

논문 2013-50-1-3

잡음 전력의 불확실성이 존재하는 환경에서 이중 임계값을 사용하는 에너지 검파 기반 협력 스펙트럼 감지의 성능 분석

(Performance Analysis of an Energy Detection Based Cooperative Spectrum Sensing with Double Thresholds in the Presence of Noise Uncertainty)

임 창 현*

(Chang Heon Lim)

요 약

일반적으로 에너지 검파 기반 스펙트럼 감지 방식은 잡음 전력에 대한 불확실성에 취약한 것으로 알려져 있다. 이러한 문제를 해결하기 방안 중의 하나로 이중 임계값을 사용하는 에너지 검파 기반 협력 스펙트럼 감지 방식이 제안된 바 있다. 그러나 아직까지 페이딩 채널 환경에서 이 방식에 대한 성능 분석이 수행된 바 없다. 본 논문에서는 에너지 검파 기반 스펙트럼 감지 방식에 대한 이전 연구 결과를 활용하여 에너지 검파 기반 협력 스펙트럼 감지 방식에 대한 닫힌 형태의 수학적 분석 결과를 제시하고자 한다.

Abstract

An energy detection based spectrum sensing is widely known to be susceptible to the noise power uncertainty. As one of the methods to resolve this problem, a cooperative spectrum sensing based on an energy detector with double thresholds has been published recently. However, its performance analysis under a fading channel has not been carried out yet. In this paper, we present a closed form of performance analysis of the scheme by extending our previous work on evaluating the performance of an energy detector in the presence of noise power uncertainty.

Keywords : cognitive radio, cooperative spectrum sensing, energy detection, noise uncertainty, decision fusion

I. 서 론

최근 주파수 자원을 보다 효율적으로 사용하기 위한 방안의 하나로 기회적 스펙트럼 접근(opportunistic spectrum access) 방식^[1]에 대한 관심이 많아지고 있다. 이는 특정 주파수 대역에 대한 우선 사용권을 보유하고 있는 우선 사용자(primary user)가 해당 대역을 사용하지 않는 경우에 2차 사용자(secondary user)가 해당 대

역을 사용하는 것을 허용하는 기술로서 주파수 자원 전체에 대한 이용 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있는 기술이다.

인지 무선(cognitive radio)^[2] 시스템은 이를 실현할 수 있는 시스템으로서 우선 사용자의 활동 유무를 판단할 수 있는 스펙트럼 감지 기능을 기본적으로 탑재하고 있다. 인지 무선 시스템이 사용하는 스펙트럼 감지 방식^[3]으로는 정합 필터(matched filter)를 사용한 방법과 에너지 검파(energy detection)를 사용한 방식 그리고 특징 추출(feature extraction)을 이용한 방식으로 구분할 수 있는데, 이 중에서 에너지 검파 방식은 우선 사용자의 신호에 대한 정보를 거의 필요로 하지 않으면서

* 평생회원, 부경대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Pukyong National University)
접수일자: 2012년10월17일, 수정완료일: 2012년12월29일

구현이 간단하다는 장점이 있어 최근 이에 대한 연구가 활발하게 전개되고 있다.

무선 환경에서 스펙트럼 감지를 수행할 때 직면하는 큰 어려움 중의 하나는 페이딩 현상이다. 우선 사용자가 활동을 하더라도 페이딩으로 인해 우선 사용자로부터의 수신 신호 세기가 약해지면 우선 사용자의 활동 여부를 제대로 탐지할 수 없게 된다. 이를 해결하는 방안 중의 하나로 일종의 공간 다이버시티를 사용하는 협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing)^[4] 방안이 있다. 이는 공간적으로 산재해있는 2차 사용자의 스펙트럼 감지 결과를 종합하여 우선 사용자의 출현 여부를 판단하는 방식이다. 이 방식에는 다양한 형태가 있지만 가장 일반적인 형태는 2차 사용자 차원에서 우선 사용자의 출현 여부를 판단한 후, 그 결과를 융합 센터에 보내고, 융합 센터는 이를 종합하여 최종 판단을 하는 방식이다. 그런데 이때 만약 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자의 수가 많다면 이들이 융합 센터에 전달해야하는 데이터 양도 많아지는 문제점이 발생한다. 이를 해소하는 방안으로 2차 사용자가 단일 임계값 대신 2개의 임계값을 사용하여 스펙트럼 감지를 수행하는 방안이 제안된 바 있다^[5]. 이 방식은 우선 사용자로부터의 수신 신호 세기가 두 임계값 사이에 존재하는 경우에 이를 토대로 내리는 스펙트럼 감지 결정은 신뢰성이 낮다고 보고, 해당 감지 결과를 융합 센터에 보내지 않는 방식이다. 이를 통해 결과적으로 2차 사용자와 융합 센터간의 전송 정보량을 줄일 수 있다. 또한 다른 측면에서 보면 배경 잡음 전력의 불확실성을 감안할 수 있는 방식이다.

