

# 무선 인지 시스템에서 협력 스펙트럼 센싱을 위한 최적화된 경판정 방식

## Optimal Hard Decision for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems

이 소 영 · 김 진 영\*

So Young Lee · Jin Young Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 개별 센싱 결과를 결합하기 위해 센싱의 성능은 연판정 방식보다 낮지만, 시스템의 부담이 적고 비교적 단순한 방식인 경판정 방식을 적용하였으며, 센싱의 성능을 높이기 위해 각 CR 기기의 검출 확률을 반영하여 가중치를 설정하고, 계산된 가중치가 개별 센싱 결과에 재반영되어 결합하는 최적화된 경판정 방식을 제안한다. 기존의 경판정 방식과 달리 가중치를 적용하여 센싱 성능을 높이도록 하였고, 모의 실험 및 분석을 통하여 성능을 나타내었다. 1차 사용자의 신호는 OFDM 기반의 시스템을 가정하였고, 1차 사용자와 CR 기기 사이의 무선 채널은 가우시안(Gaussian) 채널로 모델링하였다.

### Abstract

In this paper, we use hard decision method for cooperative spectrum sensing. Sensing performance adopting hard decision is lower than soft decision but system load is low and the process is relatively simple when the combining scheme is hard decision compared to soft decision. In order to improve sensing performance, we propose optimal hard decision method applying weight that is based on a probability of individual sensing. Unlike conventional hard decision, we try to improve sensing performance applying weight and show the performance of the proposed method from the simulation results and performance analysis. The signal of licensed user is OFDM signal and the wireless channel between a licensed user and CR systems is modeled as Gaussian channel.

Key words : Cognitive Radio(CR), Cooperative Spectrum Sensing, Soft Decision, Optimal Hard Decision

### I. 서 론

무선 서비스의 급증 및 정보 통신 기술의 발전에 따라 무선기기의 사용이 보편화 되었으며, 사용자들의 편의를 만족시키기 위해 높은 데이터 전송률이 지속적으로 요구되고 있다. 과거 음성데이터 위주의

통신은 최근 무선 데이터 및 멀티미디어 서비스 이용으로 전환되었으며, 2012년 이후 아날로그 TV 서비스 중단 및 DTV 전환과 RFID/USN 및 홈네트워크와 정부 주도의 U-City 사업 등으로 인한 주파수 자원에 대한 요구가 가속화 될 것이다. 그러나 주파수 자원은 제한된 자원으로 급격한 주파수 수요만큼의

「이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(No. 2010-0022629).」

한국전파진흥협회 기술지원팀(Spectrum & Standardization Research Team, Korea Radio Promotion Association)

\*광운대학교 전파공학과(Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University)

· 논문 번호 : 20100621-080

· 교신저자 : 이소영(e-mail : iwant@nate.com)

· 수정완료일자 : 2011년 3월 31일

공급은 어려운 것이 현실이다. 연방통신위원회(FCC: Federal Communications Commission)의 2002년 주파수 정책 보고서를 통해 현재 할당된 주파수 대역의 이용률이 15~85 % 정도로 비효율적으로 활용되고 있음을 발표하였다<sup>[1]</sup>. 이와 같은 주파수의 비효율적 사용을 완화하기 위하여 제한된 자원을 보다 효율적으로 사용하기 위한 연구가 진행 중이며, FCC는 2003년 12월 Notice of Proposed Rule Making(NPRM)을 통하여 유휴 주파수에 대한 중복 사용을 허용하는 기술인 무선 인지 기술(Cognitive Radio: CR)에 대한 내용을 발표하였다<sup>[2]</sup>.

