

# 최적의 임계값을 고려한 K-out-of-n 협력 스펙트럼 검출 기법

## A Cooperative K-out-of-n Spectrum Sensing Method Considering Optimal Threshold

최 문 근 · 공 형 윤

Moon-Geun Choi · Hyung-Yun Kong

### 요 약

본 논문에서는 에너지 검출 기법의 성능을 향상시키기 위해 각각의 SU(Secondary User)에서 수신한 PU(Primary User) 신호의 크기를 바탕으로 대수적 연산을 통해 에러 확률이 가장 낮은 최적의 임계값을 찾아 PU의 신호를 검출하는 기법을 제안하며 최적의 임계값을 고려해 생성된 local decision을 바탕으로 가장 낮은 에러 확률을 보이는 K-out-of-n 법칙에 적용하는 방법을 연구한다. 각각의 SU에서 최적의 임계값을 찾고 본 논문에서 제안하는 기법의 성능 평가를 위해 Matlab을 이용하여 이를 시뮬레이션하고, 기존의 협력 스펙트럼 검출 기법 중 하나인 OR 법칙과 비교 분석한다. Matlab을 이용한 시뮬레이션 결과, 최적의 임계값을 이용한 K-out-of-n 법칙이 기존의 OR 법칙에 비해 오 경보 확률 및 미 검출 확률이 감소한 것을 알 수 있다.

### Abstract

In this paper, to improve performance of spectrum sensing, we propose the method which can find optimal threshold based on power of PU(Primary User) signal. To find optimal threshold value, we will use mathematical method, and find threshold which can has lowest error probability. Each SU(Secondary User) use this threshold and All Su makes local decision. All Su Send local decision to FC(Fusion Center). In this paper we consider K-out-of-n rule to combining local decision. To make global decision value, FC find optimal n. In the FC. FC received local decision which has lowest error probability and using optimal n and these vaule. FC make global decision value. In this paper, to analysis performance proposed scheme, we simulate proposed scheme using matlab and compare with traditional OR Rule. As a result of simulation, we can know that proposed scheme can get a better performance than traditional OR rule.

Key words : Cognitive Radio, Energy Detection, Cooperative Spectrum Sensing, Optimal Threshold

### I. 서 론

최근 들어 급격하게 증가하고 있는 무선 통신 시장으로 인해 무선 통신 기기와 주파수 대역의 수요 역시 날로 증가하고 있다. 그러나 이미 대부분의 주파수 대역이 할당되어 주파수 부족 현상이 나타나고 있다. 그림 1은 미국 뉴욕시의 주파수 대역 사용 현

황을 나타내고 있다. 그림 1<sup>[1]</sup>에서 보이는 바와 같이 이미 대부분의 주파수 대역이 할당되어 있어 주파수 부족 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 각 주파수 대역의 실제 사용률은 608~698 MHz를 제외하고는 대부분이 25% 미만을 나타내고 있다. 이와 같이 주파수 부족 문제를 해결하고, 주파수 대역의 사용률을 높이기 위해 인지 통신<sup>[2]</sup>이라는 기법이 제

「이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0004865).」  
울산대학교 전기전자정보시스템부(Department of Electronic Engineering, University of Ulsan)

· 논문 번호 : 20110519-042

· 교신저자 : 공형윤(e-mail : hkong@mail.ulsan.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 8월 12일

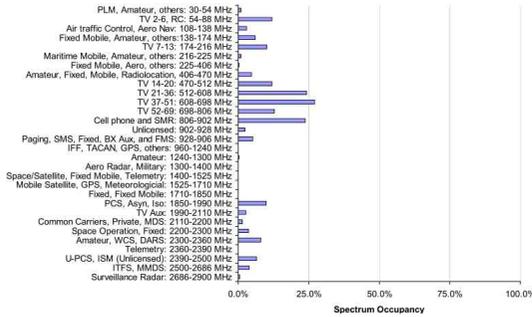


그림 1. 스펙트럼 사용 현황  
Fig. 1. Spectrum usage.