참고 문헌 [6]에서 지적한 바와 같이 에너지 검파 기반의 스펙트럼 감지 방식은 잡음 전력에 대한 불확실성이 크면 성능이 떨어진다고 알려져 있다. 그리고 단일 임계값을 사용하는 스펙트럼 감지 방식에 대한 성능 열화 정도를 정량적으로 분석하는 시도^[7-9]들이 발표된 바 있다. 본 논문에서 고려하고 있는 이중 임계값 에너지 검파 기반의 스펙트럼 감지 방식에 대해서는 참고 문헌 [10]에서 성능 분석을 다룬 바가 있다. 그러나 이 연구 결과는 페이딩을 고려하지 않았으며, 단힌 형태의 정량적 표현을 제시하지 못하는 등의 단점을 지니고 있다. 이에 본 논문에서는 이전 연구 결과^[11]를 토대로 잡음 전력에 대한 불확실성이 존재하는 환경에서 해당 방식의 성능 열화를 정량적으로 분석한 결과를 제시하고

자 한다.

본 논문은 I 장 서론에 이어 II장에서 두개의 임계값을 사용하는 시스템 구조를 설명하고, 그리고 III장에서는 분석 과정 기술하며, IV장에서 분석 결과를 제시하고, 최종적으로 V장에서 결론을 맺는 것으로 구성하였다.

II. 시스템 구성

논문에서 고려하고 있는 시스템의 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이 M 명의 2차 사용자가 에너지 검파 방식으로 1차 사용자 출현 여부를 결정하고, 그 결정을 융합 센터로 전송한 후 융합 센터가 최종적으로 우선 사용자의 활동 여부를 결정하는 형태이다. 이때 2차 사용자의 결정을 융합 센터로 전송하는 과정은 오류가 없다고 가정하고, 융합 센터에서 사용하는 융합 규칙으로는 K out of M 규칙^[4]을 채택하는 것으로 설정한다.

스펙트럼 감지는 수신한 신호를 분석하여 우선 사용자가 해당 채널을 사용하고 있는지 여부를 판단하는 활동인데, 이는 곧 통계학의 가설 검정 문제(hypothesis testing)로 볼 수 있다. 이 경우 설정 가능한 두 가지 가설을 각각 H_1 과 H_0 로 표기하기로 한다면, 그림 1에서 i 번째 2차 사용자가 수신하는 신호 $r_i(t)$ 는 가설에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_i(t) = \begin{cases} \alpha_i s(t) + w_i(t), & H_1 \\ w_i(t) & H_0 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 $s(t)$ 은 대역폭이 W 인 우선 사용자 신호를 나타내고, $w_i(t)$ 는 평균이 0이고 전력 스펙트럼 밀도가 $N/2$ 인 가우시안 잡음을 나타낸다. 그리고 α 는 우선

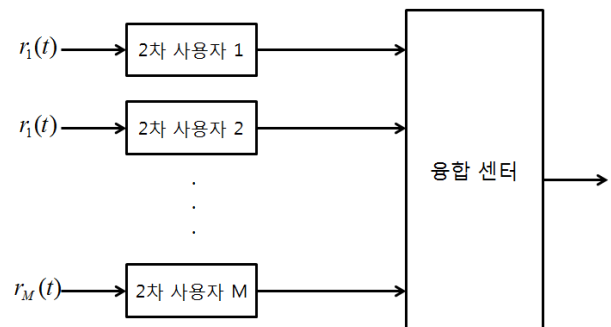


그림 1. 협력 스펙트럼 감지 시스템 구조
Fig. 1. Architecture of the cooperative spectrum sensing.

사용자 송신기와 i 번째 2차 사용자 단말기 사이에 존재하는 전송 채널의 이득을 나타내는 것으로, 이 논문에서는 이 채널을 레일리(Rayleigh) 채널이라고 가정하며 서로 다른 2차 사용자에게 대해서는 서로 통계적으로 독립인 것으로 가정한다.

