

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

Performance Analysis of an Energy Detection Based Cooperative Spectrum Sensing with a Single Threshold in the Presence of Noise Uncertainty

임 창 현

Chang Heon Lim

요 약

에너지 검파 기반 스펙트럼 감지 방식은 잡음 전력에 대한 불확실성에 취약한 것으로 알려져 있다. 이러한 문제점을 해결하기 방안 중의 하나로 협력 스펙트럼 감지 기술을 함께 사용하는 방안이 제안된 바 있다. 그러나 아직까지 페이딩 채널 환경에서 이 방식에 대한 성능 분석이 발표된 바가 없다. 본 논문에서는 에너지 검파 기반 스펙트럼 감지 방식에 대한 이전 연구 결과를 토대로 에너지 검파 기반 협력 스펙트럼 감지 방식에 대한 수학적 분석 결과를 제시하고자 한다. 분석 결과에 따르면 잡음 전력에 대한 불확실성이 존재할 때는 스펙트럼 감지 시간이 늘어나거나 OR 융합 방식의 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자가 많아질수록 오경보 확률과 검파 확률이 높아진다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

An energy detection based spectrum sensing has been found to be vulnerable to the noise power uncertainty. A cooperative spectrum sensing with an energy detector has appeared as one of the solutions to alleviate this difficulty. However, its performance analysis in a fading environment has not been reported yet in the literature. Motivated by this, this paper presents the 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. The analysis shows that the false alarm probability and detection probability gets higher as the sensing time and/or the number of the secondary users in the OR based cooperative spectrum sensing scheme increase when the noise power uncertainty exists.

Key words : Cognitive Radio, Cooperative Spectrum Sensing, Energy Detection, Noise Uncertainty, Decision Fusion

I. 서 론

인지 무선(cognitive radio)^[1] 시스템은 우선 사용자(primary user)가 사용하지 않는 대역을 찾아 활용하

는 시스템으로서, 스펙트럼 이용 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있는 방안 중의 하나이다. 인지 무선 시스템이 사용하는 스펙트럼 감지 방식^[2]으로는 정합 필터(matched filter)를 사용한 방법과 에너지 검파

부경대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pukyong National University)

· Manuscript received November 5, 2012 ; Revised November 27, 2012 ; Accepted December 3, 2012. (ID No. 20121105-123)

· Corresponding Author : Chang Heon Lim (e-mail : chlim@pknu.ac.kr)

(energy detection)를 사용한 방식 그리고 특징 추출(feature extraction)을 이용한 방식으로 분류할 수 있다. 이 중에서 에너지 검파 방식은 구현이 간단하고 우선 사용자의 신호에 대한 구체적인 정보를 필요로 하지 않는다는 장점이 있어 최근 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

무선 환경에서 스펙트럼 감지를 수행할 때 겪게 되는 어려움 중의 하나는 페이딩 현상이다. 페이딩으로 인해 우선 사용자로부터의 수신 신호 세기가 약해지면 우선 사용자의 활동 여부를 제대로 탐지할 수 없게 된다. 이를 해결하기 위한 방안 중의 하나로 협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing)^[3] 방안이 있다. 이는 공간적으로 산재해 있는 2차 사용자의 스펙트럼 감지 결과를 종합하여 우선 사용자의 출현 여부를 판단하는 방식이다. 이 방식은 세부적으로 다양한 형태가 있지만, 가장 일반적인 형태는 2차 사용자 차원에서 우선 사용자로부터 수신한 신호의 에너지를 측정하거나 그를 토대로 우선 사용자의 출현 여부를 판단한 결과를 융합 센터에 보내고, 융합 센터는 이를 종합하여 최종 판단을 하는 방식이다. 전자의 경우를 연판정 합성(soft decision combining)이라고 하고, 후자의 경우를 경판정 합성(hard decision combining)이라고 한다. 연판정 합성의 경우에는 융합 센터에 전달해야 하는 데이터 양이 많기 때문에 구현 측면에서 불리하다.

