 후의 CR 사용자가 가용 채널 중에서 채널 점유에 대한 성공과 실패는 즉시 천이  $tr$ 과  $trf$ 의 발생 확률 함수에 식 (4)를 적용하여 구한다.

장소 SK의 토큰 수는 허용 가능한 최대 CR 사용자 수를 나타낸다.

### IV. 성능지표 및 수치결과

성능지표로는 우선 사용자의 채널 점유율에 따른 CR 사용자의 채널 분실률과 처리율을 구하였다. 채널 점유율은 모델에서 장소 P의 토큰 수가 우선 사용자의 점유된 채널 수를 나타내므로 이를 전체 채널 수인 N으로 나누면 되며 이는 제곱 트래픽  $\lambda_1$ 에 따라 구해진다. CR 사

용자의 채널 분실률은 CR 사용자가 가용 채널을 먼저 점유한 후 우선 사용자에게 의해 채널을 회수 당하는 경우로 [표 3]의 보상식[6][7]으로 구할 수 있다.

표 3. 성능지표

보상식	
우선 사용자 채널 점유율	#P / N
CR 사용자 채널 분실률	rate_tsaf / rate_tsin

보상식에서 rate\_tsaf는 찬이 tsaf의 실제 발사 횟수로 우선 사용자에게 의해 채널을 회수 당한 수를 나타내고 rate\_tsin은 CR 사용자의 채널 요청 횟수를 나타낸다. 그리고 rate\_tsf는 실제 처리된 CR 사용자의 채널 수로 CR 사용자의 처리율이 된다.

모델에서 수치결과는 SRN 소프트웨어 도구인 SPNP[7]를 사용하여 구하였으며 여기에 사용된 매개변수의 입력 데이터는 다음 값으로 가정하였다[8].

$\lambda_1$ =제공트래픽,  $\lambda_2=10*\lambda_1$ ,  $\mu_1=7$ ,  $\mu_2=7$ ,  $\delta=1000$ , N=12 채널, 우선사용자의 셀 반경 R=102.5 미터, 이차사용자의 셀 반경 r=10 미터

[그림 10]은 허가된 CR 사용자 수 K를 고정했을 경우 우선 사용자의 채널 점유율에 따른 CR 사용자의 채널 분실률과 처리율을 보여준다.

CR사용자의 처리율

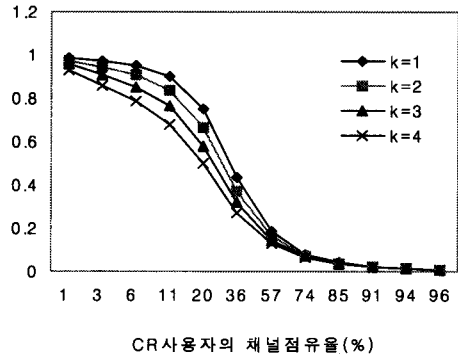
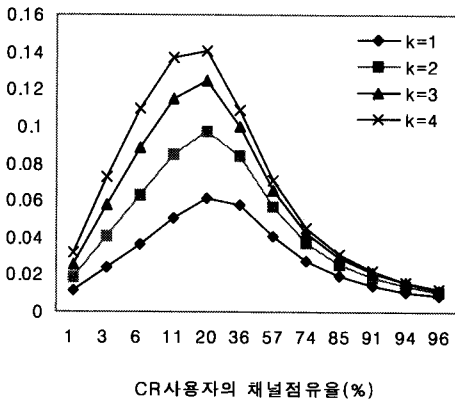


그림 10. CR 사용자의 채널 분실률과 처리율

우선 사용자의 채널 점유율이 20%에 근접할 때 CR 사용자의 분실률이 크게 증대하였다가 채널 점유율이 계속 증가하는 경우 분실률이 다시 감소함을 확인할 수 있다. 이는 점유율이 증가할수록 CR 사용자가 채널을 점유할 수 있을 확률이 감소하므로 전체 채널 요구에 비하여 분실하게 되는 비율이 작아지기 때문이다. 또한, 우선 사용자의 채널 점유율이 커짐에 따라 상대적으로 CR 사용자를 위한 가용 채널 수가 작아지므로 처리율이 감소함을 알 수 있다. 허용된 CR 사용자 수 K는 값이 증가할수록 분실률은 커지고 처리율은 작아짐을 알 수 있다.