본 논문에서는 $w_i(t)$ 의 전력 수준을 2차 사용자가 추정한 후, 이것을 토대로 검파 임계값을 설정하는 것으로 설정한다. 이때 추정 오차가 확률적인 양이라는 점을 고려하기 위하여 추정값이 $N_0/2$ 이라면 실제 스펙트럼 밀도 $N/2$ 는 $[N_0/2\rho, N_0\rho/2]$ 의 범위에서 균일 분포를 갖는 확률 변수로 모델링한다^[6].

2차 사용자는 에너지 검파를 사용하여 1차 사용자의 활동 여부를 판정하는데, 이때 i 번째 2차 사용자가 판정에 사용할 시험 통계량 X_i 는 다음과 같이 수신 신호 $r(t)$ 의 에너지를 사용하는 것으로 정의한다.

$$X_i = \int_0^T r_i^2(t) dt \quad (2)$$

개별 2차 사용자가 사용하는 에너지 검파 기반 스펙트럼 감지 방식은 2개의 임계값을 사용하는 방식으로 설정한다. 그리고 그림 2에 나타낸 바와 같이 산출한 에너지가 임계값 λ_{i0} 보다 작은 경우에는 우선 이용자가 활동하지 않은 것(D_0)으로 판단하고, 임계값 λ_{i1} 보다 크면 우선 사용자가 활동하는 것(D_1)으로 판정하고, 두 가지 임계값 사이에 존재할 때에는 판정을 유보하는 것(U)으로 한다.

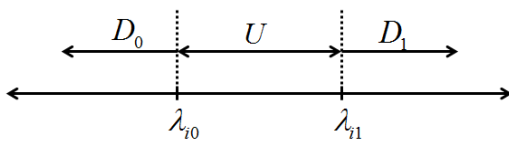


그림 2. 2개의 임계값에 따른 스펙트럼 감지 결정 방식
Fig. 2. Spectrum sensing decision based on double thresholds.

III. 성능 분석

저자는 이전 연구^[11]를 통해 잡음 전력의 불확실성이 존재하는 경우에 단일 임계값을 사용하는 에너지 검파 스펙트럼 감지기의 성능을 분석한 바가 있다. 본 논문에서 이를 활용하여 두 개의 임계값을 사용하는 방식의

스펙트럼 감지 성능을 오경보 확률과 검파 확률이라는 두 가지 측면에서 분석한 결과를 제시하고자 한다.

먼저 개별 2차 사용자가 사용하는 두 개의 임계값은 참고 문헌 [10]에서 정한 바와 같이 잡음 전력이 최대일 때와 최소일 때, 주어진 오경보 확률을 만족하는 임계값으로 설정하기로 한다. 참고 문헌 [11]의 분석에 따르면 잡음 전력을 정확하게 아는 경우, 오경보 확률 $P_{FA|N}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{FA|N} = \sum_{m=0}^{N_s-1} \frac{\lambda^m \exp\left(-\frac{\lambda}{N}\right)}{N^m \Gamma(m+1)} \quad (3)$$

위 식에서 λ 는 검파 임계값을 의미하고, N_s 는 수신 신호 측정 시간 T 와 수신 신호 대역폭 W 의 곱을 나타내며 N 은 단방향 잡음 전력 밀도를 가리킨다. 앞에서 언급한 바와 같이 N 은 일종의 확률 변수로서 최소값은 N_0/ρ , 최대값은 $N_0\rho$ 이므로, N 이 N_0/ρ 일때 주어진 오경보 확률 달성할 수 있는 λ 값을 구하면 이는 λ_{i0} 가 되고, $N_0\rho$ 인 경우에는 λ_{i1} 가 된다. 본 논문에서는 이 값을 수치 검색을 통해서 결정하는 것으로 한다.

