

Cognitive Radio 시스템에서 불확실한 잡음 전력을 고려한 슬라이딩 윈도우 기반 에너지 검출 기법

준희원 김 영 민*, 손 성 환*, 종신회원 김 재 명*

A Sliding Window-Based Energy Detection Method under Noise Uncertainty for Cognitive Radio Systems

Young-min Kim*, Sung-hwan Sohn* *Associate Members*
 Jae-moung Kim* *Lifelong Member*

요 약

Cognitive Radio(CR)는 실제로 사용하지 않는 주파수 대역을 스스로 찾아서 이용함으로써 스펙트럼 효율을 향상시킬 수 있는 기술이다. 현재 사용되지 않는 스펙트럼 대역과 우선사용자(primary user)에 의해 점유되는 대역들을 찾기 위한 스펙트럼 센싱(spectrum sensing)은 CR 시스템에서 중요한 기술의 하나라고 말할 수 있다. 지금까지 연구된 스펙트럼 센싱 방법 중 에너지 검출 방식은 계산의 복잡도가 낮고 비교적 쉽게 구현 할 수 있어서 일반적으로 널리 사용되는 방식이지만 몇 가지 문제점들을 가지고 있다. 특히 불확실한 잡음 전력이 존재하는 환경에서는 에너지 검출기의 성능이 감퇴되기 때문에 이를 해결하기 위해 슬라이딩 윈도우 기반 에너지 검출 기법을 제안하였다. 이 방식은 슬라이딩 윈도우를 이용하여 관심대역에서 신호와 잡음이 가진 에너지를 분리하고 잡음을 제외한 신호의 에너지를 계산해서 우선사용자 신호의 존재 여부를 판단한다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 에너지 검출 기법이 기존의 에너지 검출 방식 보다 우수한 성능을 지닌 다는 것을 확인 하였다.

Key Words : Cognitive radio, Spectrum sensing, Energy detection, Sliding window, Noise Uncertainty

ABSTRACT

Cognitive radio is one of the most effective techniques to improve the spectrum utilization efficiency. To implement the cognitive radio, spectrum sensing is considered as the key functionality because only counting on it, can the secondary users identify the spectrum holes and utilize them efficiently without causing interference to primary users. Generally, there are several spectrum sensing methods; the most common and simplest method is energy detection. However, the conventional energy detection has some disadvantages, which are caused by noise, especially, uncertain noise power leads to degradation of energy detector. In this paper, to solve this problem, we proposed sliding window-based energy detection method which can divide the frequency band of primary signal and noise using sliding window to estimate the power of primary user without the noise effect and achieve the better performance. It can calculate the energy of primary user only and can detect the primary signal. The simulation result shows that our proposed method outperforms conventional one.

* 본 연구는 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행되었음.
 (No. M10600000194-06J0000-19410).
 ※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학IT지원센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음.
 (IITA-2008-C1090-0801-0019)
 * 인하대학교 정보통신대학원 무선전송연구실 (ymym@hanmail.net, kittisn@naver.com, jaekim@inha.ac.kr)
 논문번호 : KICS2008-06-283, 접수일자 : 2008년 6월 23일, 최종논문접수일자 : 2008년 10월 27일

I. 서 론

최근 정보통신 기술의 발전과 함께 무선기기의 사용이 우리생활의 전 영역으로 확대되고 있으며 그에 따라 더 좋은 성능의 통신시스템과 높은 데이터 전송률에 대한 요구가 높아지고 있다. 실제로 3세대 이동전화 서비스가 보편화 되면서 음성데이터 위주의 통신에서 멀티미디어 서비스로 전환되고 있고, TV 전송방식이 디지털방송이나 DMB 등으로 다변화 하고 있으며, 유비쿼터스 시대로 진입하는 과정에서 RFID, USN, 텔레메틱스, 홈네트워크의 사용이 본격화 되는 등 주파수 자원에 대한 요구는 급등하고 있고 이러한 기술들이 발전함에 따라 주파수 자원 수요는 점진적으로 확대될 것이 분명하다. 따라서 주파수의 가치는 시간이 지날수록 점차 증가하고 있다고 할 수 있다. 그에 반해 주파수 자원은 한정되어 있으며 현재 거의 모든 주파수 대역은 고정 할당 되어 있다. 특히 무선 통신 환경에 적합한 3GHz 이하의 주파수 대역은 전혀 여유가 없는 실정이다. 더욱이 미국연방통신위원회 (Federal Communication Commission, FCC)는 2002년 주파수 정책 태스크 포스 보고서를 통해서 현재 고정 허가된 주파수 대역도 실제로는 15~85%의 큰 이용률 변화를 가지며 일시적, 지역적으로 비어있는 대역이 많은 등 비효율적으로 이용되고 있음을 지적 하였다^[1]. 이에 따라 한정된 주파수 자원을 중복해서 이용하며 최대한 효율적으로 사용할 수 있는 방안을 찾는 것이 무선 통신에 있어 큰 논점이 되고 있다. 2003년 12월, FCC는 Notice of Proposed Rule Making(NPRM)을 통해 이러한 문제를 해결하기 위한 후보 기술로 Cognitive Radio(CR)의 가능성을 언급하였다^[2]. CR은 2001년 Joseph Mitola III에 의해 등장한 개념이며, 발전된 Software-Defined Radio(SDR) 기술로 시간적, 공간적으로 사용이 적은 주파수를 감지한 후, 이를 통해 채널 상태를 추정하고 사용자의 요구를 인지하여 우선 사용자(primary user)에게 간섭을 주지 않고 비어있는 스펙트럼 대역을 효율적으로 이용하기 위한 방법이다^[3]. 따라서 CR기술을 이용하면 이용 가능하거나 비어있는 주파수 대역을 발견할 수 있고, 그것을 다차원적으로 재사용하여 주파수 부족 문제를 해결할 수 있다. CR기술의 효율적인 사용을 위해 FCC에서는 2004년 5월 NPRM을 통해 TV대역을 대상으로 주파수 공유 가능성에 대한 내용을 발표하였으며^[4], 이를 바탕

으로 2004년 12월, IEEE 802.22 Working Group(WG)을 설립하고 Wireless Regional Area Network(WRAN)에 대한 PHY/MAC 표준 제정을 시작 하였다. 802.22는 미국, 캐나다, 브라질 등과 같이 광활한 지역에서 VHF/UHF TV대역 중에서 사용하지 않는 대역을 이용하여 ADSL이나 케이블 모뎀과 동급의 무선인터넷 서비스 제공을 목적으로 한다. CR시스템의 2차사용자(secondary user, CR user)는 대가를 지불하고 주파수를 사용하는 우선사용자가 사용하지 않는 비어있는 스펙트럼 대역을 발견하여 그 대역들을 이용한다. 따라서 현재 사용되지 않는 스펙트럼 대역과 우선사용자에 의해 점유되는 대역들을 찾기 위한 스펙트럼 센싱(spectrum sensing)은 CR 시스템에서 가장 중요한 기술 중 하나라고 말할 수 있다. 지금까지 진행된 많은 연구에 의해 정합 필터(matched filter) 방식, 에너지 검출(energy detection) 방식, Cyclostationary 검출 방식이 스펙트럼 센싱의 중요한 기술로 제안되어 발전 해 왔다.^[5] 그 중 에너지 검출 방식은 계산의 복잡도가 낮고 비교적 쉽게 구현할 수 있어서 일반적으로 널리 사용되는 방식이지만 잡음의 변동에 민감하기 때문에 잡음 전력이 성능에 큰 영향을 끼치고 임계값 설정이 어려운 단점들을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문을 통해 이러한 단점의 해결 방안을 제시 해 보았다.