무선 인지 기술은 무선기기가 주변의 전파 환경을 측정하여 1차 사용자가 해당 주파수를 사용하지 않을 경우, CR 기기가 1차 사용자에게 간섭을 주지 않고 해당 주파수를 사용할 수 있는 SDR(Software Define Radio) 기반의 기술이다<sup>[3][4]</sup>. FCC는 현재 제한적으로 DTV 대역에 대해 무선 마이크의 사용을 허락하고 있으며, IEEE는 IEEE 802.22 working group<sup>[5]</sup>을 구성하여 각국의 주요 기관들 역시 인지 무선 통신 및 주파수 재배치에 따른 기술 기준을 구축하기 위해 연구 중이다<sup>[6]</sup>.

무선 인지 기술의 핵심 기술은 1차 사용자가 사용하지 않는 유휴 주파수를 검출하는 스펙트럼 센싱 기술로서, 지속적으로 주변 환경을 인식하여 변화된 상황에 따라 시스템을 적절하게 적용하도록 한다. 그러나 스펙트럼 센싱은 음영 지역 및 잠복 터미널 등에 의하여 성능의 열화가 발생하게 되는데, 이를 해결하고 스펙트럼 센싱의 신뢰성 및 정확도를 높이기 위해 다수의 CR 기기들이 센싱 정보를 공유하는 협력 스펙트럼 센싱 기술이 제안되었다<sup>[7]-[9]</sup>.

협력 스펙트럼 센싱은 개별 센싱 결과를 융합하는 방법에 따라 경관정 방식(hard decision method)과 연관정 방식(soft decision method)으로 구별할 수 있다<sup>[10][11]</sup>. 연관정 방식은 센싱의 성능이 높은 반면, 복잡도가 높아지고 센싱 시간이 길어지게 되며, 전체 시스템의 주파수 효율이 경관정 방식에 비하여 감소한다. 반면, 경관정 방식은 센싱의 성능은 연관정 방식보다 낮지만 시스템의 부담이 적고, 비교적 단순한 방식인 경관정 방식이 소출력 CR 기기에 보다 적합한 방식이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 경관정 방식의 성능을 높이기 위

해 개별 센싱 결과를 반영하여 가중치를 설정하고, 계산된 가중치가 개별 센싱 결과에 재반영되어 결합하는 최적화된 경관정 방식을 제안한다. 기존의 경관정 방식과 달리 가중치를 적용하여 센싱 성능을 높이도록 하였고, 모의 실험 및 분석을 통하여 성능을 나타내었다. 1차 사용자의 신호는 OFDM 기반의 시스템을 가정하였고, 1차 사용자와 CR 기기 사이의 무선 채널은 가우시안(Gaussian) 채널로 모델링하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서는 시스템 모델에 대하여 설명하고, 제Ⅲ장에서는 협력 스펙트럼 센싱 및 본 논문에서 제안하는 최적화된 경관정 방식에 대해 설명하고 분석한다. 제Ⅳ장은 모의 실험을 통하여 제안된 경관정 방식 성능을 나타내고, 마지막으로 본 논문의 결론을 제Ⅴ장에서 언급하였다.

## Ⅱ. 시스템 모델

이번 장에서는 본 논문에서 사용된 1차 사용자의 신호 및 스펙트럼 센싱 기술로 적용된 에너지 검출 기술에 대해 설명한다.

### 2-1 1차 사용자 송신 신호

본 논문은 1차 사용자의 신호를 OFDM 신호로 구현하였다. OFDM 신호는 4세대 이동통신의 핵심 기술로 고속의 데이터 전송이 가능하고, 다중 경로 페이딩 채널에서 강한 특성을 보인다. 다음 식 (1)은 OFDM 신호를 나타낸 것이다.

$$x(t) = \sum_{k=1}^K X_k[n] e^{j2\pi k \Delta f t} \quad (1)$$

$K$ 는 부반송파의 수이고,  $\Delta f$ 는 부반송파 주파수 간격,  $X_k[n]$ 은  $k$ 번째 부반송파에서  $n$ 번째 전송 심볼을 나타낸다. 그리고  $n = t/T_s$  이고,  $T_s$ 는 심볼 간격을 나타낸다.