본 논문에서는 편의상 2차 사용자가 사용하는 임계값이 모두 동일하다고 하다고 가정한다. 그러면 N 의 불확실성을 감안했을 때 i 번째 2차 사용자의 스펙트럼 감지에 대한 오경보 확률 $P_{FA,i}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다^[11].

$$P_{FA,i} = \begin{cases} \frac{\rho}{\rho^2-1} \left[F\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}\right) - G\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}, 0\right) \right] & N_s = 1 \\ \frac{\rho}{\rho^2-1} \left[F\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}\right) - G\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}, 0\right) \right] + \sum_{m=1}^{N_s-1} \frac{G\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}, m-1\right)}{\Gamma(m+1)} & N_s \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

위 식에서 F 와 G 에 대한 정의는 다음과 같다.

$$F(a, b, c) = b \exp\left(-\frac{a}{b}\right) - c \exp\left(-\frac{a}{c}\right) \quad (5)$$

$$G(a, b, c, d) = a \left[\Gamma\left(d, \frac{a}{b}\right) - \Gamma\left(d, \frac{a}{c}\right) \right] \quad (6)$$

그리고 검파 확률 $P_{D,i}$ 은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다^[11].

$$P_{D,i} = \begin{cases} \frac{\rho}{\rho^2 - 1} & N_s = 1 \\ \times \left[F\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o}, (\rho + N_s \tilde{\gamma}), \frac{(1 + N_s \rho \tilde{\gamma})}{\rho}\right) \right. \\ \left. - G\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o}, (\rho + N_s \tilde{\gamma}), \frac{(1 + N_s \rho \tilde{\gamma})}{\rho}, 0\right) \right] \\ \frac{\lambda_{i1} \rho}{N_o(\rho^2 - 1)} \left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o N_s \tilde{\gamma}}\right)^{N_s - 1} & N_s \geq 2 \\ U\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o(\rho + N_s \tilde{\gamma})}, \frac{\lambda_{i1} \rho}{N_o(1 + N_s \rho \tilde{\gamma})}, N_s + 1\right) \\ - \frac{\rho}{N_o(\rho^2 - 1)} \sum_{m=0}^{N_s - 2} \sum_{l=0}^{N_s - m - 2} \sum_{n=0}^m \\ \left[\frac{N_s - m - 2 C_l \lambda_{i1}^{l+2}}{\Gamma(n+1) (N_o N_s \tilde{\gamma})^{l+1}} \right. \\ \left. U\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o \rho}, \frac{\lambda_{i1} \rho}{N_o}, l + 3 - n\right) \right] \end{cases} \quad (7)$$

위 식에서 $\tilde{\gamma}$ 는 $\frac{E_s}{N_s N_o}$ 이며, U 에 대한 정의는 다음과 같다.

$$U(a, b, c) = \left[a^{-\frac{c}{2}} \exp\left(-\frac{a}{2}\right) W_{-\frac{c}{2}, \frac{1-c}{2}}(a) \right. \\ \left. - b^{-\frac{c}{2}} \exp\left(-\frac{b}{2}\right) W_{-\frac{c}{2}, \frac{1-c}{2}}(b) \right] \quad (8)$$

위 식에서 $W, \dots(\cdot)$ 함수는 Whittaker 함수^[12]를 가리킨다.

현재 융합 센터에서 사용하는 융합 규칙으로 K out of M 방식을 전제로 하였다. 여러 가지의 K 값을 고려할 수 있지만, 우선 사용자에 대한 간섭을 최소화한다는 것을 중요시하는 관점에서 $K=1$ 일 때를 흔히 고려하므로 본 논문에서도 $K=1$ 인 규칙, 즉 OR 규칙을 융합 센터가 사용하는 것으로 가정한다. OR 규칙을 전제로 하는 경우에 최종 검파 확률 P_D 와 최종 오경보 확

률 P_{FA} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{D,i}) \quad (9)$$

$$P_{FA} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{FA,i}) \quad (10)$$

이미 앞에서 2차 사용자는 동일한 검파 임계값을 사용하는 것으로 가정하였다. 따라서 2차 사용자들은 동일한 오경보 확률과 검파 확률을 갖는다. 그러므로 i 번째 2차 사용자에 대한 $P_{D,i}$ 와 $P_{FA,i}$ 는 융합 이후 최종 검파 확률 P_D 그리고 최종 오경보 확률 P_{FA} 과 다음의 관계를 만족한다고 할 수 있다.

$$P_{D,i} = 1 - \sqrt[M]{1 - P_D} \quad (11)$$

$$P_{FA,i} = 1 - \sqrt[M]{1 - P_{FA}} \quad (12)$$

IV. 수치 결과

III장에서 도출한 분석 결과를 토대로 잡음의 불확실성이 존재하는 상황에서 에너지 검파 기반 협력 스펙트럼 감지의 성능을 구해보고, 이 결과의 유효성을 검증하는 차원에서 시뮬레이션 결과를 함께 제시하고자 한다. 먼저 분석 환경을 설정하기 위하여 신호 대 잡음비의 평균값 $\tilde{\gamma} = 0$ dB, $P_{FA} = 10^{-1}$ 로 가정하였다.