논문의 구성은 다음과 같다. 우선 II장에서 기존 에너지 검출 기법의 기본 구조와 특징 대해서 분석하고 검출 성능에 영향을 주는 잡음의 불확실성에 대하여 언급하며 문제를 도출한다. III장에서는 문제를 해결하기 위해 제안하는 에너지 검출 기법에 대하여 설명하고 각 모듈 별 구조와 상세한 설계 방법을 제시한다. 그리고 IV장에서는 본 논문에서 제시한 슬라이딩 윈도우 기반 에너지 검출 기법의 성능을 확인 할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제공하며, 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 기존의 에너지 검출 기법

2.1 에너지 검출 기법

앞서 언급한 세 가지 주요한 스펙트럼 센싱 모델 중 에너지 검출 방식은 신호의 변조 방식 및 형태에 대한 정보가 없이도 검출이 가능한 비동기적인 특성과 낮은 계산 복잡도를 가지고 있기

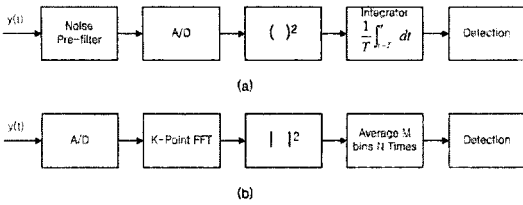


그림 1. 기존의 에너지 검출기 구조

때문에 신호를 검출하기 위해 많이 사용하는 방식이다. 일반적인 에너지 검출기는 스펙트럼 분석기와 비슷한 형태로 구성되며 비교적 간단한 하드웨어로 구현 할 수 있다. 에너지 검출기 방식의 대표적인 두 가지 구조가 그림 1에 그려져 있다.

가장 기본적인 에너지 검출 방식이라 할 수 있는 그림 1 (a)의 에너지 검출기는 필터와 Nyquist A/D 변환기, 제곱 장치와 적분기로 구성 된다. 수신된 신호는 특정대역 밖의 잡음을 제거하기 위해 필터를 통과하고 디지털 신호로 바뀐 후 제곱 하여 적분하는 방식으로 신호의 에너지를 얻어서 신호의 존재 여부를 판단한다.^[6] 그러나 이러한 에너지 검출방식은 협대역의 신호를 검출하는 경우, 사용이 적합하지 않기 때문에 이 후 FFT에 의한 주파수 성분의 제곱 크기를 이용한 그림 1 (b)의 방법이 제안되었다. 수신단에서 수신된 신호는 A/D 변환기에 의해 디지털 신호로 바뀌고 FFT에 의해 주파수 영역으로 옮겨진 K개의 디지털 표본들을 얻을 수 있다. 이 샘플들이 제곱과 평균화를 거치면서 신호의 에너지(Energy) 구하여 신호를 검출한다. 이러한 방식의 에너지 검출기는 넓은 대역에서 동시에 여러 개의 신호를 검출 할 수 있는 장점이 있다. 또한 K를 증가시키면 주파수 해상도(resolution)가 높아져서 협대역 신호의 검출도 가능하게 되며, 센싱 시간을 증가시키면 평균화 횟수 N도 증가 하므로 신호의 에너지 검출 성능이 향상 될 수 있다. 이러한 에너지 검출기를 이용한 신호의 검출은 다음의 두 가지 가정의 테스트를 통해 이루어진다.

- 1) H_0 : 입력 $y(t)$ 에는 잡음 $n(t)$ 만 존재.
 $Y[n] = W[n]$
- 2) H_1 : 입력 $y(t)$ 에는 신호 $x(t)$ 와 잡음 $w(t)$ 공존.
 $Y[n] = X[n] + W[n]$

$W[n]$ 은 잡음 성분에 대한 주파수 샘플이며 평균이 0이고 분산이 σ_w^2 인 가산성 백색 가우스 잡음(AWGN)으로 가정한다. 따라서 그림 1 (b)의

에너지 검출기를 통과한 신호의 테스트 샘플 T는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$T = \sum_N (Y[n])^2 \quad (1)$$

이렇게 얻은 결과를 미리 정해 놓은 임계값과 비교하면 두 가지 가설 중 한 가지로 선택되어 신호가 검출 되게 된다.^[7]

에너지 검출기는 이렇게 간단하게 신호를 검출 할 수 있는 장점을 지닌 반면 몇 가지 단점을 가지고 있다. 그 중 치명적인 단점 중 하나는 잡음의 변화에 큰 영향을 받는다는 점이다. 에너지 검출 방식은 신호와 잡음 그리고 다른 신호의 간섭을 구분하지 않고 전체의 에너지의 크기를 계산해서 우선사용자의 존재유무를 판단하기 때문에 잡음의 크기에 따라 에너지 검출기의 성능이 달라진다. 만약 예상하지 못한 잡음이 발생해서 잡음의 크기가 예상보다 크게 발생하는 경우에는 전체 에너지가 증가 되고 신호가 존재하지 않아도 검출이 될 수 있는 상황이 발생하게 된다. 또한 이와 같은 잡음의 영향으로 인해 임계값 설정이 어렵다는 점이 에너지 검출기의 또다른 문제점으로 지적되고 있다. 에너지 검출기가 신호를 검출 하는 성능은 임계값의 설정에 달려 있지만 잡음의 영향이 크고 실제적으로 계속해서 변하는 잡음의 크기를 미리 알 수가 없기 때문에 정확한 임계값의 설정이 매우 어렵다.^[5] 이러한 에너지 검출기의 문제점들을 해결하기 위해 사용자 각각의 검출 정보를 이용해서 협력 센싱을 하는 검출 방법^[10]과 최대-평균 전력비를 이용하여 우선사용자 신호의 종류를 구분하는 에너지 검출 기법^[11] 등 여러 가지 방안들이 최근 연구되고 있는 상황이다.

