

---

# 인지무선 네트워크를 위한 협력 노드 선택 기법

고상\* · 이주현\*\* · 박형근\*\*\*

Cooperative Node Selection for the Cognitive Radio Networks

Gao Xiang\* · Juhyeon Lee\*\* · Hyung-Kun Park\*\*\*

---

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아  
수행된 기초연구사업임(2011-0021164)

---

## 요 약

인지무선통신(Cognitive radio, CR)은 사용하지 않는 대역을 동적으로 활용할 수 있는 통신 방식이다. 여기서 CR 사용자는 주사용자와 동일한 스펙트럼을 공유하면서 주사용자에 대한 간섭을 최대한 배제해야한다. 일반적으로 각 CR 사용자는 자신이 속한 지역을 센싱하는 것으로 스펙트럼 사용 가능 여부를 판단한다. 하지만 CR 사용자가 다중 경로 페이딩이나 새도잉과 같은 불확실한 무선 환경에 있을 경우 신호를 정확하게 감지하지 못할 확률이 높아진다. 이때 협력 센싱 기법을 활용할 경우 이러한 무선환경을 극복할 수 있게 된다. 본 연구에서는 협력 센싱 관정을 위해 연판정 기법을 활용할 때 주어진 시스템 요구치를 만족하면서 detection 확률을 향상시킬 수 있는 협력 노드 선택 알고리즘을 제안하였다. 여기서 SNR이 상대적으로 높은 협력 노드에 가중치를 주는 maximum ratio combining (MRC) 방식으로 최적의 협력 노드를 찾았다. 실험 결과, 제안한 알고리즘으로 시스템 요구치에 부합하는 최적의 센싱 노드를 선택할 수 있었다.

## ABSTRACT

Cognitive radio has been recently proposed to dynamically access unused-spectrum. The CR users can share the same frequency band with the primary user without interference to each other. Usually each CR user needs to determine spectrum availability by itself depending only on its local observations. But uncertainty communication environment effects can be mitigated so that the detection probability is improved in a heavily shadowed environment. Soft detection is a primary user detection method of cooperative cognitive radio networks. In our research, we will improve system detection probability by using optimal cooperative node selection algorithm. New algorithm can find optimal number of cooperative sensing nodes for cooperative soft detection by using maximum ratio combining (MRC) method. Through analysis, proposed cooperative node selection algorithm can select optimal node for cooperative sensing according to the system requirement and improve the system detection probability.

## 키워드

인지 무선, 협력 센싱, 센싱 노드 선택

## Key word

Cognitive radio, cooperative sensing, cooperative node selection

---

\* 정회원 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과  
\*\* 정회원 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 박사과정  
\*\*\* 종신회원 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 부교수  
(교신저자, hpark@kut.ac.kr)

접수일자 : 2012. 10. 09  
심사완료일자 : 2012. 10. 30

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.2.287>

©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

다양한 무선 네트워크에 의한 무선 자원 사용이 증가함에 따라 주파수 자원의 효율적인 분배는 중요한 문제가 되고 있다. 하지만 FCC의 최근 측정 결과에 따르면 시간 평균적으로 15-85%의 스펙트럼만이 활용되고 있다 [1]. 이를 위해 미래 무선통신의 기술 중 하나로 유휴 스펙트럼을 기회적으로 활용하는 인지 무선 통신(Cognitive Radio) 방식이 제안되었고, 이를 이용해 사용하지 않는 대역들을 효율적으로 활용하는 방법이 많이 연구되고 있다. 이때, 스펙트럼 센싱 성능에 따라 유휴 스펙트럼 활용의 성공 확률이 달라지기 때문에, 스펙트럼 센싱은 인지무선 네트워크에서 가장 중요한 이슈 중 하나라고 볼 수 있다.

