

인지 무선 기반 애드 혹 네트워크에서 적응적 임계치 알고리즘을 이용한 센싱 성능

Performance of Detection Probability with Adaptive Threshold Algorithm for CR Based on Ad-Hoc Network

이 경 선 · 김 윤 현 · 김 진 영

Kyung Sun Lee · Yoon Hyun Kim · Jin Young Kim

요 약

Ad-hoc 네트워크는 음영 지역, 재난 지역, 전쟁 시와 같은 통신 인프라가 구축되기 어려운 상황에서 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 음성 및 데이터 서비스 등과 같은 무선 서비스의 제공을 위해 많은 양의 네트워크 용량이 필요하게 되지만, 기존의 제한된 주파수 자원에 따른 주파수 부족 상황 및 주파수 자원 정책의 규제에 따라 원활한 주파수 사용이 어려운 상황이다. 이에 따라 높은 주파수 활용을 제공하는 인지 무선 시스템을 ad-hoc 네트워크에 적용하여 보다 다양하고 확장된 네트워크 서비스를 제공할 수 있다. 하지만 기존 스펙트럼 센싱에 있어 임계치가 정적으로 작용하므로 detection probability가 낮게 검출되는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하여 신호들의 detection probability를 향상시키기 위해 adaptive threshold를 이용할 것이다. 본 논문에서는 동적인 임계치를 이용하여 수신 신호의 power에 따라 임계치가 변화하여 신호들의 detection probability를 향상시키는 센싱 성능을 보여 준다.

Abstract

Ad-hoc networks can be used various environment, which it is difficult to construct infrastructures, such as shadowing areas, disaster areas, war area, and so on. In order to support to considerable and various wireless services, more spectrum resources are needed. However, efficient utilization of the frequency resource is difficult because of spectrum scarcity and the conventional frequency regulation. Ad-hoc networks employing cognitive radio(CR) system that guarantee high spectrum utilization provide effective way to increase the network capacity. In conventional CR based ad-hoc network, it uses constant threshold value to detect primary user signal, so the results become not reliable. In this paper, to solve this problem, we apply adaptive threshold value to the CR based ad-hoc network, and adaptive threshold is immediately changed by SNR(Signal to Noise Ratio). From the simulation results, we confirmed that proposed algorithm has the greatly better detection probabilities than conventional CR based ad-hoc network.

Key words : Spectrum Sensing, Adaptive Threshold, Ad-Hoc Network, Cognitive Radio, Cluster Head

「이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(No. 2011-0025-983).」

광운대학교 전파공학과(Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University)

· Manuscript received February 03, 2012 ; April 4, 2012 ; April 13, 2012. (ID No. 20120203-014)

· Corresponding Author : Jin Young Kim (e-mail : jinyoung@kw.ac.kr)

I. 서 론

최근 무선 통신 서비스의 발달과 스마트 폰의 보급에 따른 데이터 트래픽 급증으로 주파수 자원의 부족현상이 나타나고 있다^[1]. 기존의 주파수 사용 정책은 각 나라별 주파수 정책에 따라서 법적으로 분배되어 주파수를 할당 받은 면허 사용자가 해당 주파수 사용에 관한 독점권을 가지고 있다. 즉, 면허 사용자에게 할당된 주파수는 현재 사용 중이지 않더라도 다른 사용자(주파수를 할당 받지 못한 비 면허 사용자)는 해당 주파수를 사용할 수 없다. 그러나 연방통신위원회(FCC: Federal Communications Commission)의 조사 결과에 따르면 면허 사용자에게 할당된 주파수 자원은 시간 및 위치에 따라 많게는 85%에 이르는 주파수 자원이 효율적으로 사용되지 않고 있다. 이와 같은 주파수의 비효율적 사용을 완화시키기 위해 주파수 자원의 효율적 사용에 대한 관심이 높아지고 있으며^{[2],[3]}, 이러한 주파수 사용의 활용을 높이고자, 인지 무선 시스템(Cognitive Radio System)은 J. Mitola에 의하여 제시된 주파수 공유기술이다. 즉, 면허 사용자가 사용하지 않는 유휴 주파수를 비 면허 사용자가 임시적으로 사용하도록 하는 시스템으로서, 주변의 상황을 탐색하고 변화된 상황에 시스템을 적절하게 적용하도록 하는 지능적인 차세대 무선 통신 시스템이다^{[4],[5]}.

