한국ITS학회논문지
제12권, 제1호 (2013년 2월)
pp. 88~97

크로스 엔트로피 기반 스펙트럼 센싱에서 채널 점유 시간 변화에 따른 히스토그램 Bin 개수 선택 기법

Histogram Bin Number Selection Method Robust to the Variations of Channel Occupancy for Cross Entropy

용 슬 바 로* (Seulbaro Yong) **장 성 진**** (Sung-Jeen Jang) **김 재 명***** (Jae-Moung Kim)

요 약

기존에 제안된 대부분의 스펙트럼 센싱 기법은 해당 시간에 센싱 된 우선사용자의 신호만을 다루고 있다. 하지만 해당 시간 이전의 우선사용자의 상태를 이용하게 되면 조건부 확률을 사용하여 검출기의 신뢰성을 증가시킬 수 있다. 따라서 크로스 엔트로피(Cross Entropy) 기반의 스펙트럼 센싱 기법에서는 해당 시간 이전의 우선사용자의 상태도 함께 이용하는 기법을 제안하였으며 이를 통해 우선사용자 신호 검출 성능을 향상시키고 잡음에 강인한 성능을 갖도록 하였다. 그러나 이러한 크로스 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기법은 모두 실제 이상적인 센싱 환경만을 고려하였다. 다시 말해, 우선사용자의 채널 점유 시간이 항상 일정하다고 가정한 상태에서 센싱을 수행하였다. 하지만 실제 상황에서는 우선사용자가 채널을 점유하는 시간이 이상적인 상황보다 길어질 수도, 반대로 짧아질 수도 있으며 이로 인해 스펙트럼 센싱 성능이 변화 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 실제 상황에서도 센싱 성능을 일정하게 유지할 수 있는 기법을 제안하였으며 이를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

Abstract

Most of the traditional spectrum sensing methods consider only the current detected data sets of Primary User (PU). However previous state of PU is a kind of conditional probability that strengthens the reliability of the detector. Therefore, in the cross entropy spectrum sensing method, relationship of the previous and current spectrum sensing is considered to detect PU signal more effectively. But these cross entropy spectrum sensing methods only consider the ideal system. In other words, PU always occupy the channel during the same period. However, PU can occupy the channel either for a longer or a shorter period than the ideal case in the real system. For this reason, the spectrum sensing performance can be varied. In this paper, we propose the method that can maintain the performance of spectrum sensing in the real system and we confirm the results with the help of simulation.

Key words : Cognitive Radio, Spectrum Sensing, Cross Entropy, Entropy, Histogram

* 주저자 : 인하대학교 정보통신공학과 석사과정
** 공저자 : 인하대학교 정보통신공학과 박사과정
*** 교신저자 : 인하대학교 정보통신공학부 교수
† 논문접수일 : 2012년 6월 5일
† 논문수정일 : 2013년 1월 18일
† 게재확정일 : 2013년 1월 25일

Ⅰ. 서 론

현재 정보통신 기술 발달 및 스마트폰의 보급으로 무선서비스의 수요가 급증하고 있다. 하지만 무선 스펙트럼은 제한된 자원으로써 증가하는 스펙트럼 수요를 충족시키지 못하고 있으며 특히, 3GHz 이하의 주파수 대역은 이미 포화상태에 이르렀다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 기술이 무선 인지(Cognitive Radio : CR) 시스템이다. 인지무선 시스템은 주파수를 할당받은 우선사용자(Primary User : PU)가 해당 주파수를 사용하지 않을 경우, 부사용자(Secondary User : SU)가 우선 사용자에게 어떠한 간섭도 주지 않고 해당 주파수를 사용하는 기술로써 제한된 주파수 자원을 효율적으로 활용하기 위해 제안된 기술이다[1]. 이러한 인지무선 시스템을 이용하게 되면 현재 주파수 부족 현상이 심한 이동 통신, 무선 통신, 센서 네트워크 및 교통 시스템 등에서의 주파수 부족 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다.

이 인지무선 시스템은 일반적으로 세 가지 기본 요소로 구성된다. 첫째는 주변 환경을 인지하여 정보를 수집하는 스펙트럼 센싱, 둘째는 정보수집 후 정보를 처리하여 지능적인 판단을 내리는 Cognitive Engine, 셋째는 Cognitive Engine의 판단에 의해 통신전송장치(MODEM)의 동작 변수를 조정(Reconfiguration)을 가능하게 하는 MAC/PHY로 구성된다.