인지 무선 네트워크에서 CR 사용자는 자신이 속한 지역을 센싱하는 것으로 스펙트럼 사용 가능 여부를 판단할 수 있다. 그러나 CR 사용자가 관측할 수 있는 범위는 일반적으로 전송 가능 범위보다 작다. 만약 CR 사용자가 다중 경로 페이딩이나 새도잉의 영향을 받는 지역에 있으므로 인해 낮은 SNR을 가진 약한 신호를 받는다면 주사용자의 신호를 감지하지 못할 수도 있다. 이러한 문제점들은 협력 센싱 기법을 사용하면 해결이 가능하다. 즉 협력 센싱을 이용할 경우 CR 사용자의 관측 가능 지역 밖에 있는 주사용자에 대한 간섭을 줄일 수 있게 된다.

한편 협력 센싱을 활용할 경우 다중 노드를 선택하여 센싱하기 때문에 단일 노드를 사용하여 센싱했을 때의 한계를 극복할 수 있다. 채널 센싱에 있어서 채널을 감지할 확률인 detection 확률과 유휴 채널을 사용되고 있는 채널로 잘못 판단할 확률인 false alarm 확률은 중요한 요소라 할 수 있다. 사용자에 대한 간섭을 피하기 위해서는 detection 확률을 높이는 것이 중요하지만, 이는 false alarm 확률도 같이 높이게 되어 유휴 채널 활용 기회를 놓치게 되고 스펙트럼 활용도가 떨어지게 된다. 반대로 false alarm 확률을 최소로 할 경우 detection 확률 또한 줄어들게 되어, 주사용자에 대한 CR 사용자의 간섭이 많아지게 되고 collision 확률이 증가하게 된다. 이는 어느 한쪽의 성능을 충족시킬 경우 다른 쪽의 성능을 희생하게 된다는 것인데, 협력 센싱 기법을 활용할 경우 노드 수를 적절히 조절함으로써 양쪽의 성능을 모두 충족시

키는 것이 가능하다. 예를 들어 detection 확률이 고정되어 있을 때 협력 노드의 개수를 증가시키면 false alarm 확률은 감소하고, 반대로 false alarm 확률이 동일한 상황에서 협력 노드의 개수를 증가시키면 detection 확률은 증가한다[2][3]. 하지만 단지 센싱 성능의 만족을 위해 무한정 협력 노드를 늘일 수는 없으므로, 시스템의 요구사항을 충족하는 적절한 노드의 선택이 매우 중요해진다. 따라서 본 연구에서는 detection 확률 및 false alarm 확률과 같은 시스템 요구 사항이 주어졌을 때 이를 충족시키는 최적의 협력 센싱 노드를 선택하는 기법을 제안하고자 한다.

## II. 시스템 모델

협력 센싱의 센싱 결과 판정 기법에는 경관정(hard detection)과 연관정(soft detection) 기법이 있다. 경관정은 각 CR 노드들이 자신의 센싱 지역을 감지한 후 유휴성 여부를 결정하여 그 결과를 컨트롤 센터(CC)에 전송하고, CC에서는 각 노드의 센싱 결과를 취합하여 최종적으로 사용할 채널을 결정한다. 한편 연관정에서 각 노드는 센싱 결과를 결정하지 않고 센싱 정보만을 CC에 전송한다. CC에서는 각 노드의 센싱 정보를 바탕으로 최종적으로 센싱 결과를 결정하고 채널을 선택한다. 본 연구에서는 이 중 연관정을 위한 센싱노드 선택기법을 제안하고자 한다.

신호 감지를 위해 에너지 감지(energy detection) 방식을 사용하였고, 시스템 모델을 (1)과 같이 가정하였다.

$$\begin{cases} H_0 : Y(m) = w(m) \\ H_1 : Y(m) = s(m) + w(m) \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $H_0$ 는 주사용자 신호가 없다고 판단할 가설이고  $H_1$  주 사용자 신호가 있다고 판단할 가설이다.  $Y(m)$ 은 샘플  $m$ 의 센싱값을 나타내고,  $s(m)$ 과  $w(m)$ 는 각각 샘플  $m$ 의 신호크기 및 노이즈 크기를 의미한다.