그림 1에서 OFDM 신호는 전체  $T_s$ 의 길이를 가지고 있고 데이터 정보와 ISI(Inter symbol interference)를 방지하기 위해 삽입된 cyclic prefix(CP)는 각각  $T_g$ 와  $T_s$ 의 간격을 가지고 있다. 본 논문에서 사용된 OFDM 신호는 부반송파의 숫자를 256개로 가정

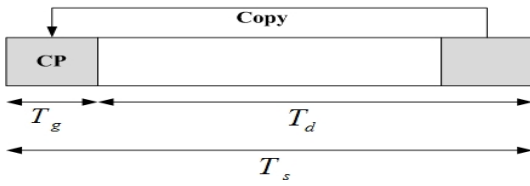


그림 1. OFDM 신호 구조  
Fig. 1. OFDM symbol structure.

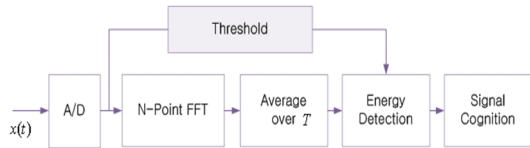


그림 2. 에너지 검출 기법의 시스템 구조  
Fig. 2. Structure of energy detection.

하였고, CP의 길이는 전체 데이터 간격의 1/8로 가정하였다.

### 2-2 에너지 검출 기법

무선 인지 시스템에서 1차 사용자에 대한 충분한 정보가 없고 1차 사용자의 신호가 랜덤신호일 때 스펙트럼 센싱은 에너지 검출 기법을 적용한다<sup>[7]</sup>. 단순히 수신 신호의 에너지 검출을 통한 코히런트 검출 기반의 센싱 기법으로 그림 2와 같은 방식으로 동작한다. 에너지 검출 방식은 FFT(Fast Fourier Transform) 연산 및 평균을 취하여 계산된 에너지 값을 미리 설정된 임계값과 비교하여 1차 사용자의 유,무를 판단하는 복잡도가 낮고 매우 간단한 시스템이지만, 불확실한 잡음 전력에 대해 매우 민감하여 페이딩 및 음영 효과에 취약하다.

## III. 협력 스펙트럼 센싱

### 3-1 각 CR 기기의 개별 센싱

무선 인지 기술은 주변 전파 환경을 측정하여 주파수의 상태를 1차 사용자의 유, 무에 따라 다음의 두 가지 상태로 가정하여 나타낸다.

$$y(t) = \begin{cases} v(t), & H_0 \\ hs(t) + v(t), & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)에서  $h$ 는 무선 채널의 감쇠 상수를 나타내

고,  $s(t)$ 는 1차 사용자의 신호를 나타낸다.  $v(t)$ 는 독립적인 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)으로 가정하였다. 그리고  $H_0$ 는 1차 사용자가 주파수를 사용하지 않는 유휴 상태를 나타내고,  $H_1$ 은 1차 사용자가 주파수를 사용 중임을 나타낸다. CR 기기에 수신된 신호는 각각 독립된 채널로 수신되며,  $m(m=1, 2, \dots, M)$ 번째 CR 기기에 수신 신호의 에너지  $Y_m$ 은 다음과 같다.

$$Y_m = \sum_{k=1}^L |y_m(k)|^2 \quad (3)$$

식 (3)에서  $L$ 은 검출을 위한 센싱 샘플 수를 나타내고,  $y_m(k)$ 은 1차 사용자로부터  $m$ 번째 CR 기기에 수신된 신호를 나타내며, 가우시안 분포를 따른다.  $y_m(k)$ 에서 잡음의 평균 전력을 1이라고 가정하면,  $m$ 번째 CR 기기의 신호 대 잡음비(SNR: Signal to Noise ratio)  $\gamma_m$ 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_m = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L s_m^2(k) \quad (4)$$

여기서  $s_m(k)$ 는  $m$ 번째 CR 기기가 수신한 1차 사용자의 송신 신호를 나타낸다.