본 논문에서는 이러한 인지무선 시스템의 기본 요소들 중 하나인 스펙트럼 센싱에 대해 다루고자 한다. 스펙트럼 센싱은 에너지 검출 방식, 정합필터(matched filter) 방식, 싸이클로스테이셔너리(cyclostationary) 기반의 스펙트럼 센싱 방식 및 엔트로피(entropy) 기반의 스펙트럼 방식으로 크게 분류될 수 있다. 에너지 검출 방식은 우선사용자 신호의 에너지를 검출하는 방식으로 가장 단순하고 쉬운 방식이지만 잡음에 민감하다는 단점이 있다. 정합필터 방식은 우선사용자의 정보를 알고 있을 때 사용하는 방식으로 우선사용자의 정보가 정확하지 않으면 성능이 크게 약화될 수 있다. 싸이클로스테이셔너리 기반의 스펙트럼 센싱 방식은 주파수 영역에서 각 우선사용자의 구별되는 특성을 이용하여 검출하는 방식으로 잡음에 대해 비교적 강한 특성을 가지고 있다. 하지만 이 방식은 복잡도가 높고 센싱을 위해 많은 시간이 소요된다. 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 방식은 우선사용자의 엔트로피 레벨을 이용하는 방식이다[2-3].

위에 설명된 스펙트럼 센싱 방식들은 모두 해당 시간에 검출된 우선사용자의 신호만을 다루고 있다. 하지만 해당 시간 이전 상태의 우선사용자의 상태를 함께 사용하게 되면 조건부확률을 사용하여 검출기의 신뢰성을 증가시킬 수 있다. 따라서 크로스 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기법에서는 해당 시간과 이전 시간의 상태 정보를 모두 이용하여 우선사용자의 신호 검출 성능을 향상 시켰다.

참고문헌 [4]에서는 최초로 엔트로피 이론을 적용한 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기술을 제안하였다. 이렇게 제시된 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기술은 [5]에서 제안된 히스토그램 기법을 이용하였으며 이러한 방식들을 토대로 참고문헌 [6]에서는 주파수 영역에서의 스펙트럼 센싱을 통하여 성능 향상을 이루었으며 [7]에서는 위상정보를 통하여 스펙트럼 센싱의 성능 향상을 이루었다. 이 후에 [8]에서는 크로스 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기법을 제안함으로써 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기법보다 크로스 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기법이 더 좋은 성능을 나타냄을 시뮬레이션을 통하여 보여주었다. 마지막으로 참고문헌 [9]에서는 주파수 기반의 스펙트럼 센싱 기법을 통하여 시간영역에서의 스펙트럼 센싱 기법보다 더 좋은 성능을 나타냄을 보여주었다. 하지만 기존에 발표된 크로스 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기법에 관한 연구들은 모두 이상적인 센싱 환경만을 고려하였다. 다시 말해, 우선사용자가 해당 채널을 사용하는 시간이 일정하다고 가정한 상태에서 센싱을 수행하였다. 그렇지만 실제 상황에서는 우선사용자가 해당 채널을 사용하는 시간이 이상적인 상황에 비해 길수도 반대로 짧을 수도 있으며 이로 인해 센싱 성능 또한 변화 할 수 있다.

기존 논문에서는 스펙트럼 센싱 기술의 향상에

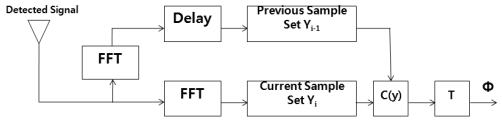
초점을 두어 이상적인 환경을 통하여 스펙트럼 센싱 기술의 성능을 확인하였다. 하지만 본 논문에서는 향상된 스펙트럼 센싱 기술을 시스템에 적용하기 위하여 실제적 환경을 제시하였다. 따라서 본 논문에서는 히스토그램의 Bin 개수를 상황에 따라 적절히 조절함으로써 실제 상황에서도 센싱 성능의 열화 없이 일정한 성능을 도출할 수 있는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 Ⅱ장에서는 시스템 모델에 대해 설명하고 Ⅲ장에서는 제안하는 알고리즘을 설명한다. Ⅳ장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 알고리즘의 성능을 확인하고 Ⅴ장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 모델

1. 크로스 엔트로피 기반의 주파수 영역에서의 스펙트럼 센싱 방법

다른 스펙트럼 센싱 기법들에서는 현재 상태에서의 우선사용자 센싱 데이터만이 필요한데 반에 본 논문에서 이용하는 크로스 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기법에는 이전 상태에서의 우선사용자 센싱 데이터도 추가적으로 필요하다. 이러한 크로스 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기법의 시스템 모델은 <그림 1>과 같다.