2.2 잡음의 불확실성 (noise uncertainty)

앞서 언급한 기존의 에너지 검출 방식이 지닌 문제점을 해결하기 위해서 문제가 발생하는 근본적인 원인인 잡음의 영향을 분석해 본다. 에너지 검출기는 임계값의 비교를 통해 신호를 검출하기 때문에 임계값을 설정하기 위해서는 먼저 관심 대역에 존재하는 잡음 전력의 크기를 정확히 알고 있어야 한다. 하지만 실제 환경에 존재하는 잡음의 크기를 정확히 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이러한 잡음의 측정 오차로 인해서 상황에 따라 발생 할 수 있는 불확실한 잡음들이 존재 한다면 검출 성능에 많은 영향을 줄 것이고 신호의 에너지가 작은 경우에는 신호의 검출이

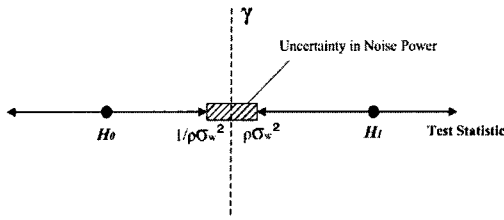


그림 2. 에너지 검출기에서의 불확실한 잡음 전력

더욱 어렵다. 따라서 검출을 시행할 때 마다 성능에 영향을 줄 수 있는 불확실한 잡음 전력에 대한 정의가 가장 먼저 필요하다. 그래서 이러한 불확실한 잡음 전력들이 끼치는 영향을 잡음의 불확실성(noise uncertainty)에 대한 연구^[8,9,12]를 통해 접근해 보았다. 그림 2는 에너지 검출을 위한 테스트에서 불확실한 잡음 전력이 존재하는 상황을 그림으로 나타내고 있다. 그림에서 γ 는 임계값을 나타내며 빗금 부분은 에너지 검출 상황마다 발생할 수 있는 불확실한 잡음 전력을 나타낸다. ρ 는 불확실한 잡음 전력의 크기를 나타내는 변수로 $\rho > 1$ 을 만족하며, 검출기는 신호와 잡음의 에너지만을 관찰하기 때문에 불확실한 잡음 전력의 분산은 $\sigma^2 \in [(1/\rho)\sigma_w^2, \rho\sigma_w^2]$ 의 범위를 가지게 된다. 그러므로 빗금 영역에서 시행되는 검출 테스트는 두 가지 가정 중 어느 한 가지로도 결정될 수 없으며, 신호의 에너지가 불확실한 잡음의 전력보다 작다면 즉, $P \leq (\rho - (1/\rho))\sigma_w^2$ 일 때에는 에너지 검출이 불가능하다. 이러한 제약이 있는 이유로 SNR(신호 대 잡음비) 값에 따라 에너지 검출기에 의해 검출 가능한 최소의 SNR값인 SNR_{wall} 이 존재하게 된다. 그 값은 식 (2)와 같이 정의할 수 있으며 이러한 SNR_{wall} 은 에너지 검출기에서 낮은 에너지를 가진 신호의 검출 성능을 크게 감소시키는 것으로 알려져 있다.^[8,9]

$$SNR_{wall} = \frac{\rho^2 - 1}{\rho} \quad (2)$$

식 (2)에 따라 그림 3의 그래프에서는 불확실한 잡음전력의 크기에 따른 SNR_{wall} 의 위치를 dB의 단위로 보여준다. 그림을 살펴보면 불확실한 잡음 전력이 1dB 일 때, 즉, $10\log_{10}\rho = 1dB$ 이면 약 -3.3dB의 SNR_{wall} 값을 가지게 된다. 따라서 1dB의 불확실한 잡음전력이 존재하는 상황에서는 SNR이 -3.3dB 보다 작을 경우 에너지 검출기에 의한 신호의 검출이 불가능하다고 할 수 있다.^[9]

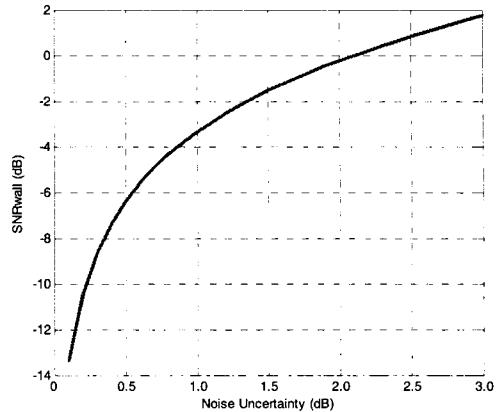


그림 3. 불확실한 잡음전력에 따른 SNRwall의 위치

III. 제안하는 에너지 검출 기법

본 논문에서는 기존의 에너지 검출 방식에서 불확실한 잡음 전력 상황을 고려했을 때 검출 성능이 저하되는 문제를 해결하기 위해 슬라이딩 윈도우 기반 에너지 검출 기법을 제안한다. 그림 4에 제안하는 에너지 검출 기법의 전체적인 구조를 도시하였다. 슬라이딩 윈도우 기반 에너지 검출기는 그림 1 (b)의 주파수 성분을 이용한 에너지 검출 방법에 슬라이딩 윈도우 기법, 보호 대역의 구분 그리고 신호의 에너지를 계산하는 새로운 알고리즘들이 추가된 구조로 구성되어 있다. 기존의 에너지 검출기는 검출하려는 신호와 잡음을 구분하지 않고 에너지를 계산하므로 불확실한 잡음 전력이 존재 한다면 검출 성능의 감쇠가 발생하였다. 따라서 추가된 알고리즘은 이러한 문제를 해결하고자 신호의 에너지와 잡음의 에너지를 구분하고 잡음을 제외한 우선사용자 신호만의 에너지를 측정하는 작업에 중점을 두고 있다.

그림 5에는 그림 4에서 추가된 알고리즘을 보다 상세한 흐름도로서 나타내었다. 기존의 알고리즘으로 주파수 성분들을 얻은 후 그림과 같은 과정을 거쳐서 최종적으로 우선사용자의 신호를 검출하게 되는데 자세하게는 크게 네 부분의 동작으로 신호의 검출이 이루어진다.

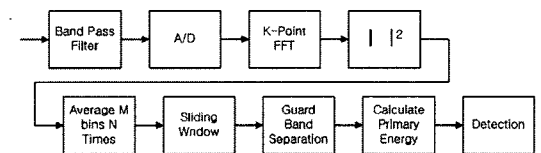


그림 4. 제안하는 에너지 검출기 구조

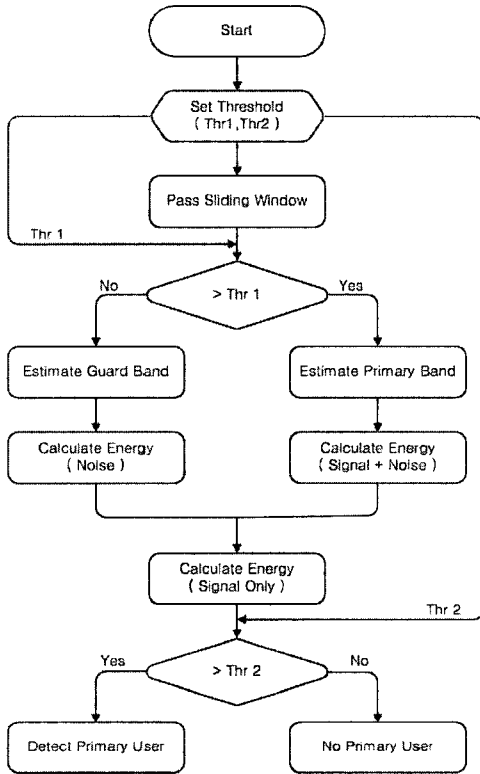


그림 5. 제안하는 에너지 검출 기법의 순서도

3.1 슬라이딩 윈도우 (Sliding Window)