참고문헌 [4]에서 이미 지적한 바와 같이 잡음 전력에 대한 불확실성이 존재하면 그로 인해 에너지 검파 기반의 스펙트럼 감지 방식의 성능이 떨어진다 고 알려져 있다. 이와 관련하여 단일 임계값을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식에 대한 성능 열화 정도를 정량적으로 분석하는 시도^{[5]-[7]}들이 발표된 바 있다. 그러나 참고문헌 [5], [6]의 연구는 연판정 합성에 대한 연구 결과이고, 참고문헌 [7]의 연구는 경판정 합성을 사용하지만 페이딩을 고려하지 않았다. 이에 본 논문에서는 이전 연구 결과^[8]를 토대로 잡음 전력에 대한 불확실성이 존재하는 환경에서 경판정 합성에 근거한 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 열화를 정량적으로 분석한 결과를 제시하고자 한다.

본 논문은 1장 서론에 이어 2장에서 단일 임계값을 사용하는 시스템의 구조를 기술하고, 3장에서는 분석 과정을 설명하며, 4장에서 분석 결과를 제시하

고, 최종적으로 5장에서 결론을 제시하는 것으로 구성하였다.

II. 시스템 구성

논문에서 고려하고 있는 협력 스펙트럼 감지 시스템은 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 사용하는 것으로 설정한다.

우선 사용자가 활동하는 경우를 가설 H_1 으로 하고, 그렇지 않은 경우를 가설 H_0 로 표기하기로 한다면, 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자 중에서 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. 잡음 전력 밀도의 수준은 온도나 수신 시스템의 하드웨어 특성 등에 따라 달라질 수 있다. 그리고 α 는 우선 사용자 송신기와 i 번째 2차 사용자 단말기 사이에 존재하는 전송 채널의 이득을 가리킨다. 본 논문에서는 이 채널을 레일리(Rayleigh) 채널이라고 가정하며, 서로 다른 2차 사용자에 대해서는 서로 통계적으로 독립인 것으로 가정한다.

본 논문에서는 $w_i(t)$ 의 전력 수준을 2차 사용자가 추정한 후, 이것을 토대로 검파 임계값을 설정하는 것으로 한다. 이때 추정값이 $N_0/2$ 이라면 잡음 전력의 불확실성을 나타내는 값 ρ 에 따라 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 우선 사용자의 활동 여부를 판정하는데, 이때 i 번째 2차 사용자가 우선 사용자의 활동 여부를 판정에 사용할 시

험 통계량 X_i 는 다음과 같이 수신 신호 $r_i(t)$ 의 에너지를 사용하는 것으로 설정한다.

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

III. 성능 분석

저자는 이전 연구^[8]를 통해 잡음 전력의 불확실성이 존재하는 경우에 단일 임계값을 사용하는 에너지 검파 스펙트럼 감지기의 성능을 분석한 바가 있다. 본 논문에서 이를 토대로 II장에서 기술한 협력 스펙트럼 감지 성능을 오경보 확률과 검파 확률이라는 두 가지 척도에서 분석하고자 한다.

참고문헌 [8]의 분석에 따르면 잡음 전력을 정확하게 아는 경우, 오경보 확률 $P_{FA|N}$ 과 검파 확률 $P_{D|N}$ 은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

$$P_{D|N} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\lambda}{(1+N_s\tilde{\gamma})N}\right) & N_s = 1 \\ \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{1+N_s\tilde{\gamma}}\right)^{N_s-1}} & N_s \geq 2 \\ \times \exp\left(-\frac{\lambda}{(1+N_s\tilde{\gamma})N}\right) \\ - \frac{1}{N_s\tilde{\gamma}} \sum_{m=0}^{N_s-2} \left(1 + \frac{1}{N_s\tilde{\gamma}}\right)^{N_s-m-2} \\ \times \sum_{n=0}^m \frac{\lambda^n \exp\left(-\frac{\lambda}{N}\right)}{N^n \Gamma(n+1)} \end{cases} \quad (4)$$

위 식에서 λ 는 검파 임계값을 의미하고, N_s 는 수신 신호 측정 시간 T 와 수신 신호 대역폭 W 의 곱을 나타내는 것으로 수신 신호의 inphase 성분과 quadrature 성분을 나이퀴스트 속도로 샘플링한다고 할 때, 측정 시간 동안 얻을 수 있는 샘플 개수를 의미한다. 그리고 N 은 이미 알려진 단방향 잡음 전력 밀도를 가리키며 $\tilde{\gamma}$ 는 평균 신호 대 잡음 전력비로 E_s/N 로 정의한다. N 을 정확하게 알고 있는 경우라

면, 목표로 하는 오경보 확률로부터 검파 임계값 λ 를 식 (3)을 이용하여 결정할 수 있다.