안되었다. 인지 기법은 동적 스펙트럼 할당 기법을 기반으로 스펙트럼 검출 기법을 통해 2차 사용자(Secondary User: SU)가 1차 사용자(Primary User: PU)의 스펙트럼 대역을 검출한 후 비어 있는 스펙트럼을 찾아 SU간 통신을 가능하게 하는 기법이다.

인지 통신에서 PU의 스펙트럼을 검출하는 스펙트럼 검출 기법(spectrum sensing method)은 에너지 검출 기법(energy detector), 정합 필터 기법(matched filter), 주기 정상성(cyclostationary method) 기법 등이 있다<sup>[3]</sup>.

에너지 검출 기법의 성능은 자유도(degree of freedom), PU의 SNR(signal to noise) 그리고 임계값(threshold)에 의해 영향을 받는다. 따라서 에너지 검출 기법에서 발생할 수 있는 에러인 오 경보 확률(false alarm probability) 및 미 검출 확률(miss detection probability)을 줄이기 위해서는 이들 변수를 적절하게 조절할 필요가 있다. 이러한 변수들 중 SU에서 조절 가능한 변수는 자유도와 임계값이다. 자유도는 검출 시간 및 신호의 대역폭이 정해지면 고정된 값을 가지므로 실제적으로 에너지 검출기의 성능에 영향을

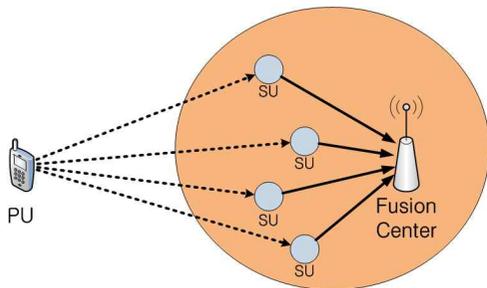


그림 2. 협력 스펙트럼 검출  
Fig. 2. Cooperative spectrum sensing.

주는 변수는 임계값이다.

단일 SU에 의한 스펙트럼 검출은 Hidden Terminal Problem이나 페이딩(fading)과 같은 요소로 인해 심각한 성능 저하를 겪을 수 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해 협력 스펙트럼 검출 기법<sup>[4]</sup> 제안되었다. 협력 스펙트럼 검출 기법은 다수의 SU가 PU의 신호를 검출하여 스펙트럼 검출의 정확도를 높이는 기법이다. 이러한 협력 스펙트럼 검출 기법은 검출에 참여하는 SU의 수와 퓨전 센터에서 고려하는 SU의 local decision의 수에 따라 성능에 영향을 받는다. 그러므로 협력 스펙트럼 검출 기법의 성능을 향상시키기 위해서는 SU의 수를 적절히 조절하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 협력 스펙트럼 검출에서 최적의 성능을 이끌어낼 수 있는 최적화 기법을 제안한다. 다수의 SU로 구성된 인지 통신 네트워크에서 각각의 SU가 구현하는 스펙트럼 검출 성능 향상을 위해 최적의 임계값을 찾는 방법을 제안한다. 이와 함께 협력 스펙트럼 검출 기법에서 최적의 성능을 이끌어내기 위해 퓨전 센터에서 고려하는 SU의 local decision의 수를 결정하는 방법을 제안한다.

## II. 단일 SU에 의한 스펙트럼 검출

### 2-1 에너지 검출 기법

에너지 검출 기법<sup>[5]</sup>은 특정 주파수 대역을 사용하는 PU 신호의 크기를 측정하여 이를 바탕으로 PU의 존재 유무를 판단하는 기법이다. 하지만 에너지 검출 기법은 잡음이 섞인 신호의 크기를 측정하기 때문에 PU 신호의 SNR(Signal to Noise Ratio)이 낮은 경우 성능이 크게 저하될 수 있다. 에너지 검출 기법은 SU에서 수신한 PU의 신호  $y(t)$ 를 대역 통과 필터에 통과시킨 후 대역 통과된 신호를 샘플링해 준다. 그리고 난 후 신호의 에너지를 구하기 위해 샘플링된 신호를 제곱한 후 샘플을 모두 더해 샘플의 수만큼 나누어 준다. 이러한 에너지 검출 기법의 순서도는 그림 3<sup>[6]</sup>과 같다.