기존의 에너지 검출기의 주파수 스펙트럼을 이용하여 우선사용자 신호의 에너지와 잡음의 에너지를 분리하기 위해서는 몇 가지 문제점이 발생한다. 먼저, 구분을 위해서는 스펙트럼 상에서 신호의 점유대역을 알아야 하는데 잡음의 진폭의 변화가 커지거나 낮은 SNR 환경에서는 신호의 스펙트럼이 잡음의 스펙트럼에 의해 영향을 받게 되어서 대역의 구분이 어려워진다. 제안하는 알고리즘에서는 불안정한 스펙트럼 환경의 진폭 변화를 줄여주고 잡음과 신호의 구분을 쉽게 하기 위하여 슬라이딩 윈도우 기법을 사용한다. 그림 6에는 제안하는 에너지 검출기를 위해 사용되는 슬라이딩 윈도우의 기본적인 동작 원리가 간단하게 도시되어 있다. 인덱스의 숫자들은 주파수 축에서 평균화된 샘플들의 인덱스 번호를 나타내며 t 는 슬라이딩 윈도우의 동작 시간, N_s 는 슬라이딩 윈도우의 크기를 나타낸다. 윈도우가 주파수 샘플들을 N_s 크기의 버퍼에 저장했다가 각 샘플들의 값을 평균화시키고 그 결과 값을 윈도우의 첫 번째 인덱스에 저장한다. 그리고 윈도우는 한 샘플

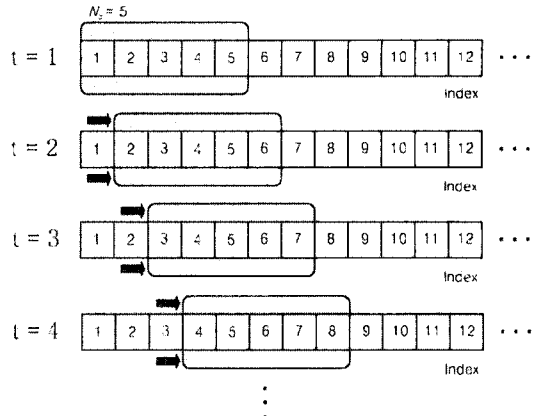


그림 6. 슬라이딩 윈도우 알고리즘

의 크기만큼 겹치며(Overlap) 다음 샘플로 이동한다. 이 작업은 마지막 인덱스가 FFT의 마지막 인덱스에 도달할 때까지 계속된다. 이에 따라 k 번째 인덱스에서 계산되는 슬라이딩 윈도우의 결과값 $S(k)$ 에 저장된다고 하면,

$$S(k) = \frac{1}{N_s} \sum_{n=k}^{N_s+k-1} |Y_k[n]|^2 \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 모든 주파수 샘플에 대하여 이와 같은 계산을 진행 하면, $S(k)$ 에는 k 번째 윈도우 내의 샘플들의 평균값이 저장되고 스펙트럼 샘플의 변동 폭은 훨씬 작아져서 좀 더 부드러운 주파수 스펙트럼 모양을 얻을 수 있으므로 신호의 점유대역과 보호대역을 구분하기가 용이해진다.

그림 7과 그림 8의 간단한 시뮬레이션 예를 통해 슬라이딩 윈도우를 사용해서 얻을 수 있는 효과를 확인 해 본다. 그림 7은 10MHz의 대역 중 6MHz

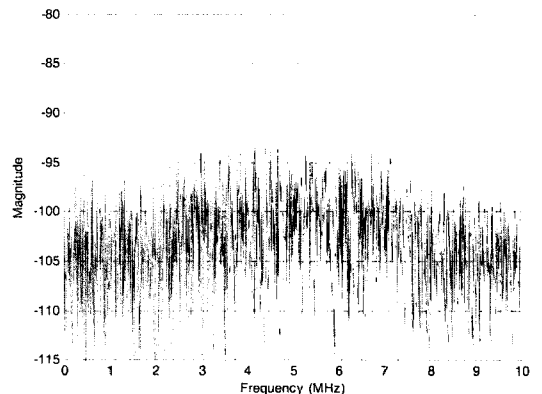


그림 7. DTV신호의 주파수 스펙트럼(AWGN, FFT Size=2048, SNR=-5dB)

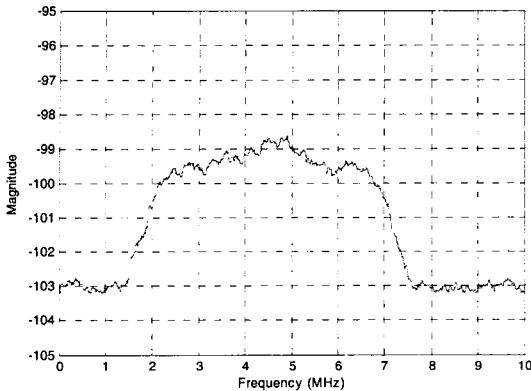


그림 8. 슬라이딩 윈도우를 통과한 DTV신호의 주파수 스펙트럼 (AWGN, FFT Size=2048, SNR=-5dB)

를 점유하고 있는 DTV신호를 SNR이 -5dB인 환경에서 관찰했을 때의 스펙트럼을 보여주고 있다. 잡음의 영향으로 신호의 점유대역을 판단하는 것이 쉽지 않다. 이 스펙트럼을 윈도우 사이즈 N_s 가 100인 슬라이딩 윈도우에 통과 시키면 그림 8과 같은 스펙트럼을 얻을 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 그림 7의 스펙트럼보다 훨씬 부드러워졌고, 점유대역과 보호대역의 구분이 명확해 졌기 때문에 간단한 임계값 비교를 통해서도 신호의 점유대역을 찾을 수 있다. 따라서 제안하는 에너지 검출기에 슬라이딩 윈도우 기법을 적용하게 되었다.

3.2 점유대역과 보호대역의 구분

슬라이딩 윈도우를 통과하고 나면 신호와 잡음의 차이가 분명해 지기 때문에 임계값을 이용하여 신호가 점유한 대역과 잡음만 존재하는 보호대역의 구분이 가능하며 신호의 점유 대역 추정 이 가능하다. 슬라이딩 윈도우를 통과한 스펙트럼의 k 번째 샘플 $S(k)$ 는 다음의 두 가지 가정 중 한 가지 상태로 존재 하게 되며 미리 정의해 놓은 임계값1에 의해 두 가정을 구분한다.

- 1) H_0 : 보호대역에 존재함

$$S(k) = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} |W_k[n]|^2$$

- 2) H_1 : 신호가 점유대역에 존재함

$$S(k) = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} |X[n] + W[n]|^2$$

슬라이딩 윈도우를 통과한 주파수 샘플 $S(k)$ 와 비교하여 샘플의 값이 임계값1 보다 작다면 그 샘플이 위치하는 주파수는 보호대역 내에 있음이

선언 되고 (H_0) 반대로 값이 임계값 보다 크다면 샘플이 위치하는 주파수는 신호의 점유 대역 내에 있음이 선언 된다 (H_1). 이와 같은 과정을 통해서 우선사용자 신호의 양쪽에 존재하는 보호대역의 크기를 알 수 있고 신호에 의해 점유된 대역의 크기와 위치를 추정 할 수 있다.