본 논문에서는 편의상 2차 사용자가 사용하는 임계값이 모두 동일하다고 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^[8].

$$P_{FA,i} = E[P_{FA|N}] = \begin{cases} \frac{\rho}{\rho^2-1} \left[F\left(\frac{\lambda_i}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}\right) - G\left(\frac{\lambda_i}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}, 0\right) \right] & N_s = 1 \\ \frac{\rho}{\rho^2-1} \left[F\left(\frac{\lambda_i}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}\right) - G\left(\frac{\lambda_i}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}, 0\right) \right] + \sum_{m=1}^{N_s-1} \frac{G\left(\frac{\lambda_i}{N_o}, \rho, \frac{1}{\rho}, m-1\right)}{\Gamma(m+1)} & N_s \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

위 식에서 λ_i 는 i 번째 2차 사용자가 사용하는 검파 임계값을 의미하고, F 와 G 에 대한 정의는 다음과 같다.

$$F(a, b, c) = b \exp\left(-\frac{a}{b}\right) - c \exp\left(-\frac{a}{c}\right) \quad (6)$$

$$G(a, b, c, d) = a \left[\Gamma\left(d, \frac{a}{b}\right) - \Gamma\left(d, \frac{a}{c}\right) \right] \quad (7)$$

한편, i 번째 2차 사용자의 스펙트럼 감지에 대한 검파 확률 $P_{D,i}$ 은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다^[8].

$$P_{D,i} = E[P_{D|N}] = \begin{cases} \frac{\rho}{\rho^2-1} & N_s = 1 \\ \times \left[F\left(\frac{\lambda_i}{N_o}, (\rho + N_s\tilde{\gamma}), \frac{(1+N_s\rho\tilde{\gamma})}{\rho}\right) - G\left(\frac{\lambda_i}{N_o}, (\rho + N_s\tilde{\gamma}), \frac{(1+N_s\rho\tilde{\gamma})}{\rho}, 0\right) \right] & N_s \geq 2 \\ \frac{\lambda_{i1}\rho}{N_o(\rho^2-1)} \left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o N_s \tilde{\gamma}} \right)^{N_s-1} & N_s \geq 2 \\ U\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o(\rho + N_s\tilde{\gamma})}, \frac{\lambda_{i1}\rho}{N_o(1+N_s\rho\tilde{\gamma})}, N_s + 1\right) \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{aligned} & -\frac{\rho}{N_o(\rho^2-1)} \sum_{m=0}^{N_s-2} \sum_{l=0}^{N_s-m-2} \sum_{n=0}^m \\ & \left[\frac{N_s-m-2 C_l \lambda_{il}^{l+2}}{\Gamma(n+1)(N_o N_s \tilde{\gamma})^{l+1}} \right. \\ & \left. U\left(\frac{\lambda_{i1}}{N_o \rho}, \frac{\lambda_{i1} \rho}{N_o}, l+3-n\right) \right] \end{aligned} \right. \quad (8)$$

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

$$U(a, b, c) = \left[a^{-\frac{c}{2}} \exp\left(-\frac{a}{2}\right) W_{-\frac{c}{2}, \frac{1-c}{2}}(a) - b^{-\frac{c}{2}} \exp\left(-\frac{b}{2}\right) W_{-\frac{c}{2}, \frac{1-c}{2}}(b) \right] \quad (9)$$

위 식에서 $W_{\cdot, \cdot}(\cdot)$ 함수는 Whittaker 함수^[10]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 우선적으로 고려하는 관점에서 $K=1$ 일 때를 많이 다루기 때문에 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 확률 P_{FA} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

$$P_{FA} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{FA,i}) \quad (11)$$

이미 앞에서 언급한 바와 같이 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 확률과 최종 오경보 확률인 P_D , P_{FA} 와 다음과 같은 관계를 갖는다고 할 수 있다.