〈그림 1〉 주파수 영역 검출기 기반의 크로스 엔트로피 시스템 모델
〈Fig. 1〉 System model of cross entropy based frequency-domain detector

시간 영역에서 크로스 엔트로피 기반의 스펙트럼 센싱 기법은 기존에 연구된 엔트로피 기반의 센싱 기법과 동일하게 이전 상태에서 검출된 신호가 잡음인 경우 스펙트럼 센싱 성능이 감소한다. 따라서 본 논문에서는 FFT 기법을 이용하여 시간영역에서 수행되었던 센싱을 주파수 영역에서 수행하여 이전 상태에서 검출된 신호가 잡음인 경우에도 센싱 성능이 감소되지 않도록 하였다.

크로스 엔트로피 기반의 주파수 영역에서의 스펙트럼 센싱을 수행하기 위해서는 <그림 1>에서와 같이 과거 상태에서의 우선사용자 신호와 현재 상태에서의 우선사용자 신호, 두 경우의 확률 분포 값이 필요하며 이 확률 분포 값은 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)에서 q(•)는 이전 상태에서의 우선사용자의 확률 분포 값을 나타내며 p(•)는 현재 상태에서의 우선사용자의 확률 분포 값을 나타낸다. 시간영역의 데이터를 주파수 영역으로 변환 시켜주기 위해 FFT 기법이 사용되었다. 두 가지 경우의 샘플 데이터를 이용하여 C(y)에서 크로스 엔트로피 값을 계산 한 후 T에서 문턱 값과 비교하여 우선사용자의 유무를 판단한다[8-9].

$$H(p,q) = -\sum_{y} p(y)\log q(y) \tag{1}$$

식 (1)을 이용하면 다음과 같이 식 (2)를 유도 할 수 있다.

$$\begin{aligned} H(p,q) &= -\sum_{y} p(y)\log p(y)\frac{q(y)}{p(y)} \\ &= -\sum_{y} p(y)\log p(y) - \sum_{y} p(y)\log\frac{q(y)}{p(y)} \\ &= H(p) + D(p\|q) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $H(p)$는 엔트로피 값을 나타내며 $D(p\|q)$는 Kullback-Leibler divergence 값을 나타낸다. 여기서 Kullback-Leibler divergence 값은 두 확률분포의 정보 엔트로피 차이를 계산하여 준다.

이전 상태에서의 우선사용자가 idle일 때 현재 상태에서의 우선사용자가 idle인지 active 인지는 다음과 같이 구해진다.

(a) 우선사용자의 현재 상태가 idle인 경우에서 H_{ci}는 크로스 엔트로피의 값을 H_{ei}는 엔트로피의

값으로 정의하고 D_i는 Kullback-Leibler divergence 값으로 정의한다. 그러면 식 (2)에서의 크로스 엔트로피 값은 식 (3)과 같이 나타난다.

$$H_{cii} = H_{eii} + D_{ii} \tag{3}$$

식 (3)에서 우선사용자의 현재 상태가 idle일 경우 $D_{ii} \approx 0$이 된다. 따라서 $H_{cii} = H_{eii}$ 가 되어 우선사용자의 크로스 엔트로피 값이 엔트로피 값 즉, 잡음의 가우시안 분포와 같아진다. 따라서 우선사용자의 현재 상태는 idle이 된다.

(b) 우선사용자의 현재 상태가 idle인 경우에서 H_{ci} 는 크로스 엔트로피의 값을 H_{eia}는 엔트로피의 값으로 정의하고 D_i는 Kullback-Leibler divergence 값으로 정의한다. 그러면 식 (2)에서의 크로스 엔트로피 값은 식 (4)와 같이 나타난다.

$$H_{cia} = H_{eia} + D_{ia} \tag{4}$$

우선사용자의 현재 상태가 active일 경우 $D_{ia} > 0$ 이 된다. 따라서 크로스 엔트로피 값은 잡음 엔트로피 값 즉, 잡음에 신호 값이 더해진 값이 된다. 따라서 우선사용자의 현재 상태는 active이다.

우선사용자의 이전 상태가 active인 경우에서도 식 (3)과 (4)와 같은 방식으로 현재 상태의 우선사용자 유무를 판단할 수 있다.

(c) 우선사용자의 현재 상태가 active인 경우에서 H_{ca}는 크로스 엔트로피의 값을 H_{ea}는 엔트로피의 값으로 정의하고 D_a는 Kullback-Leibler divergence 값으로 정의한다. 그러면 식 (2)에서의 크로스 엔트로피 값은 식 (5)와 같이 나타난다.

$$H_{cai} = H_{eai} + D_{ai} \tag{5}$$

식 (5)에서와 같이 우선사용자의 현재 상태가 idle일 경우 $D_{ai} \approx 0$이 된다. 따라서 $H_{cai} = H_{eai}$ 가 되어 우선사용자의 크로스 엔트로피 값이 엔트로피 값 즉, 잡음의 가우시안 분포와 같아진다. 따라서 우선사용자의 현재 상태는 idle이 된다.