CR사용자의 분실률



V. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 단일셀 내에서의 인지 라디오 모델을 설계한 후 이를 바탕으로 우선 사용자와 CR 사용자 간의 채널 관리를 위한 SRN 모델을 개발하고 성능분석을 수행하였다. SRN 모델의 구현에 따른 실험결과는 제안된 채널할당 모델의 타당성을 보여주며, 제안된 모델은 이후 CR 라디오의 다양한 구현의 기초모델로 활용될 것으로 기대된다.

향후 주어진 가용 채널하에서 최적의 CR 사용자 수를 구하는 최적화 문제와 셀 간의 핸드오프를 포함하여 다수의 셀을 고려한 모델에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 김창주, “Cognitive Radio 기술 동향”, 전자통신 동향 분석, 제 21권, 제 4호, 2006(8).
- [2] 박준수, 박순규, 김진업, 김형중, 이원철, “다중모드 Cognitive Radio 통신 시스템을 위한 GBNSGA 최적화 알고리즘”, 한국통신학회 논문지, 제 32권, 제 3호, 2007(3).
- [3] 김태훈, 김동희, 광경섭, “무선 인지 기술을 이용한 국내환경에 적합한 MB-OFDM UWB 시스템”, 한국통신학회 논문지, 제 32권 제11호, 2007(11).
- [4] J. Mitola and G. Q. Maguire, “Cognitive radio: making software radios more personal,” Personal Communications, IEEE, pp.13-18, 1999(8).
- [5] 김진영, 백명기, 양재수, “인지 무선 기술의 차세대 단말 적용”, 한국통신학회지 (정보와통신), 제25권, 제3호, pp48-52, 2008.
- [6] G. Ciardo, A.Blakemore, and P. F. Chimento, “Automated generation and analysis of Markov reward models using stochastic reward nets,” Linear Algebra, Markov Chains, Queuing Models, IMA Volumes in Mathematics and its Applications(C. Meyer & R. J. Plemmons, Eds), Vol.48, pp.145-191, 1993.
- [7] G. Ciardo and K. S. Trivedi, “SPNP Users Manual, Version 5.01,” Technical report, Duke Univ., 1998.
- [8] 황준호, 신요안, 이원철, 유명식, “인지 라디오 접목 네트워크 기술 동향 분석”, 정보통신 기술, Vol.22, No.2, 2008(11).

저자 소개

이 광 의(Kwang-Eui Lee)

정회원



- 1990년 2월 : 서강대학교 전자계산학과(공학사)
- 1992년 2월 : 서강대학교 전자계산학과(공학석사)
- 1997년 8월 : 서강대학교 전자계산학과(공학박사)

• 1997년 12월 ~ 2001년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원

• 2001년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 멀티미디어공학과 교수

<관심분야> : 계산이론, 인공지능, 인공생명

노 철 우(Cheul-Woo Ro)

중신회원



- 1980년 2월 : 서강대학교 물리학과(학사)
- 1982년 2월 : 동국대학교 전자계산학과(석사)
- 1995년 8월 : 서강대학교 전자계산학과(박사)

• 1991년 ~ 현재 : 신라대학교 컴퓨터정보공학부 정교수

<관심분야> : 이동통신 시스템, 통신 프로토콜 설계/검증/시험, 페트리 넷 모델링 및 성능, RFID, 임베디드 시스템

김 경 민(Kyung-Min Kim)

정회원



- 1993년 2월 : 신라대학교 전자계산학과(이학사)
- 2000년 8월 : 신라대학교 컴퓨터교육학과(교육학석사)
- 2005년 ~ 현재 : 신라대학교 컴퓨터정보공학부 박사과정

<관심분야> : 이동통신 시스템, 페트리 넷 모델링 및 성능, RFID, 임베디드 시스템