여기서 신호 감지 결과는 에너지 감지 방식을 따라 (2)와 같이 결정된다.

$$D(Y) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^N Y^2(m) \begin{cases} > \lambda \\ < \lambda \end{cases} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 에너지 감지에 필요한 샘플의 개수이고 이는 필터에 따라 달라질 수 있다.  $\lambda$ 는 감지의 임계값을 의미하며 감지 결과가 이 값보다 클 경우 채널이 사용되는 상태로 작을 경우 유휴 상태인 것으로 판단한다.  $D(Y)$ 는  $N$ 개의 가우시안 랜덤 변수의 제곱이므로 주 사용자가 존재하지 않으면  $\chi^2$  central 분포를 나타내고, 존재할 경우  $\chi^2$  non-central 분포를 나타낸다. 또한 중심 극한 정리에 따라  $N$ 의 값이 충분히 클 경우  $D(Y)$ 는 정규 분포를 따르게 되므로 각 채널 상황에서 detection 확률은 (3)과 같은 확률 분포를 따르게 된다[4][5][6].

$$P(D(Y)|H_0) = N\left(\sigma^2, \frac{2}{N}\sigma^4\right) \quad (3)$$

$$P(D(Y)|H_1) = N\left(P + \sigma^2, \frac{2}{N}(P + \sigma^2)^2\right)$$

여기서  $P$ 는 신호의 평균 전력을 의미하고,  $\sigma^2$ 는 노이즈의 분산 값을 의미한다.

위에서 정의된 식에 의해 우리는 식 (4)와 같이 노이즈가 고정된 단일 노드의 false alarm 확률  $P_f$ 와 missing 확률  $P_m$ 을 구할 수 있다[4]. false alarm 확률은 idle 채널을 busy 채널로 감지할 확률, missing 확률은 busy 채널을 idle 채널로 감지할 확률을 의미한다.

$$P_d = Q\left(\frac{\lambda - (P + \sigma^2)}{\sqrt{\frac{2}{N}(P + \sigma^2)}}\right), \quad P_f = Q\left(\frac{\lambda - \sigma^2}{\sqrt{\frac{2}{N}\sigma^2}}\right) \quad (4)$$

여기서  $Q(*)$ 는 standard Gaussian complementary CDF로 (5)와 같이 정의 된다.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (5)$$

### III. 연판정을 위한 센싱 노드 선택 기법

무선 환경이 안 좋을 경우 단일 CR 노드는 채널을 정확하게 센싱하지 못할 가능성이 높고 이에 추가적으로 협력 노드를 센싱 그룹에 포함시켜 여러 노드가 협력적으로 센싱하는 것이 더 효율적이다. 따라서 얼마나 많은 노드를 협력 센싱 그룹에 포함시키는 지가 중요한 연구 주제가 될 수 있다.

따라서 본 장에서는 여러 개의 센싱 노드의 센싱 정보를 활용하여 최종적으로 detection을 하는 연판정(soft detection) 방식에서, 시스템이 요구하는 detection 확률을 충족하는 최적의 센싱 노드 선택 기법에 대해 논의하고자 한다.

연판정 방식에서는  $M$ 개의 센싱 노드들의 센싱 정보를 이용한다.

각 노드들의 센싱 정보는  $\vec{y} = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ 와 같이 벡터 형태로 나타낼 수 있다. 여기서 각 CR 노드들은 서로 독립적이므로 각 노드들의 센싱 결과값의 확률 분포 또한 서로 독립적이다. 따라서 벡터  $y$ 는 정규분포를 따르게 된다. 본 연구에서는 각 CR 노드들 중 SNR이 높은 노드의 센싱 정보에 가중치를 주었고, 이에 따라 각 CR 노드  $i$ 에 대한 가중치  $w_i$ 를 적용한 센싱 정보의 확률 분포는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(D(Y)|H_0) = N\left(\sum_{i=1}^M w_i \sigma_n^2, \frac{2}{N} \sum_{i=1}^M w_i^2 \sigma_n^4\right)$$

$$P(D(Y)|H_1) = N\left(\sum_{i=1}^M w_i (P_i + \sigma_n^2), \frac{2}{N} \sum_{i=1}^M w_i^2 (P_i + \sigma_n^2)^2\right)$$

$$\text{where, } w_i = \frac{SNR_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^M SNR_i^2}}, \quad \sum_{i=1}^M w_i^2 = 1 \quad (6)$$

이를 식 (4)에 대입하여 계산한 detection 확률  $P_d$ 와 false alarm 확률  $P_f$ 는 식 (7)과 같다.