(d) 우선사용자의 현재 상태가 active인 경우에서 H_{caa}는 크로스 엔트로피의 값을 H_{eaa}는 엔트로피의 값으로 정의하고 D_{aa}는 Kullback-Leibler divergence 값으로 정의한다. 그러면 식 (2)에서의 크로스 엔트로피 값은 식 (6)과 같이 나타난다.

$$H_{caa} = H_{eaa} + D_{aa} \tag{6}$$

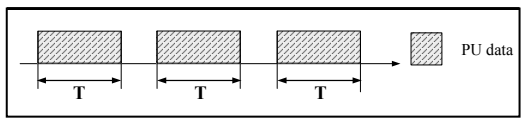
우선사용자의 현재 상태가 active일 경우 $D_{aa} > 0$ 이 된다. 따라서 크로스 엔트로피 값은 잡음 엔트로피 값 즉, 잡음에 신호 값이 더해진 값이 된다. 따라서 우선사용자의 현재 상태는 active이다.

따라서 (a), (b), (c), (d)의 내용을 요약하면 식 (7)과 같다.

$$c(y) = \begin{cases} H(p) - D(p\|q) & \text{현재 상태에서 } PU\text{가 } idle\text{인 경우} \\ H(p,q) & \text{현재 상태에서 } PU\text{가 } active\text{인 경우} \end{cases} \tag{7}$$

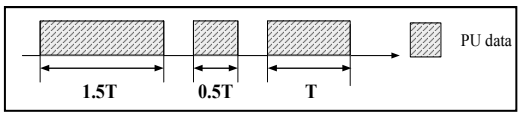
2. 우선사용자의 채널점유 시간에 따른 성능 차이

크로스 엔트로피 기반의 센싱 기법에 대하여 연구한 이전 논문들에서는 모두 이상적인 시스템을 가정하여 스펙트럼 센싱 성능을 검증하였다. 다시 말해 <그림 2>와 같이 우선사용자가 항상 일정한 T의 시간동안만 채널을 사용한다고 가정하였다. 하지만 IEEE 802.22에서 정의 된 무선 마이크와 같은 실제 시스템에서의 우선사용자는 이상적인 상황과는 달리 채널을 일정한 시간동안 지속적으로 쓰지



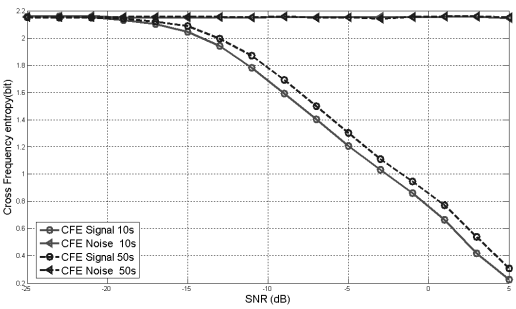
〈그림 2〉 이상적인 시스템에서 우선사용자의 스펙트럼 사용 현황

〈Fig 2〉 Spectrum using situation of PU in the ideal system



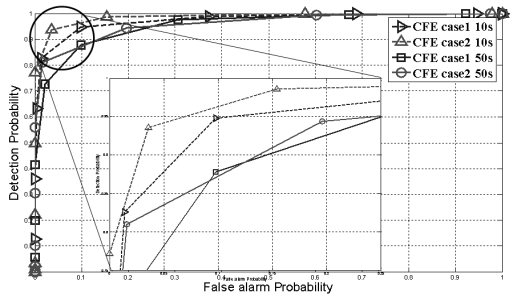
〈그림 3〉 실제 시스템에서 우선사용자의 스펙트럼 사용 현황
〈Fig 3〉 Spectrum using situation of PU in the real system

않는다. 즉, <그림 3>에서와 같이 채널을 T 시간보다 많이 사용할 수도 또는 T 시간보다 적게 사용할 수 있다. 이러한 채널 사용 시간 차이에 따라 센싱 성능이 달라진다. 다시 말해 신호에 포함된 정보의 양을 나타내는 샤논 엔트로피에서 정보의 양이 더 많아지게 되어 <그림 4>와 같이 채널 점유 시간이 증가함에 따라 엔트로피 값도 증가하게 된다. 이 때문에 잡음과 신호 간 엔트로피 값의 차이가 적어지게 되어 스펙트럼 센싱 성능의 열화가 발생한다. 반대로 채널 점유 시간이 적어지게 되면 잡음과 신호 간 엔트로피 값의 차이가 커지게 되어 스펙트럼 센싱 성능이 더 좋아지게 된다. <그림 5>와 <그림 6>의 그래프에서 우선사용자의 채널 점유 시간이 스펙트럼 센싱 성능에 영향을 미치게 됨을 볼 수 있다. <그림 4>에서 Noise 10s과 Signal 10s는 각각 우선사용자의 채널 점유시간이 10초일 경우 노이즈와 신호의 엔트로피 값을 나타내며 Noise 50s과 Signal 50s는 각각 우선사용자의 채널 점유시간이 50초일 경우의 노이즈와 신호의 엔트로피 값을 나타낸다. <그림 5>와 <그림 6>에서 CFE는 주파수 영역에서