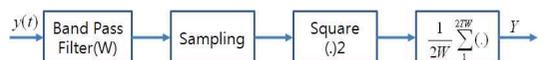


그림 3. 에너지 검출 기법  
Fig. 3. Energy detection.

대역 통과 필터의 대역폭이  $W$ 이고, 샘플 간 시간 간격이  $T$ 라면 대역 통과된 신호의 에너지를 구하기 위해서는  $2TW$ 개의 샘플을 더해 주어야 한다.

PU가 전송하는 신호를  $y(t)$ 라고 가정한다. 이 때 PU가 신호를 전송하는 경우를  $h_1$ , 신호를 전송하지 않는 경우를  $h_0$ 라고 할 경우  $y(t)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)에서  $n(t)$ 는 AWGN,  $h$ 는 레일리 페이딩,  $s(t)$ 는 PU가 전송하는 신호를 나타낸다.

$$y(t) = \begin{cases} n(t) & , h_0 \\ hs(t) + n(t) & , h_1 \end{cases} \quad (1)$$

SU에서 수신한 PU의 신호  $y(t)$ 를 에너지 검출기에 통과시켜 얻은 값을  $Y$ 라고 할 때 hypothesis는 식 (2)와 같다.

$$Y = \begin{cases} \chi_{2TW}^2 & , H_0 \\ \chi_{2TW}^2(2\gamma) & , H_1 \end{cases} \quad \left( \gamma = \frac{\lambda}{2} \right) \quad (2)$$

SU는 에너지 검출 기법을 통해 얻은  $Y$ 를 바탕으로 PU가 현재 주파수 대역을 사용하고 있는지를 판단하게 된다. 만약 수신된  $Y$ 가 임계점  $\lambda$ 보다 작으면 PU가 신호를 전송하지 않고 있는 것으로 판단하고,  $Y$ 가 임계점  $\lambda$ 보다 크면 PU가 신호를 전송하고 있는 것으로 판단한다. 이 때 실제로 PU가 신호를 전송중이고  $Y$ 가  $\lambda$ 보다 큰 경우, SU는 현재 PU가 신호를 전송 중인 것으로 판단하며, 이를 검출 확률이라고 한다. 검출 확률은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_d = \Pr(Y > \lambda | h_1) \quad (3)$$

이에 반해 SU에서 발생할 수 있는 에러 확률은 미 검출 확률( $P_m$ )과 오 경보 확률( $P_f$ )이 있다. 미 검출 확률은 실제로 PU가 신호를 전송 중이나  $Y$ 가 임계값보다 작아 SU에서 PU가 현재 신호를 전송중이지 않은 것으로 판단할 확률이다. 미 검출 확률은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, Malcom-Q function을 이용할 경우 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m = \Pr(Y < \lambda | h_1) \quad (4)$$

$$P_m = 1 - Q_u(\sqrt{2\gamma}, \lambda) \quad (5)$$

식 (5)에서  $Q_u$ 는 Malcom-Q function이다.

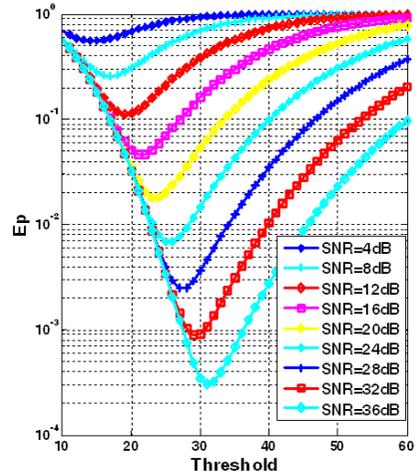


그림 4. 임계값에 따른 에러 확률( $u=5$ )  
Fig. 4. Error probability depending on threshold.