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

$$P_{FA,i} = 1 - \sqrt[M]{1 - P_{FA}} \quad (13)$$

IV. 수치 결과

III장에서 도출한 분석 결과를 토대로 잡음의 불확실성이 존재하는 상황에서 에너지 검파 기반 협력 스펙트럼 감지의 성능을 구해보고자 한다, 먼저 분석 환경을 설정하기 위하여 신호 대 잡음비의 평균값 $\tilde{\gamma}=0$ dB로 가정하였다.

먼저 그림 1과 그림 2는 목표로 하는 오경보 확률 $P_{FA}=10^{-1}$ 로 설정했을 때 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능을 나타낸 것이다. 그림 1은 잡음 전력의 불확실성과 2차 사용자 수 M 에 따른 오경보 확률의 변화를 보여주고 있다. N_s 는 에너지 계산에 사용되는 수신 샘플 개수를 나타내는 것이기 때문에, N_s 가 커진다는 것은 그만큼 에너지 계산에 사용되는 수신 샘플의 개수가 늘어난다는 것을 의미하며, 이때 잡음 전력의 불확실성을 표현하는 ρ 가 클수록 그만큼 수신 에너지 추정값도 늘어나기 때문에 오경보 확률이 높아지는 것을 예상할 수 있는데, 이를 그림 1에서 확인할 수 있다. 또한 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에 개별 2차 사용자 차원에서 오경보 확률이 증가하면 2차 사용자 수 M 이 증가할수록 오경보 확률이 상승하게 되는데, 이 또한 그림 1에서 확인할 수 있다.

그림 2는 잡음 전력의 불확실성과 2차 사용자 수

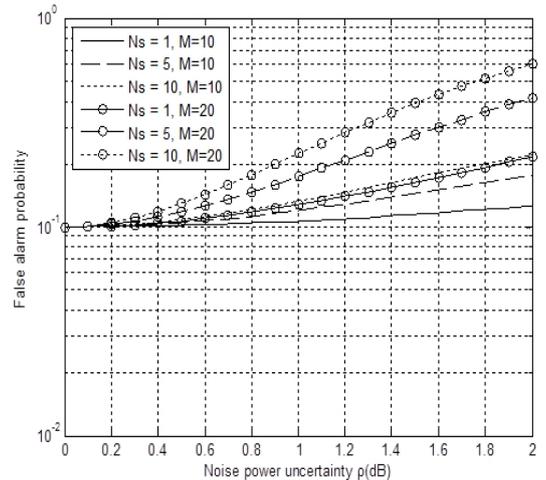


그림 1. 잡음 전력의 불확실성이 오경보 확률에 미치는 영향

Fig. 1. Effects of noise power uncertainty on the false alarm performance.

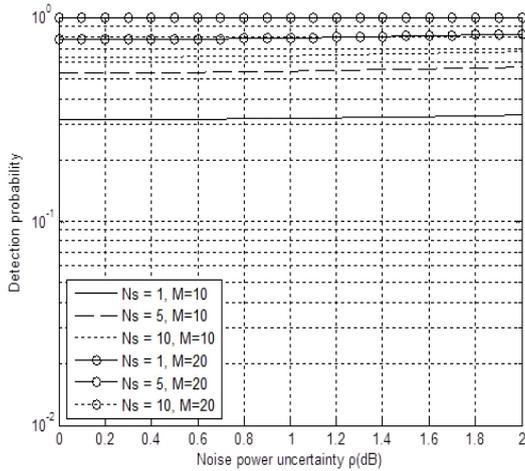


그림 2. 잡음 전력의 불확실성이 검파 확률에 미치는 영향

Fig. 2. Effects of noise power uncertainty on the detection performance.

M 에 따른 검파 확률의 변화를 보여주고 있다. 이 경우에도 2차 사용자 수 M 이 증가하면 검파 성능도 향상됨을 확인할 수 있다. 그림에서 잡음 전력의 불확실성 ρ 가 커질수록 검파 확률이 미세하게 증가함을 알 수 있는데, 이는 현재 설정한 오경보 확률에 대해서는 검파 임계값이 다소 낮아 잡음 전력의 불확실성에 의한 영향이 상대적으로 작기 때문이다.