그림 3과 그림 4는 본 논문에서 분석한 결과가 정확하다는 것으로 확인하기 위하여 수학적 분석 결과와 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 가능한 모든 경우를 고려하기 위하여 N_s 가 1인 경우와 1인 아닌 경우($N_s = 10$)로 구분하고, 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자의 수 M 도 1인 경우와 1보다 큰 경우($M = 20$)로 구분하여 결과를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 이론적 분석 결과와 시뮬레이션 결과가 일치함을 알 수 있고 이를 통해 본 논문의 분석 결과가 적절하다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 2차 사용자 수 M 에 따른 오경보 확률의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 2차 사용자 수 M 이 증가할수록 오경보 확률이

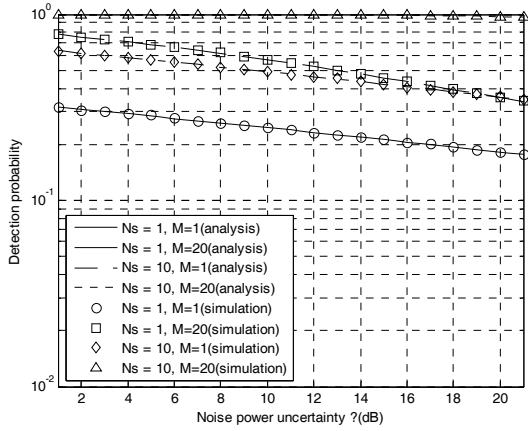


그림 3. 검파 확률에 대한 분석 결과와 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 3. Comparison of the analytic results with the simulation results in terms of detection probability.

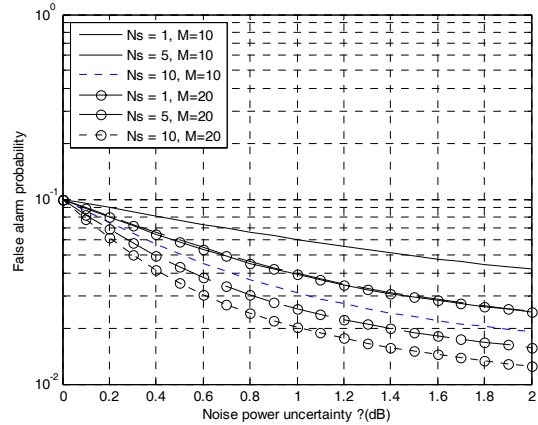


그림 5. 잡음 전력 불확실성이 오경보 확률에 미치는 영향
Fig. 5. Effects of noise power uncertainty on the false alarm performance.

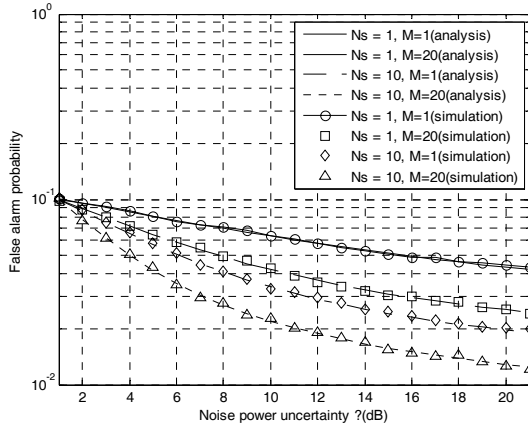


그림 4. 오경보 확률에 대한 분석적 결과와 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 4. Comparison of the analytic results with the simulation results in terms of false alarm probability.

개선됨을 확인할 수 있다. 그리고 일정한 M 에 대해서는 잡음 전력의 불확실성 ρ 가 클수록 오경보 확률이 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 ρ 가 클수록 2차 사용자가 판단을 유보하는 영역을 넓힘으로써 스펙트럼 감지 결정에 대한 신뢰성을 높이기 때문이다.