또 다른 에러 확률인 오 경보 확률은 실제로 PU가 신호를 전송중이지 않으나  $Y$ 가  $\lambda$ 보다 커, SU에서 PU가 현재 신호를 전송 중인 것으로 판단할 확률이다. 이러한 오 경보 확률은 식 (6)과 나타낼 수 있으며, gamma function을 이용하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = \Pr(Y > \lambda | h_0) \quad (6)$$

$$P_f = \frac{\Gamma\left(u, \frac{\lambda}{2}\right)}{\Gamma(u)} \quad (7)$$

식 (7)에서  $\Gamma$ 는 gamma function이며,  $u = TW$ 이다.

그림 4는 자유도( $u$ )가 5인 경우 임계값과 PU의 SNR에 따른 에러 확률( $E_p = P_m + P_f$ )을 나타낸 그림이다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 PU의 SNR에 따라 가장 작은 에러 값을 가지는 임계값이 달라진다. 그러므로 SU가 local decision bit를 생성하기 전 최적의 임계값을 얻기 위한 과정이 선행되어야 한다.

### 2-2 최적의 임계값 도출

각각의 SU가 최적의 임계값을 얻기 위해서는 우선적으로 PU 신호의 전력을 계산한 후 local decision을 도출하기 이전에 모든  $\lambda$ 에 걸쳐 오 경보 확률 및 미 검출 확률을 계산하여야 한다. 그리고 난 후 계산된  $E_p$ 를 통해 SU는 최적의 임계값을 도출하



그림 5. 최적의 임계값 설정을 위한 순서도  
Fig. 5. Flow chart to set optimal threshold.

고 설정된 최적의 임계값을 이용하여 PU의 신호를 검출하여야 한다. 그림 5는 이러한 과정을 나타낸 순서도이다.

그림 6은 PU의 SNR에 따라 결정된 최적의 임계값이다. 이러한 임계값은 Matlab 시뮬레이션을 통해 도출하였다. 이 때 PU의 신호는 Rayleigh 페이딩 채널을 거친다고 가정하며, 자유도는 5로 설정하였다.

또한, 오 경보 확률 및 미 검출 확률을 계산하기 위해 초기 임계값은 계산된 PU의 전력과 동일하게 설정하였다.

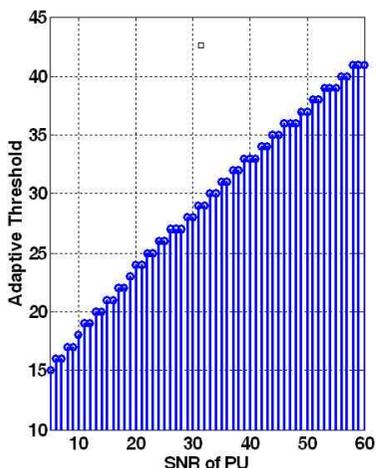


그림 6. 1차 사용자의 SNR에 따른 최적 임계값  
Fig. 6. Optimal threshold depending on SNR of PU.