한편 각각의 노드들은 서로 다른 무선 환경을 가지므로 각 노드들의 노이즈에 대해 추가적인 고려가 필요하다.

$$P_d = Q \left( \frac{\lambda - \sum_{i=1}^M (P_i + \sigma_n^2)}{\sqrt{2 \sum_{i=1}^M (P_i + \sigma_n^2)^2 / N}} \right) \quad (7)$$

$$P_f = Q \left( \frac{\lambda - \sum_{i=1}^M \sigma_n^2}{\sqrt{2 \sum_{i=1}^M \sigma_n^4 / N}} \right)$$

일반적으로 노이즈가  $N(0, \sigma_n^2)$ 의 분포를 나타낼 경우 각 노드들의 노이즈 분산값  $\sigma_n^2$ 는 서로 어느 정도의 차이를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 요소를 반영한 인자인 noise uncertainty  $\alpha$ 를 도입하였다. noise uncertainty는 각 노드의 노이즈의 불확실성 정도를 나타내는 인자로 모든 협력 센싱 CR 노드들 가운데 noise uncertainty가 가장 큰 경우는  $\alpha_{\max}$  (노이즈 크기는  $\alpha_{\max} \sigma_n^2$ ), 가장 작은 경우는  $\alpha_{\min}$  (노이즈 크기는  $\alpha_{\min} \sigma_n^2$ )이다. 따라서 이를 적용한 노이즈의 구간은  $\sigma_n^2 \in (\alpha_{\min} \sigma_n^2, \alpha_{\max} \sigma_n^2)$ 와 같다.

식 (7)을 noise uncertainty 요소를 적용하여 수정할 경우 아래와 같다. 여기서  $P_{d, \min}$ 은 최소 detection 확률,  $P_{f, \max}$ 은 최대 false alarm 확률을 의미한다.

$$P_{d, \min} = Q \left( \frac{\lambda - \sum_{i=1}^M (P_i + \alpha_{\min} \sigma_n^2)}{\sqrt{2 \sum_{i=1}^M (P_i + \alpha_{\min} \sigma_n^2)^2 / N}} \right) \quad (8)$$

$$P_{f, \max} = Q \left( \frac{\lambda - \sum_{i=1}^M \alpha_{\max} \sigma_n^2}{\sqrt{2 \sum_{i=1}^M \alpha_{\max} \sigma_n^4 / N}} \right) \quad (9)$$

위 식에서 threshold 값  $\lambda$ 를 결정하기 위해 두 가지 확률 중 하나를 시스템 요구치로 고정시킬 필요가 있다. 여기서는 시스템 throughput에 크게 영향을 끼치는 false alarm 확률을 시스템 요구 false alarm 확률인  $P_{f, req}$ 로 고정시켰다. 이 때 다중 노드로 센싱하는 경우 각 노드의 무선 환경에 따라 false alarm 확률이 다를

수 있으므로, noise uncertainty를 적용하여 최악의 false alarm 확률이 시스템 요구치인  $P_{f, req}$ 를 만족할 수 있도록  $P_{f, req} = P_{f, \max}$ 로 설정하였다. 이를 식 (9)에 적용하면 시스템에서 요구하는 false alarm 확률에 대한 detection threshold  $\lambda$ 는 식 (10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = Q^{-1}(P_{f, req}) \sqrt{2 \sum_{i=1}^M \alpha_{\max} \sigma_n^4 / N + \sum_{i=1}^M \alpha_{\max} \sigma_n^2} \quad (10)$$