3.3 신호의 에너지 계산

앞선 과정들을 통해 얻은 결과를 바탕으로 잡음을 제외한 신호가 가진 에너지의 크기를 추정 한다. 이를 위한 알고리즘과 원리는 그림 9와 같이 실제로 나타날 수 있는 스펙트럼 예를 통해 상세하게 설명한다. DTV 신호와 WMP (Wireless Microphone)

신호가 공존하고 있는 실제의 주파수 스펙트럼 환경이 그림 9와 같고 현재 가운데에 위치하고 있는 DTV신호를 검출하기 위해 BW_{ob} 대역을 관찰하고 있다고 가정한다. 신호가 점유하고 있는 유효대역폭을 BW_{eff} , 신호의 양 옆에 존재하는 보호대역의 크기를 각각 BW_{GB1} , BW_{GB2} 로 정의 한다고 하면, 이와 같은 환경에서 AWGN을 포함한 잡음은 BW_{ob} 전 대역에 걸쳐서 존재하고 있고, BW_{eff} 에는 신호가 존재하면서 동시에 잡음이 공존하고 있으며, BW_{GB1} 과 BW_{GB2} 에는 잡음만이 존재하고 있다. 이 같은 사실에 의해 지금 까지 얻은 결과 값을 이용해서 신호의 에너지를 계산할 수 있다. 우선, 앞서 추정한 보호대역 중 왼쪽 보호 대역(BW_{GB1})에 존재하는 에너지 $P_{n,GB1}$ 를 계산 한다. 에너지 보존 법칙을 이용하면 전 단계에서 추정한 보호대역의 크기를 L_{GB1} 이라고 할 때, 왼쪽 보호 대역에 존재하는 에너지는

$$P_{n,GB1} = \sum_{k=1}^{L_{GB1}} S(k) \tag{4}$$

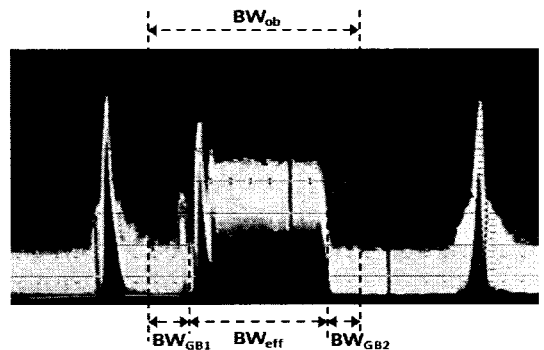


그림 9. 우선사용자들의 주파수 스펙트럼 예(DTV, WMP 신호)

로 간단하게 나타 낼 수 있다. 이제 이 값을 이용하여 신호가 점유한 유효 대역(BW_{eff})에서 신호의 에너지를 제외한 순수한 잡음의 에너지 $P_{n,eff}$ 를 계산해 낼 수 있다. 추정된 유효대역의 크기를 L_{eff} 라고 하면,

$$P_{n,eff} = P_{n,GB_1} \times \frac{L_{eff}}{L_{GB_1}} \quad (5)$$

이에 따라 유효대역(BW_{eff})에 존재 하는 잡음의 에너지의 값을 알고 있기 때문에 유효대역에서의 잡음을 제외한 순수한 우선사용자 신호의 전력 $P_{s,eff}$ 은 유효 대역내의 전체 에너지를 $P_{s+n,eff}$ 라고 할 때,

$$P_{s,eff} = P_{s+n,eff} - P_{n,eff} \quad (6)$$

에 의해 신호의 에너지를 계산 할 수 있다.

3.4 신호 검출

알고리즘의 마지막 단계로 우선사용자 신호의 존재여부를 최종으로 판단하는 과정이 남아 있다. 앞서 신호의 에너지를 추정하였으므로 이 값을 미리 정해 두었던 임계값2와 비교하여 신호를 검출 한다. 검출하려는 신호의 종류에 따라, 그리고 스펙트럼 환경에 따라 요구되는 가장 작은 값을 임계값2로 정한다. 추정된 신호의 에너지가 임계값2 보다 크다면 신호의 존재가 선언 되며 임계값2 보다 작으면 관찰 대역에 잡음만이 존재하는 것으로 간주되어 신호가 존재하지 않음 또는 잡음만 존재하는 대역이 선언된다. 이렇게 우선사용자 신호의 검출 여부가 결정되면 제안하는 알고리즘은 끝을 맺게 된다.

IV. 시뮬레이션 및 결과

지금까지 설명해온 알고리즘들의 성능을 분석하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하고 결과를 분석해 보았다. 표 1은 본 논문의 시뮬레이션에서 사용된 주요 파라미터들을 나타낸다. 에너지 검출기가 시뮬레이션을 통해 검출 하는 우선사용자 신호의 종류로는 그림 10에 나타나 있는 DTV 신호와 그림 11에 나타나 있는 WMP 신호를 사용하는 것으로 가정 한다. 그림에서 볼 수 있듯이 DTV 신호의 스펙트럼은 전체 6MHz를 점유하고 있으며 5.38MHz의 실제 점유 대역을 가지고 파

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value
Type of Primary User	DTV(8-VSB), WMP(AM)
Average Noise Level	-163 dBm/Hz
Observed Bandwidth	10 MHz
FFT Size	2048
Fading Channel	ITU-R M.1225
Central Frequency	750 MHz
Mobile Speed	3 km/h, 60 km/h
Doppler Frequency	2.08 Hz, 41.67 Hz
Eb/No	-20 dB ~ 15 dB
Noise Uncertainty	0 dB, ± 0.5 dB, ± 1 dB
Probability of Detection	> 99%
Probability of False Alarm	<= 1%

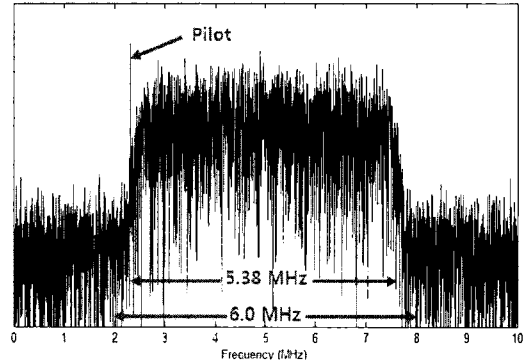


그림 10. 우선사용자 신호의 스펙트럼 (ATSC DTV)

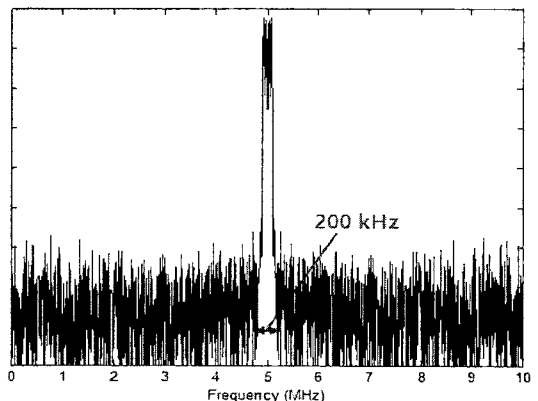


그림 11. 우선사용자 신호의 스펙트럼 (WMP)

일렛이 삽입된 구조로 이루어져 있다. WMP 신호의 스펙트럼은 전체 200kHz를 점유하고 있으며 AM 변조된 신호를 사용한다고 가정한다.

DTV 신호의 보호대역을 고려하여 시뮬레이션 파라미터 중 관찰 대역의 크기를 10MHz로 설정하였다. 그리고 IEEE 802.22 WRAN시스템에서 사용하는 주파수 대역인 54~862MHz 대역을 이용하기 위해 중심 주파수를 750MHz로 정하였다.