### III. 협력 스펙트럼 검출

단일 SU에 의한 스펙트럼 검출의 단점을 보완하기 위해 제안된 협력 스펙트럼 검출 기법은 AND 법칙과 OR 법칙 그리고 K-out-of-n 법칙으로 나눌 수 있다. 이중 AND 법칙은 인지 통신 네트워크 내에 속한 모든 SU가 현재 PU가 신호를 전송 중인 것으로 판단할 경우에만 퓨전 센터에서 현재 PU가 신호를 전송 중인 것으로 판단하는 법칙이다. 이에 반해 OR 법칙은 인지 통신 네트워크 내에 속한 SU중 하나의 SU가 현재 PU가 신호를 전송 중인 것으로 판단할 경우, 퓨전 센터에서 현재 PU가 신호를 전송 중인 것으로 판단하는 법칙이다. 마지막으로 K-out-of-n 법칙은 인지 통신 네트워크에 속한 전체 K개의 SU 중 n개의 SU만이 현재 PU가 신호를 전송 중인 것으로 판단하는 경우, 퓨전 센터에서 현재 PU가 신호를 전송 중인 것으로 판단하는 법칙이다. 그림 7은  $K=5, u=5$  그리고  $n$ 을 달리할 경우 임계값에 따른 전체 에러 확률을 나타낸 그림이다. 그림 7에서  $n=1$ 인 경우 OR 법칙을 나타내며,  $n=5$ 인 경우 AND 법칙을 나타낸다. 참고문헌 [4]에서 증명된 바와 같이 OR 법칙이 AND 법칙보다 우수함을 알 수 있다. 그러나 실질적으로 에러 확률이 가장 작은 경우는 5-out-of-2 법칙을 사용하는 경우이다. 따라서 협력 스펙트럼 검출 기법의 성능 향상을 위해서는 K에 따라 적절한  $n$ 을 선택하여야 한다.

협력 스펙트럼 검출에서 오 경보 확률을  $Q_f$ , 미 검출 확률을  $Q_m$ 이라고 할 경우  $Q_f$ 와  $Q_m$ 은 식 (8), (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_m = 1 - \sum_{i=n}^K \binom{K}{i} P_d^i (1 - P_d)^{K-i} \quad (8)$$

$$Q_f = \sum_{i=n}^K \binom{K}{i} P_f^i (1 - P_f)^{K-i} \quad (9)$$

협력 스펙트럼 검출에서 발생할 수 있는 에러 확률을  $E_Q$  [8],[9]라고 하면 식 (8), (9)를 이용하여 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_Q &= Q_m + Q_f \\ &= 1 - \sum_{i=n}^K \binom{K}{i} P_d^i (1 - P_d)^{K-i} \\ &\quad + \sum_{i=n}^K \binom{K}{i} P_f^i (1 - P_f)^{K-i} \end{aligned}$$

$$= 1 + \sum_{i=n}^K \binom{K}{i} \left\{ P_f^i (1 - P_f)^{K-i} - P_d^i (1 - P_d)^{K-i} \right\} \quad (10)$$

그림 7은 SU의 임계값에 따른 에러 확률( $E_Q$ )을 나타낸 그림이며,  $n$ 에 따라 다른 에러 확률을 가지지만 모든 그래프가 최소값을 가지는 그래프 형태를 나타내고 있다. 또한,  $K=5$ 인 경우 그림 7을 통해  $n=2$ 일 때의 그래프가 다른  $n$ 에서의 그래프에 비해 가장 낮은 에러 확률에서 변곡점을 가지는 것을 알 수 있다. 이는  $n=2$ 일 때 가장 낮은  $E_Q$ 를 가짐을 의미한다. 따라서 각  $n$ 에 관한  $E_Q$ 를 미분한 값이 0이 되는 지점을 찾으면 각  $n$ 이 가지는 최소 에러 확률을 구할 수 있다. 그러나 본 논문에서 찾고자 하는  $n$ 은 자연수로서 불연속적인 값이므로  $E_Q$ 의 도함수  $E_Q^n$ 을 식 (11)과 같이 근사화하여 각  $n$ 에 대한 변곡점을 찾도록 한다.

$$E_Q^n \approx E_Q(n+1) - E_Q(n) \quad (11)$$

만약  $n$ 이 연속적인 값일 경우 식 (11)이 0인 곳이 최소 에러 확률을 가지는 변곡점이 된다. 그러나  $n$ 은 불연속적인 값이므로 식 (11)에  $n=\{1, 2, \dots, K\}$ 까지 모든 값을 대입하고, 그 중 가장 0에 가까운 값을 가지는  $n$ 을 찾는다. 이렇게 찾아진  $n$ 은 모든  $n$ 에 걸쳐 가장 낮은 에러 확률을 가진다. 이와 같은 과정을 거쳐 찾아진  $n$ 을 이용한 K-out-of-n 법칙은 그림 8과 같으며,  $K$ 가 3~10,  $u=5$ 일 때의 에러 확률을 모의실험을 통해 나타내고 있다.