(10)에서 구한 threshold 값  $\lambda$ 를 식 (8)에 대입하면  $P_{f, req}$ 에 대한 detection 확률의 최저치를 구할 수 있다. 이렇게 계산된  $P_{d, \min}$  값이 시스템에서 요구하는 detection 확률 수준보다 높을 경우 이 식에 해당되는 M개의 협력 센싱 노드가 적절한 센싱 그룹이 될 수 있다. 이렇게 대입한 식을 N에 대하여 전개하면 식 (11)을 얻을 수 있고, N과 각 파라미터들의 관계를 확인할 수 있다.

$$N = 2 \left[ \frac{\alpha_{\max} \sqrt{\sum_{i=1}^M \omega_i^2} Q^{-1}(P_{f, \max}) - \sqrt{\sum_{i=1}^M \omega_i^2 (\alpha_{\min} + SNR_i)^2} Q^{-1}(P_{d, \min})}{\sum_{i=1}^M \omega_i (SNR_i - (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}))} \right]^2 \quad (11)$$

여기서  $P_{d, \min}$ 과  $P_{f, \max}$ 는 시스템 요구치로 결정할 수 있으며,  $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\max}$ ,  $SNR_i$ 는 센싱 정보를 통해 확인할 수 있다. 즉  $P_d$ 와  $P_f$ 의 시스템 요구치를 결정하면 협력 센싱 노드개수 M에 대한 샘플 개수 N의 관계를 확인할 수 있다.

추가적으로 에너지 감지에 필요한 샘플 개수 N과 관련하여 system coherence time  $T_c$ 에 대해서 고려해야 한다. system coherence time은 채널 임펄스 응답이 변화하지 않는 시간 구간이므로, 신뢰성 있는 센싱을 위해서는 샘플 개수 N의 길이가 system coherence time 보다 작아야 한다.

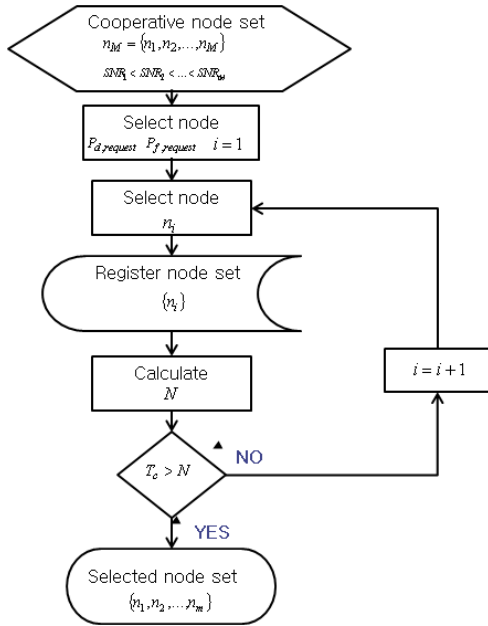


그림 1. 협력 센싱 노드 선택 알고리즘  
Fig. 1 Cooperative sensing node selected algorithm flow chart

위의 사실들을 바탕으로 한 센싱 노드 선택 기법은 다음과 같다. 먼저 시스템 요구치인  $P_{d,min}$  과  $P_{f,max}$  를 설정하고 SNR 값이 높은 노드를 하나 선택하여 협력 센싱 노드의 집합을 구성한 뒤 해당 노드 집합에 대하여 식 (11)을 계산한다. 결과값 N이 system coherence time보다 작을 경우 노드 선택을 종료하고, 아닐 경우 다음으로 SNR 값이 높은 노드를 선택하여 협력 센싱 노드 집합에 추가한 후 다음 과정을 반복한다. 이 과정을 도식화 하면 그림 1.과 같다.