그림 3과 그림 4는 목표로 하는 오경보 확률 P_{FA}

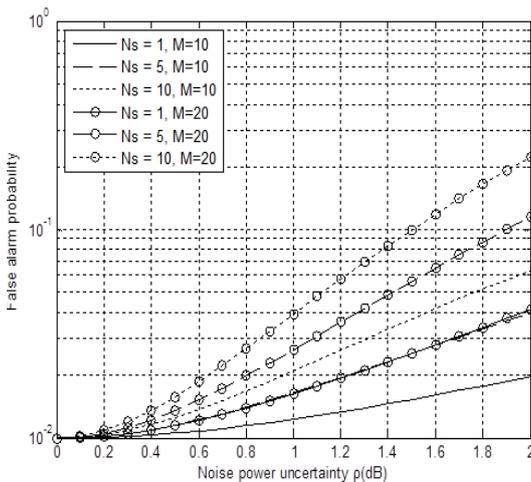


그림 3. 잡음 전력의 불확실성이 오경보 확률에 미치는 영향

Fig. 3. Effects of noise power uncertainty on the false alarm performance.

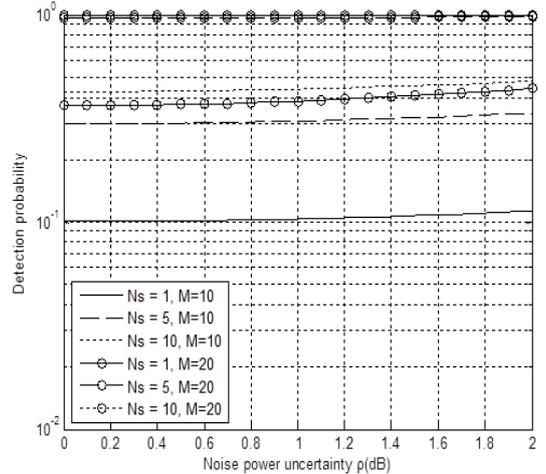


그림 4. 잡음 전력의 불확실성이 검파 확률에 미치는 영향

Fig. 4. Effects of noise power uncertainty on the detection performance.

$=10^{-2}$ 로 설정했을 때 주어진 협력 스펙트럼 감지 시스템의 성능을 보여주는 것으로 잡음 전력 불확실성에 대해서는 이전 결과와 비슷한 행태를 보이고 있다. 다만 당초 목표로 설정한 오경보 확률이 그림 1과 그림 2의 경우에 비해 낮게 설정되어 있기 때문에 잡음 전력의 불확실성을 감안한 오경보 확률 및 검파 확률 또한 상대적으로 낮은 수준을 유지한다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 잡음 전력에 대한 불확실성이 존재하는 환경에서 단일 임계값을 사용하는 에너지 검파 기반 협력 스펙트럼 감지 방식이 페이딩 채널 환경에서 어느 정도의 감지 성능을 보이는 지에 대한 닫힌 형태(closed form)의 수학적 분석 결과를 제시하였다. 분석 결과에 의하면 잡음 전력에 대한 불확실성이 존재할 때는 스펙트럼 감지 시간이 늘어나거나, OR 융합 방식의 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자가 많아질수록 오경보 확률과 검파 확률이 높아진다는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 연구 결과는 잡음 전력에 대한 불확실성을 고려하여 에너지 검파 기반 협력 스펙트럼 감지 방식을 설계하는데 있어 매우 유용한 자료가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Mitola, G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal", *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [2] T. Yucek, H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications", *IEEE Comms. Surveys*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.
- [3] 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.
- [4] R. Tandra, A. Sahai, "SNR walls for signal detection", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 2, no. 1, pp. 4-17, 2008.
- [5] K. Hamdi, X. N. Zeng, A. Ghrayeb, 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.
- [6] 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.
- [7] B. Shent, L. Huang, C. Zhao, Z. Zhou, and 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.
- [8] C. H. Lim, "Effects of noise power uncertainty on energy detection for spectrum sensing", *Journal of the IEK, Telecommunications*, vol. 48, no. 11, pp. 22-27, 2011.
- [9] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals", *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-531, 1967.
- [10] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzik, *Table of Integral, Series, and Products*, Academic Press, 1965.

임 창 현



1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1993년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1994년 3월~현재: 부경대학교 전

자공학과 교수

[주 관심분야] 무선 통신, 레이더 신호 처리