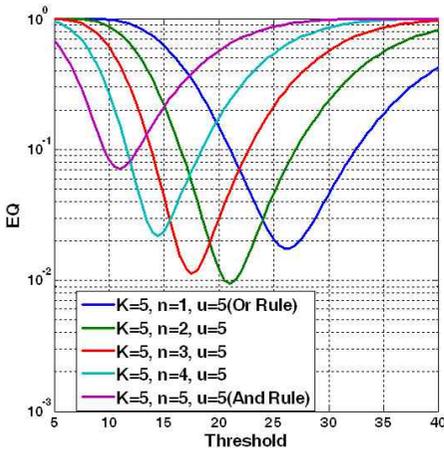


그림 7.  $n$ 에 따른 에러 확률  
Fig. 7. Error probability depending on number of  $n$ .

그림 8은  $K$ 가 3~10,  $u=5$ 일 때 최적의  $n$ 을 이용한 K-out-of-n 법칙에 대한 에러 확률을 나타내고 있다. 그림 9는  $K=5, u=5$ 인 경우 기존의 협력 스펙트럼 검출 기법과 본 논문에서 제안하는 협력 스펙트럼 검출 기법의 에러 확률을 나타낸 그래프이다. 마커가 없는 선은 OR 법칙을 이용한 협력 스펙트럼 검출 기법의 오 경보 확률 및 미 검출 확률을 나타내고 있다. 반면, 마커가 있는 선은 본 논문에서 제안한 최적의 임계값 및 최적의  $n$ 을 적용한 시스템의 오 경보 확률 및 미 검출 확률을 나타내고 있다. 이 때 기존의 협력 스펙트럼 검출과 최적의 협력 스펙트럼 검출 기법의 비교를 위해 PU의 SNR이 10 dB, 15 dB, 20 dB일 경우 모두를 비교하였다. PU의 SNR이 10 dB, 15 dB, 20 dB인 그래프 모두에서 본 논문에서 제안하는 시스템의 오 경보 확률 및 미 검출 확률이 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 PU의 SNR이 높을수록 기존의 기법과 본 논문에서 제안하는 기법 간의 에러 확률의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 그러나 높은 오 경보 확률에서 제안하는 기술의 미 검출 확률이 기존의 OR 기법의 미 검출 확률보다 높아지는 것을 알 수 있는데, 이는 높은 오 경보 확률에서 제안하는 기법이 기존의 OR보다 성능이 낮음을 의미한다. 이는 높은 미 검출 확률에서 찾은 최적의 임계값은 임계값 그 자체에 이미 많은 에러를 포함하고 있기 때문이다.

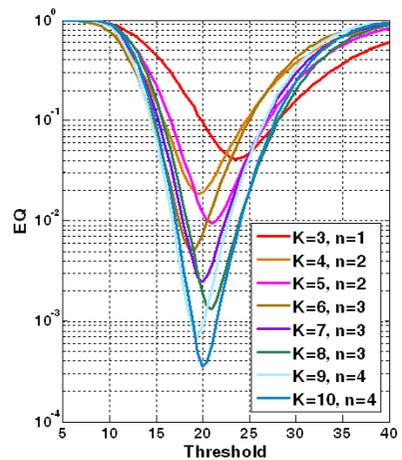


그림 8. 최적의  $n$ 을 고려한 협력 스펙트럼 검출의 에러 확률  
Fig. 8. Error probability of cooperative spectrum sensing considering optimal number of  $n$ .