이번 시뮬레이션의 중요한 파라미터 중의 하나는 잡음의 불확실성(Noise Uncertainty)이라고 할 수 있다. III절에서도 언급했지만 제안하는 에너지 검출기는 잡음과 신호의 에너지를 분리해서 계산하기 때문에 불확실한 잡음 전력이 검출 성능에 끼치는 영향이 매우 적다. 이러한 사실을 확인해 보기 위해 에너지 검출 시 나타날 수 있는 불확실한 잡음들을 발생시키고 그 크기를 변화하면서 성능을 살펴본다. 우선 불확실한 잡음 전력으로 발생 할 수 있는 요인들을 생각해 보면 크게 온도 변화에 따른 열잡음의 변화와 LNA의 이득 변화, 잡음 측정시의 오류 등이 불확실한 잡음 전력으로 나타날 수 있다. 신호 검출 시 생기는 온도 변화에 의해 생기는 불확실한 잡음 전력을 측정하기 위해 T를 Kelvin 온도, K_b 를 Boltzmann 상수라고 할 때 잡음의 전력스펙트럼 밀도(PSD)는

$$N_0 = K_b T \tag{7}$$

와 같고, 온도에 따른 PSD의 변화는

$$\begin{aligned} \Delta N_0 &= 10 \text{Log}(K_b T_2) - 10 \text{Log}(K_b T_1) \tag{8} \\ &= 10 \text{Log}\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \end{aligned}$$

으로 나타 낼 수 있다. 또한, 온도의 변화에 따른 LNA의 이득(gain)은 일반적으로 0.01 dB/°C 로 정의 되며 잡음의 초기 측정(Calibration) 오류는 대략 0.22dB 정도로 알려져 있다.^[12] 만약 에너지 검출 시 20도의 온도 변화가 있었다면 식 (8)에 의해 0.28dB의 PSD 변화가 발생하고, 0.2dB의 LNA에 의한 이득의 변화가 야기 되어 최대 ±0.7dB의 불확실한 잡음전력이 에너지 검출에 영향을 끼친다고 할 수 있다. 여기에 앞에서 언급하지 않았던 각종 간섭 등이 더해진다면 그 영향은 더 커질 수 있다. 이러한 기준들을 참고로 하여 시뮬레이션에 사용하기 위한 불확실한 잡음전력의 범위가 -1dB~1dB와 -0.5dB~0.5dB의 두 범위

내에서 발생한다고 가정하고 그에 따른 성능을 확인해 보았다. 그러나 같은 -1dB~1dB 범위의 불확실한 잡음 전력이 존재하는 경우가 존재한다고 하더라도 적용되는 잡음전력의 범위는 최대 2dB(-1dB~1dB)에서 0dB까지 환경에 따라 달라질 수 있기 때문에 그 크기를 정량화 시킬 필요가 있다. 여러 가지 현존하는 확실적인 해석 방법 중 본 논문에서는 불확실한 잡음 전력이 영향을 주는 가장 좋지 않은 경우(worst case)만을 살펴보는 방법을 사용하여 시뮬레이션을 진행 하였다. 이에 따라 평균 잡음 레벨을 \bar{N} 이라 하고, 가능한 불확실한 잡음 전력의 크기를 Δ 로 정의 할 때 이것이 더해진 잡음의 PSD 범위는 최악의 경우 즉, 불확실한 잡음전력이 최대가 될 때, 식 (9)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$N = \bar{N} \pm \Delta = -163 \pm \Delta \text{ dBm/Hz} \tag{9}$$

관찰 대역이 10MHz이므로 식 (9)에 의해 $\Delta = 0.5\text{dB}$ 일 때 잡음의 에너지 범위는 -93.5~-92.5 dBm, $\Delta = 1\text{dB}$ 일 때의 잡음의 에너지 범위는 -94~-92 dBm 으로 정해진다.

앞서 2.2절에서는 불확실한 잡음전력이 존재할 경우 신호의 검출 가능한 한계점인 SNR_{wall}에 대하여 잠시 언급했었다. 이 SNR_{wall} 값을 고려하여 불확실한 잡음전력이 0.5dB, 1dB 존재할 때 에너지 검출기의 검출 한계 에너지 POWER_{wall} 값을 계산해 보았다. 식 (9)에 의해 불확실한 잡음전력을 고려하지 않은 잡음의 에너지는 -92 dBm이 되므로 그림 3의 그래프를 참고하면 표 2와 같은 값을 얻을 수 있다.

표 2의 결과를 살펴보면 1dB의 불확실한 잡음 전력의 영향이 존재할 때 에너지의 크기가 최소 -96.5 dBm 이상이 되어야 에너지 검출기를 이용한 신호의 검출이 가능하다는 사실을 알 수 있다.

지금까지 언급한 파라미터를 바탕으로 제안하는 에너지 검출기의 실제 성능을 평가하기 위해 우선 사용자 신호의 검출 확률 P_d와 false alarm 확률 P_{fa}

표 2. 불확실한 잡음전력의 크기에 따른 제안하는 에너지 검출기의 검출 한계 에너지

Δ	SNR _{wall}	POWER _{wall}
0.5 dB	-6.4 dB	-99.4 dBm
1 dB	-3.3 dB	-96.5 dBm

를 구하는 시뮬레이션들을 시행하였다. 신뢰성 있는 평가를 위해 10000번 이상의 실험을 진행하고 각 확률을 계산 하였다. 그리고 제안하는 알고리즘에서 사용하는 임계값1, 임계값2를 결정하기 위해서 미리 시뮬레이션을 시행하고 P_{fa} 가 1%로 발생하게 될 때의 값으로 임계값들을 결정하였다.

그림 12~그림 17을 통해 다양한 파라미터 값의 변화에 대한 제안하는 방식의 검출 성능을 확인해 볼 수 있다. 기본적으로 SNR이 높아질수록 검출 확률 P_d 는 커지게 되며 false alarm 확률 P_{fa} 는 1%를 유지하는 형태를 나타낸다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 신호 검출의 기준은 P_d 가 90% 이상이 되었을 때로 가정한다.

그림 12와 그림 13은 우선사용자 신호가 각각 DTV, WMP 신호 일 때 AWGN환경에서 기존의 에너지 검출기와 제안하는 슬라이딩 윈도우 기반 에너지 검출기의 성능을 비교하는 결과 그래프이다. SNR에 따른 검출 확률을 보여주고 있으며 실선은 제안된 알고리즘이고 점선은 기존의 알고리즘을 나타낸다. 성능 그래프를 통해 잡음의 불확실성 정도에 따라 다른 성능을 보이는 것을 쉽게 알 수 있다. DTV 신호의 경우 그림 12를 통해 검출 확률이 90%이상일 때를 비교해 보면, 불확실한 잡음전력이 0dB($\Delta=0$ dB) 일 때에는 제안된 알고리즘이 겨우 1dB 좋은 성능을 보이지만 불확실한 잡음전력이 커질수록 큰 성능 개선을 보여준다는 사실을 알 수 있다. ± 0.5 dB($\Delta=0.5$ dB) 일 때는 약 5dB, ± 1 dB($\Delta=1$ dB) 일 때는 약 7.1dB의 성능 이득을 갖는다. 이는 잡음과 신호를 분리해서 에너지를 측정함에 따라 불확실한 잡음