그림 6은 2차 사용자 수 M 에 따른 검파 확률의 변화를 보여주고 있다. 이번에는 잡음 전력의 불확실성 ρ 가 커질수록 검파 확률이 감소함을 확인할 수 있다. 하지만 2차 사용자 수 M 이 증가하면 검파 성능도 향상됨을 확인할 수 있다. 최종 오경보 확률이 주어져 있는

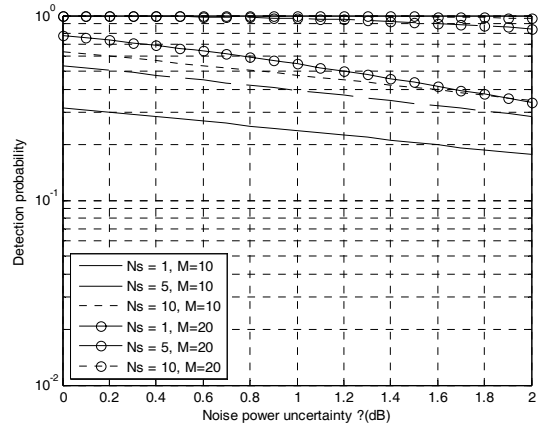


그림 6. 잡음 전력 불확실성이 검파 확률에 미치는 영향
Fig. 6. Effects of noise power uncertainty on the detection performance.

경우에 M 이 커지면 2차 사용자 각각이 달성해야 하는 오경보 확률 $P_{FA,i}$ 는 낮아지게 마련인데, 이는 검파 임계값의 상승을 의미하여 $P_{D,i}$ 를 감소시키지만 이로 인한 최종 검파 확률의 감소보다는 M 의 증가로 인한 최종 검파 확률의 상승이 더 크기 때문에 결과적으로 M 이 증가할 때 최종 검파 확률은 높아진다.

IV. 결 론

본 논문에서는 잡음 전력에 대한 불확실성이 존재하는 환경에서 두 개의 임계값을 사용하는 에너지 검파

기반 협력 스펙트럼 감지 방식이 페이딩 채널 환경에서 어느 정도의 감지 성능을 보이는 지에 대한 정량적 분석 결과를 제시하였다. 분석을 통하여 잡음 전력에 대한 불확실성이 존재하는 환경에서 위의 스펙트럼 감지 방식이 오경보 확률 조건을 충족하는 것을 확인할 수 있었으며, 협력 과정에 참여하는 2차 사용자 수가 증가함에 따라 오경보 확률 및 검파 성능이 향상됨을 할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] G. Staple and K. Werbach, "The End of Spectrum Scarcity", *IEEE Spectrum*, vol. 41, no. 3, pp. 48-52, 2004.

[2] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.

[3] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Comms. Surveys*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130. 2009.

[4] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. Brodersen, "Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection," *Proc. IEEE Military Commun. Conf.*, pp.1-7, Oct. 2006.

[5] C. Sun, W. Zhang, and K. B. Letaief, "Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints," *Proc. IEEE Wireless Commun. and Networking Conf.*, pp. 1-5, Mar. 2007.

[6] R. Tandra and A. Saha, "SNR Walls for Signal Detection," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 2, no. 1, pp. 4-17, 2008.

[7] K. Hamdi, X. N. Zeng, A. Ghrayyeb, and K. B. Letaief, "Impact of noise power uncertainty on cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems," *IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1 - 5, 2010.

[8] G. Wei, L. Wang, D. Zhang, and S. Zhang, "The effect of noise uncertainty to the performance of energy detection in cooperative detection," *IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology*, pp. 614 - 618, 2010.

[9] Shent, B, L, Huang, C. Zhao, Z. Zhou, K. Kwak, "Energy Detection Based Spectrum Sensing for Cognitive Radios in Noise of Uncertain Power," *International Symposium on Communications*

and Information Technologies, pp. 628-633, 2008.

[10] D. Chen, J. Li, and J. Ma, "Cooperative spectrum sensing under noise uncertainty in cognitive radio," *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp. 12-14 Oct. 2008.

[11] C. H. Lim, "Effects of Noise Power Uncertainty on Energy Detection for Spectrum Sensing," *Journal of the IEEK, Telecommunications*, vol. 48, no 11, pp. 22-27, 2011.

[12] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzik, *Table of Integral, Series, and Products*, Academic Press, 1965.

— 저 자 소 개 —



임 창 현(평생회원)-교신저자
 1986년 서울대학교 전자공학과 학사
 1988년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 1993년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 1994년~현재 부경대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : 무선 통신, 레이더 신호처리>