기존의 구축되는 통신 인프라와 무관하게 이동노드들 간에 자율적으로 네트워크를 구성하여 네트워크에 자율성과 융통성을 부여한 네트워크가 ad-hoc 네트워크이다^[6]. 이러한 ad-hoc 네트워크는 음영 지역, 재난 지역 및 전쟁과 같은 통신 인프라 구축이 어려울 때 매우 유용하게 사용될 수 있다. 또한, 인지 무선 시스템에서의 기존의 통신 인프라가 존재하지 않는 비 면허 무선기기들 간의 임시적이며 즉흥적인 통신 환경 구축에도 유용하다. 주로 주파수 정책에 따라 주파수를 할당 받지 못한 비 면허 사용자는 소 출력 무선통신 기기 및 임시적으로 주파수를 할당 받아 사용하는 기기들로서, 이들이 주로 인지 무선 시스템의 서비스를 가장 많이 받을 것으로 예상된다. 하지만, 이러한 소 출력 무선통신 기기들로 ad-hoc 네트워크를 구성한다고 했을 때, 비 면허 사용 기기들이 개별적으로 주변 상황을 인지하고 유휴

주파수를 탐색하는 것은 오 검출 확률이 높아지게 되고, 신뢰성 측면에서 그 성능이 낮아지게 된다^{[6],[7]}.

이러한 인지 무선 시스템 기반 ad-hoc 네트워크에서 센싱을 할 경우, 기존의 정적인 임계치가 인해 신호 detection probability가 낮은 값을 보여줬지만, 센싱 성능 향상을 위해 정적인 임계치 값이 아닌 동적인 임계치 즉 adaptive threshold algorithm을 이용하여 수신 신호의 power에 따라 임계치가 바뀌면서 detection probability를 향상시킨다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 본 논문에서 제안한 인지 무선 기반 ad-hoc 네트워크에서 adaptive threshold를 이용한 시스템 모델에 대해 설명한다. 제 III장에서는 본 논문에서 제안한 기법에 대한 모의실험 결과를 보여주고, 마지막으로 본 논문의 결론을 제 IV장에서 언급하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 인지 무선 기반 애드혹 네트워크에서 adaptive threshold algorithm을 이용한 센싱 성능을 보여준다. 스펙트럼 센싱 성능은 검출 확률, 오류 검출 확률, false alarm 확률 등으로 구체화 할 수 있다. 오류 검출 확률은 주파수 대역에 Primary User (PU)가 존재하는데, 없다고 잘못 센싱 판단하는 것을 말한다. 이것과 반대로, false alarm 확률은 Secondary User(SU)가 PU가 존재하지 않는데, 존재한다고 센싱 판단하는 것을 말한다.

기존의 스펙트럼 센싱은 임계치(threshold)에 따라 주파수 대역을 사용할 수 있는지 없는지에 대한 여부를 판단을 한다. 이런 임계치는 정적으로 변하지 않는 값이다. 임계치가 정적이면 detection probability도 낮아지고, 시스템에 따라서 detection probability를 유동적으로 조절할 수가 없다. 센싱의 임계치가 높아지면 오류 검출 확률이 높아지고, false alarm 확률이 낮아진다. 오류 검출 확률과 false alarm 확률은 서로 trade-off 관계이기 때문에 이 두 가지를 서로 만족시킬 수 있는 임계치를 찾아야 한다. 이러한 점을 해결하고자 적응적 임계치(adaptive threshold)를 이용하여 detection probability를 높이고자 한다.