1차 사용자의 신호가 존재하지 않는 경우,  $Y_m$ 은 자유도  $L$ 의 central chi-square 분포를 따르고, 반대의 경우 자유도  $L$  및  $\lambda_m = L\gamma_m$ 의 non-centrality 파라미터<sup>[10]</sup>를 갖는 non-central chi-square 분포를 따른다.

$$Y_m \sim \begin{cases} \chi_L^2 & , H_0 \\ \chi_L^2(\lambda_m) & , H_1 \end{cases} \quad (5)$$

이 때  $L$ 값이 무한히 크다고 가정하면,  $Y_m$ 의 확률 분포는 중심 극한 정리(central limit theorem)에 따라서 정규 분포의 특징을 가지게 되며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_m \sim \begin{cases} N(L, 2L) & : H_0 \\ N(L(1+\gamma_m), 2L(1+2\gamma_m)) & : H_1 \end{cases} \quad (6)$$

각 CR 기기의 개별 판정은 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_m[k] = H(Y_m - T_m) \quad (7)$$

위 식에서  $D_m[k]$ 와  $T_m$ 은 각각 CR 기기의 개별 판정 결과 및 False alarm rate에 따른 임계값을 나타낸다.

$H(\cdot)$  함수는 Heaviside step function으로,  $Y_m$ 이 임계값보다 크거나 같으면  $D_m[k]=1$ 이고,  $Y_m$ 가 임계값보다 작으면  $D_m[k]=0$ 이다.

각 CR 기기의 개별 센싱에 따른 검출 확률과 오검출 확률은 다음의 식 (8), (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{D,m} = P\{Y_m > T_m | H_1\} = Q\left(\frac{T_m - L(1 + \gamma_m)}{\sqrt{2L(1 + 2\gamma_m)}}\right) \quad (8)$$

$$P_{F,m} = P\{Y_m > T_m | H_0\} = Q\left(\frac{T_m - L}{\sqrt{2L}}\right) \quad (9)$$

### 3-2 협력 스펙트럼 센싱

협력 스펙트럼 센싱에 대한 간략한 시스템 모델은 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며, 1차 사용자(primary user)와  $M$ 개의 CR 기기로 이루어져 있다고 가정한다. 그림 3에서 CR2는 주변 조형물에 의한 음영이 발생하게 되고, CR1은 CR3에 비해 경로에 의한 손실이 더 많이 발생하게 되어 CR2와 CR1의 스펙트럼 센싱 성능이 CR3에 비하여 떨어지게 된다. 이에 따라 센싱 성능 향상을 위해 협력 스펙트럼 센싱을 수행한다.

일반적으로 협력 스펙트럼 센싱은 3단계의 센싱 과정을 거치게 된다. 첫째, 각 CR 기기는 주변의 환

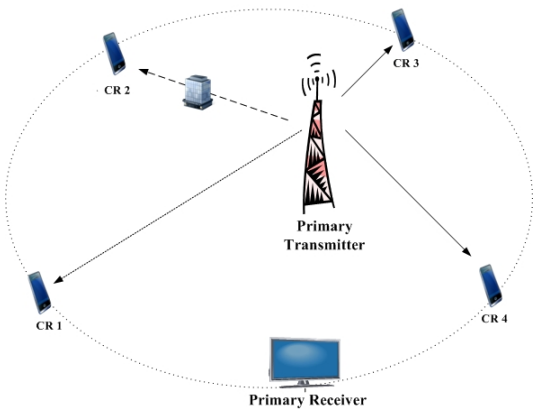


그림 3. 협력 스펙트럼 센싱 시스템 모델  
Fig. 3. System model of distributed spectrum sensing.

표 1. 각 최종 판정 방식에 따른 임계값  
Table 1. Threshold values for different decision rules.