#### IV. 시뮬레이션과 결과분석

CR 협력 센싱 노드가 다른 무선 환경에 있을 경우 각각의 noise 상태 또한 달라진다. 우리는 이를 위해 noise uncertainty 개념을 도입하였고, noise uncertainty와 detection 성능 간의 관계를 아래 시뮬레이션을 통해 관찰하였다. 이 실험에서 총 3가지의 noise uncertainty를 비교하였고 이중  $(\alpha_{min}, \alpha_{max}) = (1, 1)$ 는 noise uncertainty

가 없는 상태를 의미한다. 이 실험에서 협력 센싱 노드 수는 2개와 4개인 경우를 가정하였고, false alarm 확률은  $P_{f,req} = P_{f,max} = 0.1$ 로 고정하였다. 이에 따라 각 noise uncertainty와 협력 노드 개수에 따른 detection 확률의 값은 그림 2.와 같다.

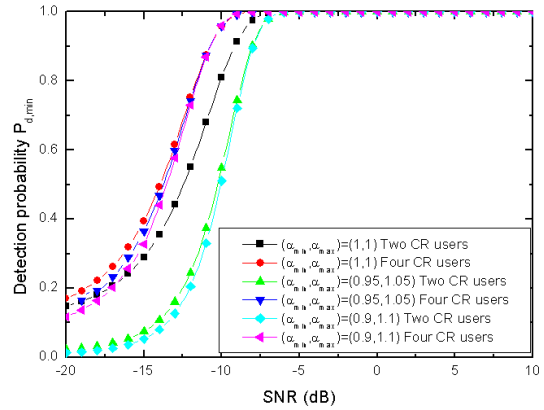


그림 2. noise uncertainty 정도에 대한 SNR 대비 detection 확률  
Fig. 2 Detection probability vs SNR base on different noise uncertainty conditions

그림 2.를 통해 noise uncertainty가 클수록 detection 확률  $P_{d,min}$ 이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 똑같은 noise uncertainty 환경에서 협력 센싱 노드 개수가 많을 경우 detection 확률이 더 좋다는 점을 참고하면, 이 경우 더 많은 센싱 노드를 선택함으로써 성능 하락을 방지할 수 있다. 결론적으로 이 실험을 통해 협력 센싱에 있어서 noise uncertainty 또한 detection 성능에 영향을 끼치는 요소가 된다는 사실을 알 수 있으며, 따라서 적절한 센싱 노드 선택을 위해서는 noise uncertainty에 대한 고려도 필요하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 연판정 방식에서 협력 센싱 노드 선택 기법에 대해 논의하였다. 기본적으로 제안한 방식은 detection probability와 false alarm probability의 시스템 요구치에 부합할 때 까지 SNR이 좋은 노드 순서대로 노드를 협력 센싱 그룹에 추가하는 것이다.

이 실험에서 SNR은 (-25,-10)dB 사이에 분포한 1000 개의 CR 노드를 사용하였고, 협력 센싱 노드의 수에 따른 평균 detection 확률을 확인하였다. 이때 3가지 noise

uncertainty 환경에 따른 센싱 성능을 확인해 보았다. 시스템에서 요구하는 false alarm 확률 및 detection 확률은 각각  $P_{f, req} = 0.1$ ,  $P_{d, req} = 0.9$ 로 설정하였고, 실험 결과는 그림 3.에 나타내었다. 그림 3.에서 살펴보면 noise uncertainty의 범위가 (1,1)일 경우, 즉 noise uncertainty가 거의 없는 경우에 단일 노드로 센싱할 경우 detection 확률이 40% 정도밖에 되지 않는 것을 알 수 있다. 협력 센싱 노드의 개수가 증가함에 따라 detection 확률이 증가하고 노드의 개수가 5를 넘어서면 detection 확률이 시스템 요구치인 90%에 이르는 것을 확인할 수 있다. 이는 SNR 범위가 (-25,-10)dB, noise uncertainty 범위가 (1,1)인 노드들의 경우 시스템 요구치  $P_{d, req} = 0.9$ 를 충족하기 위한 최소 노드의 개수가 5개라는 뜻이 된다. 한편 noise uncertainty가 증가함에 따라 시스템 요구치를 충족하기 위한 협력 노드의 개수는 증가하는 것을 확인할 수 있다.