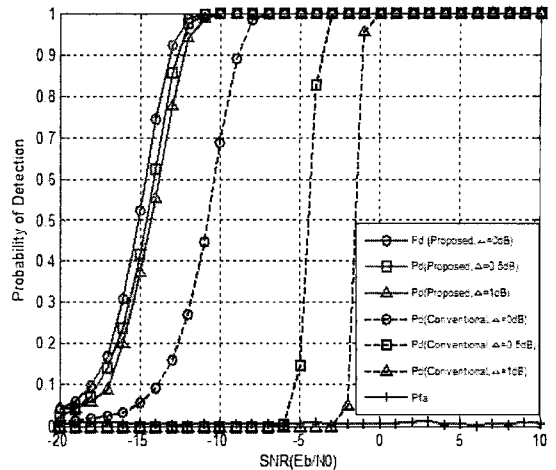


그림 13. 제안하는 알고리즘과 기존 알고리즘의 성능비교 (WMP, AWGN, Window Size=200)

전력에 의한 영향이 미미해 졌다는 사실을 보여 준다. WMP 신호의 경우도 마찬가지로 그림 13의 성능을 살펴보면 제안하는 알고리즘에 의해 검출 성능이 향상 되었음을 확인 할 수 있다. WMP 신호의 경우는 좁은 대역폭에 높은 크기를 갖고 있으므로 슬라이딩 윈도우 통과 시 다수의 윈도우를 통과하면서 평균화 과정을 여러 번 거치기 때문에 DTV의 경우보다 훨씬 좋은 성능을 나타낸다. 불확실한 잡음전력이 0dB($\Delta=0$ dB) 인 경우 제안하는 알고리즘이 약 3.9dB 좋은 성능을 보이며, ± 0.5 dB($\Delta=0.5$ dB) 일 때는 약 8.6dB, ± 1 dB($\Delta=1$ dB) 일 때는 약 10.7dB의 성능을 보여준다.

그림 14는 Rayleigh Fading 환경에서 속도가 3km/h 일 때 제안하는 알고리즘과 기존의 알고리즘의 성능을 비교한 그래프이다. 그림 13과 비교

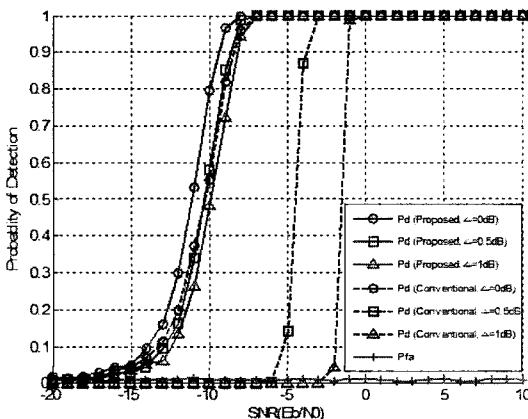


그림 12. 제안하는 알고리즘과 기존 알고리즘의 성능비교 (DTV, AWGN, Window Size=200)

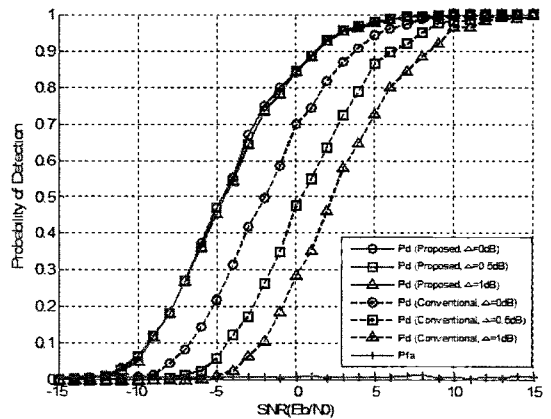


그림 14. 제안하는 알고리즘과 기존 알고리즘의 성능비교 (Rayleigh Fading(3km/h), Window Size=200)

해서 Fading 채널에서는 수신되는 에너지가 계속 해서 바뀌기 때문에 제안된 알고리즘과 기존의 알고리즘 모두 잡음의 불확실성에 의한 영향은 줄어들었음을 관찰할 수 있다. 하지만 전체적인 성능은 감소 되었으며 검출 확률 90% 이상일 때, 불확실한 잡음전력의 크기가 0, ±0.5, ±1dB 일 경우 제안하고 있는 알고리즘이 각각 3dB, 5dB, 7dB의 성능 이득을 가지고 있음을 보여준다.

그림 15와 16은 이동성에 따른 성능을 비교해 보기 위한 결과 그래프이다. 그림 15에는 AWGN 환경에 대하여 속도가 3km/h(Ped.A)인 Rayleigh Fading 환경의 경우 제안하는 알고리즘의 성능이, 그림 16에는 AWGN 환경에 대하여 속도가 60km/h(Veh.A)인 Rayleigh Fading 환경의 경우 제안하는 알고리즘의 성능이 각각 비교되어 있다. 두 개의 그림을 비교해 보면 SNR이 -3dB 이하로

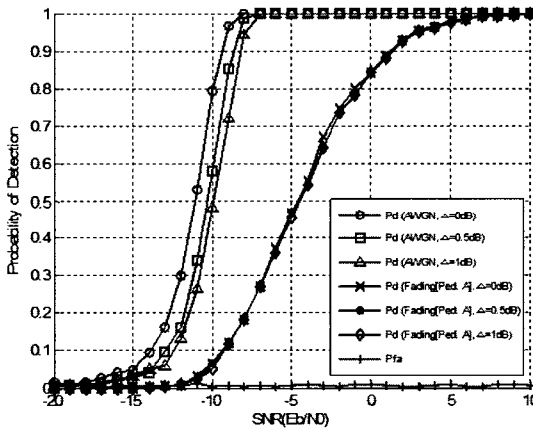


그림 15. 제안하는 알고리즘의 성능(Rayleigh Fading(3km/h), Window Size=200)

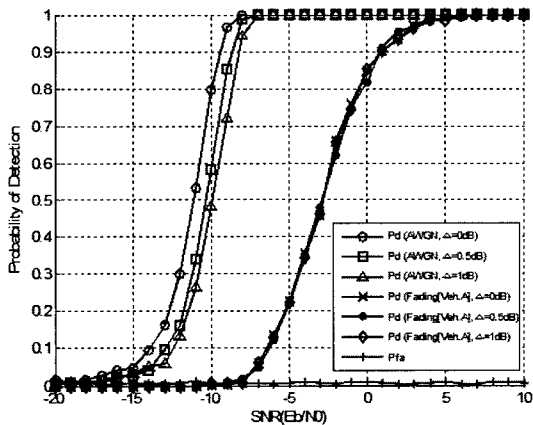


그림 16. 제안하는 알고리즘의 성능(Rayleigh Fading(60km/h), Window Size=200)

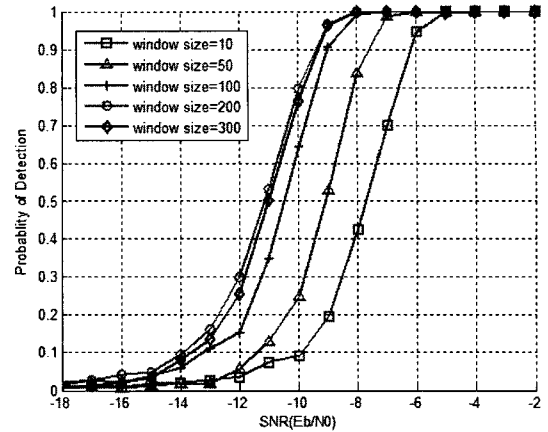


그림 17. 슬라이딩 윈도우의 크기에 따른 성능 (AWGN)

낮을 경우에는 3km/h일 때가 60km/h일 때 보다 훨씬 좋은 성능을 보이지만 SNR이 커질수록 성능의 차이가 좁혀지는 것을 확인할 수 있다. 이는 SNR이 충분히 커지게 되면 이동국의 속도가 전체 성능에 미치는 영향이 작아지기 때문이다.