Decision rule	Threshold( $T_H$ )
AND	$T_H = 1$
OR	$T_H = 1/M$
Majority	$T_H = 1/2$

경을 측정하여 개별 센싱을 수행하여 1차 사용자의 유, 무를 판단한다. 둘째, 개별 센싱 결과는 제어 채널을 통과하여 융합 센터로 전송된다. 셋째, 융합 센터는 수신된 개별 센싱 결과를 최종 판정 방식에 따라 1차 사용자의 유, 무에 대해 최종 결정을 내리게 된다.

### 3-3 최적화된 경관정 방식 제안

기존의 경관정 방식은 각 개별 센싱 결과를 산술 평균으로 융합하여 판정 방식에 따른 임계값에 따라 최종적으로 1차 사용자의 유, 무를 판정하였다. 기존의 판정 방식인 AND, OR 및 Majority 방식에 대한 임계값은 표 1과 같다. 경관정 방식은 연판정 방식에 비해 비교적 단순하고 시스템 부담이 적지만, 센싱 성능이 다소 떨어지게 된다. 본 논문은 센싱의 성능을 높이기 위해 개별 센싱 결과에 따른 검출 확률을 기반으로 가중치를 설정하여, 개별 센싱 결과에 반영하여 융합 센터로 전송하는 최적화된 경관정 방식을 제안하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_H = \sum_{m=1}^M w_m D_m[k] \quad (10)$$

식 (10)에서  $w_m$ 는 가중치를 나타내며, 다음의 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_m = \frac{P_{D,m}}{\sum_{m=1}^M P_{D,m}} \quad (11)$$

그림 4는 가중치가 적용된 경관정 방식에 따른 협력 스펙트럼 센싱의 블록도이다.

## IV. 모의 실험

이번 장에서는 본 논문에서 제안한 최적화된 경관정 방식의 성능을 모의 실험을 통하여 나타낸다.

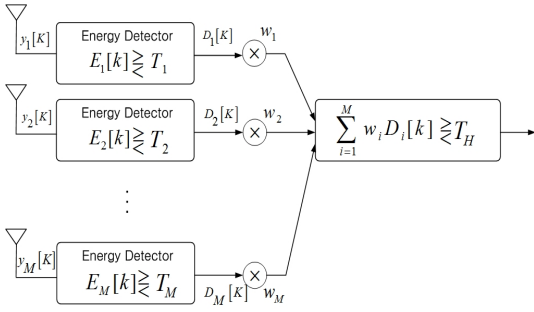


그림 4. 최적화된 경관정 방식의 블록도  
Fig. 4. Block diagram of optimal hard decision.

모의 실험을 위한 시스템 모델은 II장에서 설명한 바와 같이 1차 사용자의 신호를 OFDM 신호로 하였으며, 다수의 CR 기기(거리는 모두 다르다.) 단일 1차 사용자로 이루어져 있다. 스펙트럼 센싱 방법으로 복잡도가 낮고 간단한 에너지 검출법을 적용하였으며, 개별 센싱을 위한 임계값은 false alarm rate가 적용된 CFAR(Constant False Alarm Rate) 알고리즘에 의해 설정되었다.

다음 그림 5는 1차 사용자와 CR 기기간 거리가 모두 다를 경우, 단일 센싱을 수행하였을 때 검출 확률을 나타낸 것이다. Pd\_Single#의 숫자가 클수록 1차 사용자로부터 거리가 먼 CR 기기의 검출 확률을 나타낸다. 실험 결과와 같이 거리, 페이딩 및 음영 효과 등의 주변 전파 환경에 따라 각 CR 기기의 센싱 성능이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 센싱 성능이 낮은 CR 기기일수록 협력 스펙트럼 센싱이 반드시 필요하다.