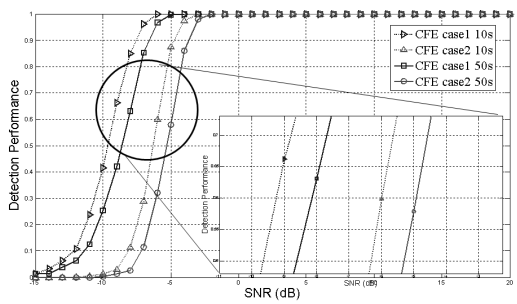


〈그림 4〉 잡음과 우선사용자 신호 간 엔트로피 값
〈Fig 4〉 Entropy value between noise and PU signal

의 크로스 엔트로피 스펙트럼 센싱 (cross entropy-based frequency-domail spectrum sensing)을 나타내며 CFE case1 10s와 CFE case1 50s는 각각 현재 상태에서 우선사용자의 채널점유시간이 10초, 50초인 경우에서 이전 상태가 idle인 경우의 주파수 영역에서 크로스 엔트로피 값을 나타내며 CFE case2 10s와 CFE case2 50s는 각각 현재 상태에서 우선사용자의 채널점유시간이 10초, 50초인 경우에서 이전 상태가 active인 경우의 주파수 영역에서 크로스 엔트로피 값을 나타낸다.



〈그림 5〉 실제 시스템 환경에서 우선사용자의 채널 사용 시간에 따른 ROC 곡선의 성능 비교
〈Fig 5〉 The comparison of ROC curves for variable time in the real system



〈그림 6〉 실제 시스템 환경에서 우선사용자의 채널 사용 시간에 따른 검출 성능 비교
〈Fig 6〉 The comparison of detection performance for variable time in the real system

<그림 5>에서는 ROC(Receiver Operation Characteristic) 커브를 통하여 스펙트럼 센싱 시간이 10초와 50초일 때의 검출 확률(Detection Probability)와 오경보 확률(False alarm Probability) 값을 비교하였으며

<그림 6>에서는 스펙트럼 센싱 시간이 10초와 50초 일 때의 SNR값에 따른 검출 확률 값인 검출 성능(Detection Performance)을 비교하여 나타내었다.

따라서 <그림 5>와 <그림 6>에서와 같이 크로스 엔트로피 기반 스펙트럼 센싱 기법은 시간이 10초에서 50초로 변함에 따라 스펙트럼 센싱의 성능이 변화하는 것을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 실제 인지무선 시스템을 가정하여 우선사용자가 채널을 이용하는 시간이 다른 상황에서도 스펙트럼 센싱 성능을 일정하게 유지할 수 있는 방법을 제안한다.

Ⅲ. 제안하는 스펙트럼 센싱 기법

1. Bin 개수 선택 알고리즘

엔트로피를 측정하는 방법으로는 히스토그램 기법, kernel PDF approximation, modified Vasicek's estimator 등이 사용되지만 참고문헌[12]에서는 현재 상태와 이전 상태에서의 확률을 구하기 위하여 비교적 복잡성이 낮은 <그림 7>과 같은 히스토그램 기법을 이용하였다. 히스토그램 기법은 [10]에서 보여준 성능의 신뢰성을 토대로 영상처리 기법 및 통신 등 다양한 분야에 걸쳐 이용되고 있으며 또한 엔트로피 기반 및 크로스 엔트로피 기반 스펙트럼 센싱 기법에도 다양하게 적용되고 있는 기법이다. 이러한 히스토그램 기법에서는 N개의 샘플들이 똑같은 간격을 가지는 L개의 샘플들로 나눠지며 경계값(boundaries)은 (lk, lk+1)로 모든 샘플들에 똑같이 적용된다. 여기서 (lk, lk+1)의 경계값을 갖는 각각의 샘플들을 Bin이라 부른다. 우리는 이 히스토그램 기법을 이용하여 확률 값을 계산한다. 이때 Bin의 개수와 Bin의 너비에 따라 계산의 정확도가 달라진다. 즉, Bin의 너비가 좁아져 Bin의 개수가 많아지게 되면 잘못된 장소에 샘플들이 위치할 수 있어 정확도가 낮아지게 되고 반대로 Bin의 너비가 넓어져 Bin의 개수가 너무 적어지게 되면 샘플들의 수가 부족해져 히스토그램 기법을 사용하는 의미가 없어지며 성능 또한 제대로 확인 할 수 없어진다.