결론적으로 이 실험을 통해 false alarm 확률이 같은 경우 협력 노드 수가 늘수록 detection 확률은 증가하고 noise uncertainty가 클수록 더 많은 협력 노드가 필요하다는 사실을 알 수 있으며, 따라서 시스템 요구조건과 noise uncertainty, SNR 정보가 있으면 필요한 최적 협력 노드 개수 추정이 가능하다고 판단할 수 있다.

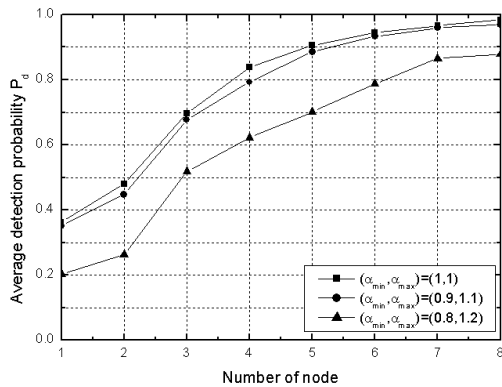


그림 3. 협력 센싱 노드 개수에 따른 평균 detection 확률  
 Fig. 3 Average system detection probability is according to the number of the cooperative sensing CR user

## V. 결 론

CR 네트워크에서 협력 센싱 기법은 단일 센싱으로 적절할 수준의 센싱 성능을 보장할 수 없을 때 센싱 성능을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 협력 센싱의 두가지 방식 중 하나인 연관성 기법을 위해 시스템 요구치를 충족시키는 최적 노드 선택 기법에 대해 논의하였다. 협력 센싱노드를 선택할 때 SNR, noise uncertainty 등의 요소를 고려함으로써 시스템이 요구하는 수준의 detection 확률을 만족시킬 수 있는 센싱 노드의 개수를 결정할 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2011-0021164)

### 참고문헌

- [1] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, and K. R. Chowdhury, "CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks," Ad Hoc Networks, vol. 7, no. 5, pp. 810 - 836, 2009.
- [2] Jinhua Lv, Junan Lu, Shihua Chen, "Chaotic time series analysis and application", Wuhan University press, 2002
- [3] Ghasemi A, Sousa E S, "Asymptotic performance of collaborative spectrum sensing under correlated lognormal shadowing", IEEE Communications Letters, pp. 34-36, 2007
- [4] Tandra R and Sahai A, "SNR walls for signal detection", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, pp.4-17, 2008
- [5] Kay S M, "Fundamentals of statistical signal processing: detection theory", Englewood Cliffs: Prentice-Hall, pp. 689-698, 1998
- [6] Tandra R, "Fundamental limits on detection in low SNR", master's dissertation, pp. 30-55, 2003

저자소개



**고상(Gao Xiang)**

2006년 6월 : 중국 산둥대학교 전자  
공학과 졸업  
2008년 8월 : 한국기술교육대학교  
전기전자공학과(공학석사)

2012년 8월 : 한국기술교육대학교 전기전자통신  
공학과 (공학박사)

※ 관심분야 : 디지털 통신 시스템, 이동무선통신



**이주현(Juhyeon Lee)**

2006년 2월 : 한국기술교육대학교  
정보기술공학부 (공학사)  
2010년 2월 : 한국기술교육대학교  
전기전자공학과 (공학석사)

2010년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자  
통신공학과 박사과정

※ 관심분야 : 인지무선통신, 무선자원관리



**박형근(Hyung-Kun Park)**

1995년 2월 : 고려대학교  
전자공학과 (공학사)  
1997년 2월 : 고려대학교  
전자공학과 (공학석사)

2000년 8월 : 고려대학교 전자공학과 (공학박사)

2000년 9월 ~ 2001년 8월 : University of Colorado at  
Colorado Springs, Postdoc.

2001년 9월 ~ 2004년 2월 : 현대시스콤, 선임연구원

2004년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교  
전기전자통신공학부 부교수

※ 관심분야 : 인지무선통신, USN, 무선자원관리