마지막으로 그림 17에는 슬라이딩 윈도우의 크기에 따른 성능을 보여주는 그래프를 나타낸다. N_s 가 10, 50, 100, 200, 300 일 때의 윈도우 크기에 따른 성능을 비교하고 있다. 90%의 Pd 를 가질 때, N_s 가 10과 200일 때의 성능을 비교하면 200일 때 약 3dB정도의 성능 이득을 가지는 사실을 알 수 있다. 윈도우의 크기가 커질수록 슬라이딩 윈도우에 의한 평균화 효과가 커지기 때문이다. 하지만 크기가 200과 300인 경우를 비교해 보면 거의 비슷한 성능을 가지고 있지만 검출확률이 90%이하일 때는 오히려 200일 경우가 300인 경우보다 약간 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이것은 N_s 가 주어진 보호 대역의 크기보다 커지면서 너무 넓은 대역의 평균화로 인해 우선사용자 신호의 스펙트럼을 손상시키기 때문이다. 스펙트럼 상황에 따라 보호대역의 크기를 고려해서 최적의 성능을 얻을 수 있는 슬라이딩 윈도우의 크기를 선택 한다.

V. 결론

CR 시스템의 스펙트럼 센싱을 위하여 사용되는 기존의 에너지 검출 방식은 잡음이 성능에 큰 영향을 끼치고 임계값의 설정이 어렵다는 단점이 있다. 더욱이 신호와 공존하는 잡음의 전력을 정확하게 측정하는 것이 현실적으로 어렵기 때문에

에너지 검출의 과정에서 예상하지 못했던 불확실한 잡음 전력이 존재하는 환경에서는 에너지 검출기의 검출 성능에 SNR_{wait} 이라는 값이 존재하게 되며 검출 성능이 저하 되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문을 통해 슬라이딩 윈도우 기반 에너지 검출 기법을 제시하였다. 기존의 방식이 잡음과 신호가 더해진 전체의 에너지를 이용해서 신호를 검출하기 때문에 불확실한 잡음 전력에 취약하다는 사실에 착안하여 제안하는 알고리즘은 신호의 에너지와 잡음의 에너지를 구분하여 신호를 검출한다. 이를 위해서는 먼저 잡음의 변동 편차를 줄여야 하기 때문에 슬라이딩 윈도우 기법이 제안된 알고리즘에 적용되었다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 알고리즘의 성능을 측정해 보았다. 불확실한 잡음 전력이 존재하는 상황에서 제안하는 에너지 검출 기법이 기존의 방식 보다 좋은 성능을 보여주는 것을 확인 할 수 있고, 불확실한 잡음 전력의 크기가 클수록 성능 차이는 더욱더 커진다는 결과를 확인하였다.

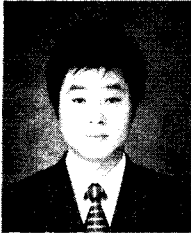
시간이 지날수록 주파수 자원의 가치는 더욱 높아질 것으로 보이며 CR기술의 많은 발전도 있을 것이다. 이에 따라 본 논문에서 제안하는 슬라이딩 윈도우 기반 에너지 검출기법의 알고리즘도 CR 시스템의 스펙트럼 센싱을 위해 많은 참고가 될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] FCC, "Spectrum Policy Task Force Report", ET Docket No.02-155, 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. Mitola III, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio", Ph. D thesis, Royal Institute of Technology and Sweden.
- [4] FCC, "Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands; Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band", Notice of Proposed Rule Making, ET Docket No. 04-113, May 2004.
- [5] D.Cabric, S.Mishra, and R.Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios", in Proc. Asilomar Conf. On signals, Systems and Computers, Vol.1, pp.772-776, Nov. 2004
- [6] H.Urkowitz, "Energy Detection of Unknown Deterministic Signals", Proceedings of the IEEE, Vol.55, Apr. 1967
- [7] D.Cabric, A.Tkachenko, and R.Brodersen, "Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection", in Proc. IEEE Military Communications Conf., pp.1-7, Oct. 2006.
- [8] R.Tandra, A.Sahai, "Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty", 2005 International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, Vol.1, June 2005
- [9] R.Tandra, A.Sahai, "SNR Walls for Signal Detection", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Vol.2, No.1, February 2008
- [10] A.Ghasemi, E.S.Sousa, "Opportunistic Spectrum Access in Fading Channels Through Collaborative Sensing", journal of communications, Vol.2, No.2 March 2007
- [11] G.Zheng, N.Han, X.Huang, Sung Hwan Sohn, Jae Mung Kim "Enhanced Energy Detector for IEEE 802.22 WRAN Systems Using Maximal-to-Mean Power Ratio" to appear in Pro. of IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems, October, 2007.
- [12] S.Shellhammer, R.Tandra, "Performance of the Power Detector with Noise Uncertainty", IEEE 802.22-06/0134r0, July 2006.

김 영 민 (Young-min Kim)

준회원



2007년 8월 인하대학교 컴퓨터
공학부 졸업
2007년 9월~현재 인하대학교
정보통신대학원 석사과정
<관심분야> Cognitive Radio,
Spectrum Sensing, 이동통신

김 재 명 (Jae-moung Kim)

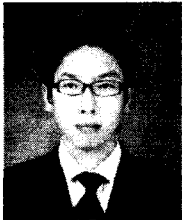
중신회원



1974년 2월 한양대학교 전자공
학과 졸업
1981년 8월 미국 남기주대학교
(USC) 전기공학과 석사
1987년 8월 연세대학교 전자공
학과 박사
1974년 3월~1979년 6월 한국
과학기술연구소, 한국통신기술연구소 근무
1982년 9월~2003년 3월 한국전자통신연구원 위성
통신 연구단장 / 무선방송연구소 소장역임
2003년 4월~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수,
한국방송공학회 부회장, 통신위성우주산업연구회 회
장 외 정부 및 다수기업에 기술자문으로 활동 중
<관심분야> 광대역 무선전송, 이동통신 및 위성통
신디지털 방송분야

손 성 환 (Sung-hwan Sohn)

준회원



2004년 2월 인하대학교 전자공
학과 졸업
2006년 2월 인하대학교 정보통
신대학원 석사
2006년 3월~현재 인하대학교 정
보통신대학원 박사과정
<관심분야> Cognitive Radio,

Spectrum Sensing, 이동통신