따라서 본 논문에서는 상황에 따라 적절한 Bin의 개수를 선택하여 어떠한 상황에서도 최상의 센싱 성능을 유지하도록 하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 Bin 개수 선택 알고리즘은 우선사용자의 스펙트럼 사용 시간에 따라 Bin 개수를 적응적으로 선택하여 스펙트럼 센싱 성능의 저하를 막아준다. 제안하는 알고리즘에서 가장 먼저 주어진 범위에서 Bin 너비를 구하여 준다. 여기서 Bin 너비는 히스토그램에서 Bin 너비를 구하기 위해 주로 사용되는 Freedman and Diaconis 규칙[11]이나 Scott 규칙[10]에 의해 구해진다. Freedman and Diaconis 규칙은 식 (8)과 같다.

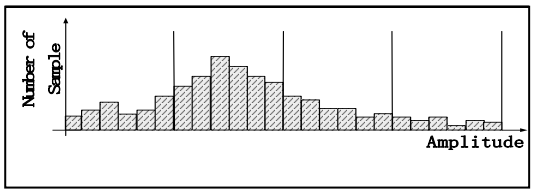
$$h = 2 \times IQR \times n^{-\frac{1}{3}} \tag{8}$$

식 (8)에서 IQR은 그림 7과 같은 히스토그램을 4개의 사분위면으로 나눈 곳에서 3사분위수와 1사분위수의 차이 즉, 전체자료의 중간에 위치한 50% 값들이 지니는 범위인 사분위범위를 나타낸다. 그리고 n은 주어진 샘플들의 관측(observation) 개수를 나타낸다.

Scott 규칙은 식 (9)과 같다.

$$h = 3.5 \times \sigma \times n^{-\frac{1}{3}} \tag{9}$$

식 (9)에서 σ는 주어진 샘플들의 표준편차를 나타내며 n은 Freedman and Diaconis 규칙에서와 마찬가지로 주어진 샘플들의 관측 개수를 나타낸다. Bin 너비를 결정하기위해 둘 중 어떠한 규칙을 사용해도 무관하다. 본 논문에서는 Freedman and Diaconis 규칙을 이용하여 Bin 너비를 구하였다.



〈그림 7〉 히스토그램
〈Fig 7〉 Histogram

위와 같은 방식을 이용하여 Bin의 너비를 구하고 식 (10)과 같은 방식을 이용하여 Bin 개수를 구한다.

$$Bin\ Number = \frac{length\ of\ range}{h} \quad (10)$$

식 (10)에서 length of range는 <그림 7>의 히스토그램에서의 Amplitude 범위를 나타내며 h는 Freedman and Diaconis 규칙 또는 Scott 규칙으로 구해진 Bin 너비를 나타낸다.

히스토그램에서 각 Bin들의 크기는 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$height(bin_m) = \frac{no.\ of\ objects\ In\ bin_m}{N \times (h_1 \times h_2 \times \bullet\ \bullet\ \bullet\ h_m)} \quad (11)$$

식 (11)에서 height는 각 Bin들의 크기 즉, <그림 7>에서 각 Bin들의 Number of data값을 나타내며 m은 각 Bin들의 인덱스를 나타낸다. 따라서 height(bin1)은 첫 번째 Bin의 number of data 값을 나타낸다. number of objects in bin은 각 Bin에서의 관측된 데이터 개수를 N은 총 데이터 개수를 나타내며 h_m은 각 Bin들의 너비를 나타낸다.

위와 같은 방식을 이용하면 우선사용자의 채널 사용시간에 맞는 적절한 Bin의 개수를 선택하여 주어 우선사용자의 채널 점유 시간이 변화하여도 스펙트럼 센싱의 성능이 일정하도록 유지하여 줄 수 있다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

1. 시뮬레이션 환경

본 논문에서의 시뮬레이션 환경은 참고문헌[9]와 동일하게 적용하였다. 단측파대(single side band) 신호가 AWGN과 합쳐져 있는 형태의 신호를 사용하였으며 이전 상태의 우선사용자가 idle인지 active인지에 따라 센싱 성능에 차이가 있으므로 두 가지 경우로 나누어 스펙트럼 센싱 성능을 평가하였다. 두 가지 경우 중 하나인 case1은 이전 상태의 우선사용자가 idle인 경우이며 case2는 이전 상태의 우선사용자가 active인 경우이다. 또한 ROC 커브를 이용하여 AWGN에서와 레일리 페이딩 채널에서의 성능을 확인하였다.