그림 6은 false alarm rate가 5%와 10%로 각각 변화시켰을 때 최적화된 경관정 방식이 적용된 협력 스펙트럼 센싱의 검출 확률을 비교하였다. 실험 결과는 false alarm rate가 5%와 10%일 때 검출 확률과 거리가 가장 먼 CR 기기에서 수행한 단일 센싱을 비교하여 성능을 나타내었다. 이 결과를 통해 false alarm rate가 낮을수록 검출 확률이 낮게 나오는 것을 알 수 있으며, 협력 스펙트럼 센싱이 단일 센싱에 비해 우수한 센싱 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

그림 7에 연관정 방식 중 동일이득 결합이 적용된 협력 스펙트럼 센싱 방식의 검출 확률(Pd\_EGC), 가중치가 적용되지 않은 경관정 방식(Pd\_conventional) 및 가중치가 적용된 경관정 방식(Pd\_optimal)의 검출

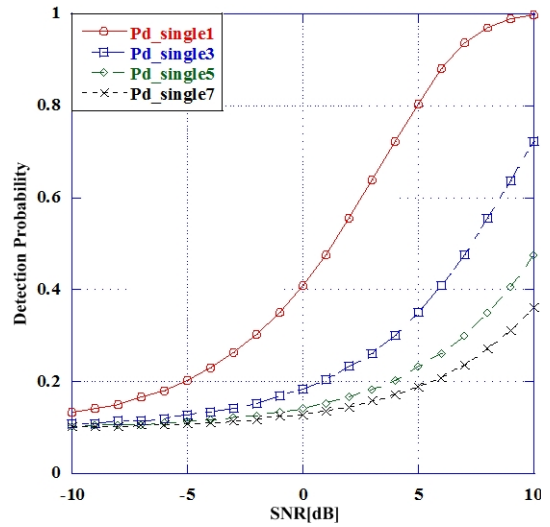


그림 5. 1차 사용자와 CR 기기 사이 거리 및 SNR에 따른 스펙트럼 센싱 확률  
Fig. 5. Detection probability versus SNR for different distances between primary transmitter and CR devices.

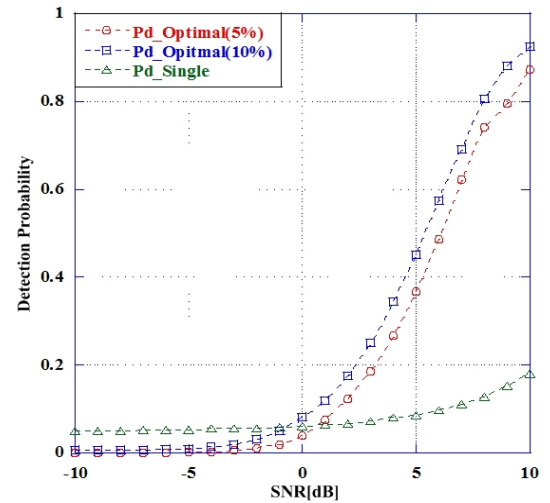


그림 6. 최적화된 경관정 방식이 적용된 협력 스펙트럼 센싱의 검출 확률  
Fig. 6. The detection probability of cooperative spectrum sensing with weighted based on distance.

확률을 비교하여 나타내었다.

실험 결과, 가중치가 적용된 경관정 방식의 검출 확률이 기존의 경관정 방식의 검출 확률에 비하여 높게 나온 것을 알 수 있다. 또한, 경관정 방식에 비해 성능이 좋은 연관정 방식의 검출 확률에 거의 근

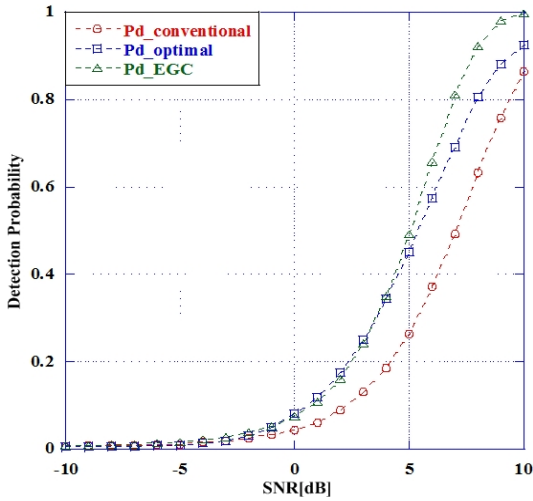


그림 7. 결합 방식에 따른 검출 확률 비교  
 Fig. 7. Detection probability comparison according to combining scheme.