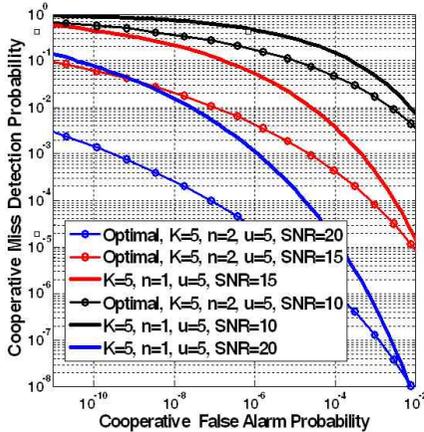


그림 9. OR 기법과 본 논문에서 제안하는 기법의 오경보 확률 및 미검출 확률  
 Fig. 9. False alarm and miss detection probability of OR-rule and proposed scheme.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 오경보 확률이나 미검출 확률을 감소시키기 위해 최적의 임계값을 이용한 협력 스펙트럼 검출 기법을 제안하였다. 최적의 임계값을 찾기 위해 각각의 SU는 수신한 PU 신호의 크기를 바탕으로 모든 임계값에서의 에러 확률을 계산한다. 그리고 가장 작은 에러 확률에서의 임계값을 최적의 임계값으로 설정하여 PU의 존재 유무를 판단한다. 그리고 협력 스펙트럼 검출의 에러 확률을 최소화할 수 있도록  $K$ 에 따른 최적의  $n$ 을 구하고 최적의  $n$ 에 따른  $K$ -out-of- $n$  법칙을 이용하여 전체 검출 결과 값을 도출해 낸다. 본 논문에서는 제안하는 협력 스펙트럼 검출 기법의 성능을 분석하기 위해 Matlab을 이용하여 모의 실험하였다.

모의실험을 통해 본 논문에서 제안하는 기법의 오경보 확률이나 미검출 확률과 같은 에러 확률이 기존의 OR 기법에 비해 감소하는 것을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

[1] Mark A. McHenry, "NSF spectrum occupancy measurements project summary", no. FY2004-013, Aug.

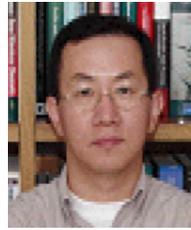
2005.  
 [2] Simon Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, Feb. 2005.  
 [3] Tevfik Yücek, Hüseyin Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, First Quarter 2009.  
 [4] Amir Ghasemi, Elvino S. Sousa, "Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing", *Journal of Communications*, vol. 2, no. 2, pp. 71-82, Mar. 2007.  
 [5] Fadel F. Digham, Mohamed-Slim Alouini, and Marvin K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels", *IEEE Inter. Conf. Communications(ICC)*, pp. 3575-3579, Anchorage Alaska, USA, May 2003.  
 [6] Moon Geun Choi, Hyung Yun Kong, "A study of the or rule to reduce decision time of primary user at the cognitive radio", *IWIT Journal*, vol. 10, no. 5, pp. 161-166, Oct. 2010.  
 [7] Amir Ghasemi, Elvino S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments", *IEEE DySPAN 2005*, pp. 131-136, Baltimore, MD, USA, Dec. 2005.  
 [8] Wei Zhang, Ranjan K. Mallik, and Khaled Ben Letaief, "Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks", *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, pp. 3411-3415, Beijing, China, May 2008.  
 [9] Wei Zhang, Ranjan K. Mallik, and Khaled Ben Letaief, "Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks", *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, Issue 12, pp. 5761-5766, Dec. 2009.

최 문 근



2010년 2월: 울산대학교 전기전자  
제어공학과 (공학사)  
2010년 3월~현재: 울산대학교 전기  
전자정보시스템공학부 석사과정  
[주 관심분야] 인지 통신, 협력 스펙  
트럼 검출

공 형 운



1989년 2월: New York Institute of  
Technology) 전자공학과 (공학사)  
1991년 2월: Polytechnic University  
전자공학과 (공학석사)  
1996년 2월: Polytechnic University  
전자공학과 (공학박사)  
1996년~1996년: LG 전자 PCS 팀장  
1996년~1998년: LG 전자회장실 전략사업단  
1998년~현재: 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교  
수  
[주 관심분야] 모듈레이션, 채널 부호화, 검파 및 추정 기  
술, 협력 통신, 센서 네트워크