본 논문에서 사용한 구체적인 파라미터는 <표 1>에 나타내었다. <표 1>에서와 같이 신호의 대역폭은 12kHz이며 캐리어 주파수는 40kHz, 샘플링 주파수는 100kHz로 설정하였다. 또한 FFT의 사이즈는 128로 샘플의 크기는 5000으로 잡음의 전력은 -90dBm으로 설정하였으며 sensing threshold 값은 constant로 가정하여 시뮬레이션을 하였다.

〈표 1〉 시뮬레이션 파라미터
〈Table 1〉 Simulation parameter

Parameter	Value
Bandwidth, Bw	12 kHz
Carrier frequency, fc	40 kHz
sampling frequency, fs	100 kHz
FFT size	128
sample size	5000
nominal noise power	-90 dBm

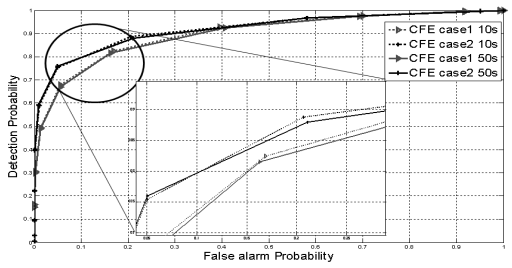
2. 시뮬레이션 결과

1) 가우시안 채널

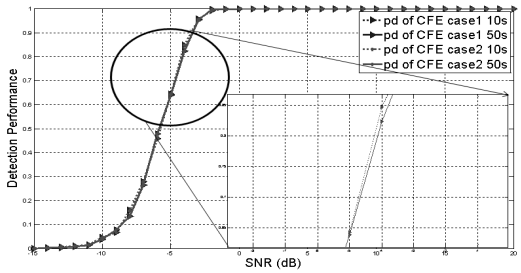
본 장에서는 가우시안 채널에서의 성능을 확인하였다. <그림 8>과 <그림 9>에서는 가우시안 채널에서의 ROC 곡선과 SNR에 따른 검출 성능을 통하여 우선사용자의 채널 점유 시간에 따른 스펙트럼 센싱 성능을 비교하였다. 그림에서 10s는 우선사용자의 채널 점유 시간이 10초임을 나타내며 50s는 우선사용자의 채널 점유 시간이 50초임을 나타낸다. 가우시안 채널에서는 <그림 5>와 <그림 6>과 비교하여 <그림 8>과 <그림 7>에서와 같이 시간이 변화여도 스펙트럼 센싱 성능은 크게 변화지 않는 것을 확인할 수 있다.

2) 레일리 페이딩 채널

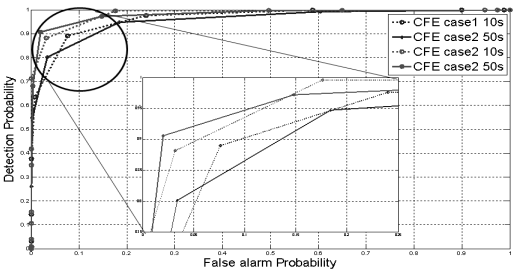
본 장에서는 레일리 페이딩 채널에서 스펙트럼 센싱 성능을 확인하였다. <그림 10>과 <그림 11>에



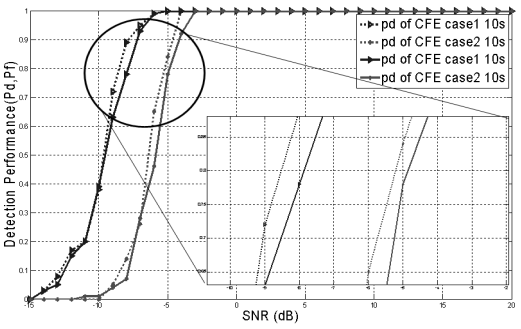
〈그림 8〉 ROC 곡선의 성능 비교
〈Fig 8〉 The comparison of ROC curves



〈그림 9〉 검출 성능 비교
〈Fig 9〉 The comparison of detection performance



〈그림 10〉 ROC 곡선 성능 비교
〈Fig 10〉 The comparison of ROC curves



〈그림 11〉 검출 성능 비교
〈Fig 11〉 The comparison of detection performance

서는 레일리 페이딩 채널에서 ROC 곡선과 SNR에 따른 검출 성능을 통하여 시간에 따른 스펙트럼 센싱 성능을 비교하였다. 그림에서 10s는 우선사용자의 채널 점유 시간이 10초임을 나타내며 50s는 우선사용자의 채널 점유 시간이 50초임을 나타낸다. 그림에서와 같이 우선사용자의 채널 점유 시간의 변화에 따른 스펙트럼 센싱 성능 변화는 Bin 개수 선택 알고리즘을 사용할 경우 약 80% 정도 개선되는 효과를 나타내었다.