접한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

### V. 결 론

본 논문은 각 CR 기기의 검출 확률을 기반으로 가중치를 설정하고, 설정된 가중치를 개별 센싱 결과에 반영하여 융합 센터에서 결합하는 방식의 최적화된 경관정 방식을 제안하였다. 기존의 경관정 방식은 단순히 모든 CR 기기의 개별 센싱 결과를 산술 평균을 취하여 최종 판정을 수행하였다. 그러나 협력 스펙트럼 센싱에서 CR 기기는 음영 효과, 페이딩, 거리에 따른 경로 손실 등에 의해 각각의 센싱 성능의 차이가 발생한다. 이러한 성능의 차이를 극복하여 센싱의 성능을 높이고, 기존의 경관정 방식의 프로세스 과정이 단순하고 시스템 부담이 적은 장점을 살리는 검출 확률 기반 가중치가 적용된 최적화된 경관정 방식은 향후 소출력 CR 기기 등에 응용이 가능하다. 모의 실험 결과를 통하여 기존의 경관정 방식보다 센싱 성능이 높아졌으며, 센싱 성능이 우수한 연관정 방식과 유사한 센싱 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[1] FCC, "Spectrum policy task force", Rep. ET Docket,

no. 02-135, Nov. 2002.  
 [2] FCC, "Facilitating opportunities for flexible, efficient and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies", *Notice of Proposed Rule Making, ET Docket*, no. 03-332, Dec. 2003.  
 [3] J. Y. Kim, *Cognitive Radio Communications*, Gyo-bo Publishers, Seoul, Korea, 2008.  
 [4] J. Mitola III, G. Q. Maguire Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal", *IEEE Personal Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.  
 [5] IEEE 802.22, Working Group on Wireless Regional Area Networks(WRAN), <http://grouper.ieee.org/groups/802/22>.  
 [6] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. Vuran, and S. Mohanty, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey", *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127-2159, May 2006.  
 [7] Z. Quan, S. Cui, and A. H. Sayed, "An optimal strategy for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks", in *Proc. of IEEE GLOBECOM 2007*, pp. 2947-2951, Nov. 2007.  
 [8] G. Ganesan, Y. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks", in *Proc. of IEEE DySPAN 2005*, pp. 137-143, Nov. 2005.  
 [9] A. Ghasemi, E. S. Sousa, "Asymptotic performance of collaborative spectrum sensing under correlated log-normal shadowing", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 34-36, Jan. 2007.  
 [10] E. Visotsky, S. Kuffner, and R. Peterson, "On collaborative detection of TV transmission in support of dynamic spectrum shating", in *Proc. of IEEE DySPAN 2005*, pp. 338-345, Nov. 2005.  
 [11] S. M. Mishra, A. Sahai, and R. W. Broderson, "Cooperative sensing among cognitive radios", in *Proc. of IEEE ICC 2006*, vol. 4, pp. 1658-1663, Jun. 2006.

이 소 영



Radio, 가시광통신

2004년: 광운대학교 전자공학부 (공학사)

2008년 8월~현재: 광운대학교 전자공학과 석사과정

2010년 7월~현재: 한국전자산업진흥회

[주 관심분야] 무선 통신, Cognitive

김 진 영



Scientist

1998년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

2000년: 미국 Princeton University, Research Associate

2001년: SK 텔레콤 네트워크연구원 책임연구원

2009년: 미국 M.I.T 공대 Visiting

2001년~현재: 광운대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 디지털 통신, 무선통신, 채널부호화