Ⅴ. 결 론

기존 연구들에서는 이상적인 스펙트럼 센싱 환경을 가정하여 우선사용자의 채널 사용 시간이 항상 일정하다고 가정하였다. 하지만 실제 상황에서는 우선사용자의 채널 사용시간이 항상 같지 않다. 따라서 본 논문에서는 우선사용자의 채널 사용 시간에 따라 변화하는 센싱 성능을 최상의 값으로 유지하기 위하여 히스토그램에서의 Bin 개수 선택 알고리즘을 제안하였으며 시뮬레이션 그래프를 통하여 성능을 확인하였다. 다시 말해, 우선사용자의 채널 점유 시간이 길어질수록 센싱 성능의 열화가 발생하기 때문에 히스토그램 기법에서 Bin의 개수를 능동적으로 조절하여 최적의 Bin 개수를 찾아 주며 이를 통하여 센싱 성능의 열화를 막아 주어 우선사용자의 채널 점유 시간이 짧을 경우와 유사한 센싱 성능을 보여준다.

참고문헌

[1] Yucek T., and Arslan, H., “A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications,” *Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp116 – 130, IEEE 2009.

[2] Ya Lin Zhang, Qin Yu Zhang, and Tommaso Melodia; “A Frequency-Domain Entropy-Based Detector for Robust Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks,” *Communications Letters, IEEE,* vol. 14, no .6, pp533 – 535, June 2010.

[3] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, Shantidev Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey.", *Computer Networks* 50, pp. 2127-2159, 2006,

[4] Santosh V. Nagaraj. "Entropy Based Spectrum Sensing in Cognitive Radio," *Signal Processing,* vol. 89, no. 2, pp: 174-180, Feb, 2009.

[5] M. P. Wand , "Data-Based Choice of Histogram Bin Width," *The American Staticstician,* vol.51, Iss.1, pp.1-14, 11-14 1997

[6] Zhang Y., Zhang Q., Wu S.. "Entropy-based robust spectrum sensing in cognitive radio," *IET Commun*. vol. 4, no. 4, pp.428-430, 2010.

[7] Haowei Lee, Junrong Gu, Sunghwan Sohn, Sungjeen Jang and Jaemoung Kim. "An Improved Entropy Based Sensing by Exploring Phase Information.", *The Korean Institute of Communications and Information Sciences,* vol. 35, no. 9, pp.896-905, Sep. 2010.

[8] Junrong Gu; Wenlong Liu; Sung Jeen Jang; Jae Moung Kim; , "Cross entropy based spectrum sensing," *Communication Technology (ICCT)*, 2010 12th IEEE International Conference on , pp.11-14, China Nov. 2010

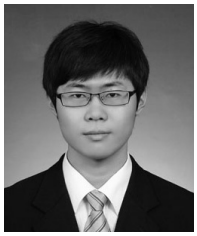
[9] Tasmia Ahmed, Junrong Gu, Sungjeen Jang and Jaemoung Kim. "An Improved Cross Entropy-Based Frequency-Domain Spectrum Sensing.", *The Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 48, no. 3, pp.50-59, Mar. 2011.

[10] D. W. Scott, "On optimal and data-based histograms,"*Biometrika*, vol. 66, no. 3, pp. 605-610, 1979.

[11] D. Freedman and P. Diaconis, "On the histogram as a density estimator: L2 theory,"*Probability Theory and Related Fields,* vol. 57, no. 4, pp. 453-476, 1981.

[12] S.Haykin, "Cognitive Radio : Brain-Empowered Wireless Communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp201-220, Feb, 2005.

저자소개



용 슬 바 로 (Yong, Seulbaro)

2011년 2월 : 수원대학교 전자공학과 학사
2011년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신공학과 석사과정
e-mail : baro@witlab.kr

장 성 진 (Jang, Sung-Jeen)

2007년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사
2009년 2월 : 인하대학교 정보통신공학과 석사
2009년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신공학과 박사과정

김 재 명 (Kim, Jae-Moung)

1974년 2월 : 한양대학교 전자공학과 공학사
1981년 8월 : 미국 남가주대학교(USC) 전기공학과 석사
1987년 8월 : 연세대학교 전자공학과 박사
1974년 3월 ~ 1979년 6월 : 한국과학기술연구소, 한국통신기술연구소 근무
1982년 9월 ~ 2003년 3월 : 한국전자통신연구원, 위선통신연구단장/무선방송연구소 소장 역임
2003년 4월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신공학부 교수, 외부 기술 자문으로 다수 활동 중