적응적 임계치는 수신 신호의 power에 따라 임계

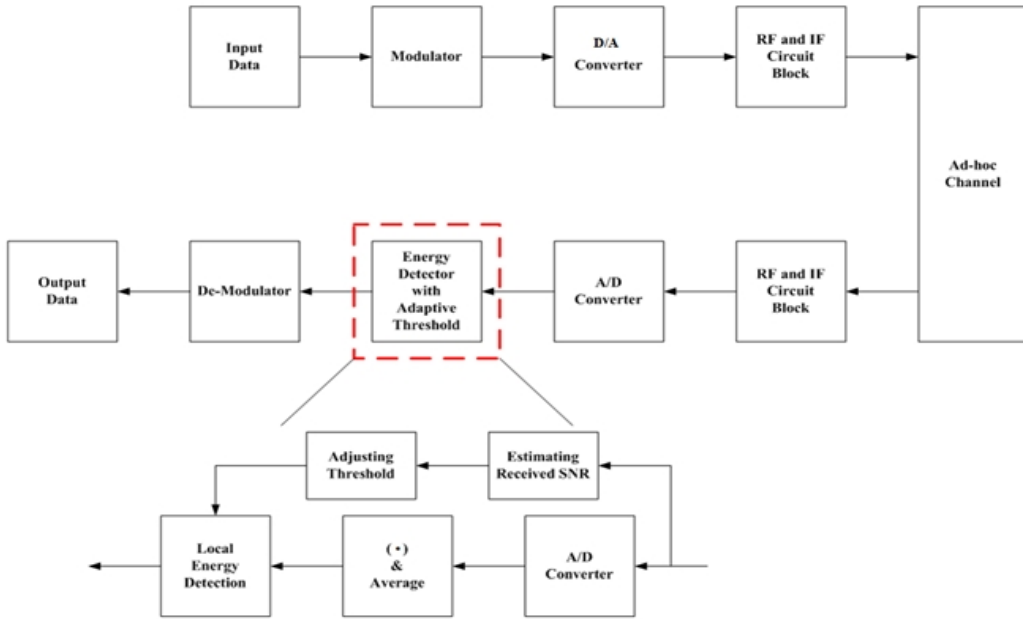


그림 1. Adaptive threshold algorithm을 적용한 CR 시스템 블록 다이어그램
 Fig. 1. Proposed CR system block diagram with adaptive threshold algorithm.

치가 가변적으로 변화시켜 주는 것을 의미한다. 수신 신호의 power 별로 신호가 가지는 에너지를 이용해서 임계치를 정하는 것이다. 그림 1은 adaptive threshold algorithm을 이용한 블록 다이어그램을 도식화 하였다. 데이터가 보내지면 변조가 되고 A/D converter를 통해 변환된다. 변환된 데이터는 RF and IF circuit block을 이용하여 ad-hoc channel로 통과된다. 통과된 데이터는 수신기에서도 송신기와 마찬가지로 RF and IF circuit block과 A/D converter를 거치고, 블록 다이어그램에서 보듯이 adaptive threshold를 이용한 energy detector를 할 것이다. 우선 수신 신호의 power를 검출한 후에 그 수신 신호의 power에 따라서 임계치를 변경해 가면서 energy detection을 수행하는 것이다. 수신 신호의 power가 좋으면 임계치를 낮추고, power가 안 좋으면 임계치를 높여서 센싱 성능을 보장해 주는 것이다.

임계치가 낮으면 false alarm 확률이 높아지고, false alarm 확률이 높아지면 detection probability가 높아져서 기존의 정적인 임계치보다 동적인 adaptive threshold를 이용하면 좋은 센싱 성능을 보일 수 있다. 본 논문에서 제안한 시스템 모델의 성능 분석은 아래와 같다^{[8]-[10]}.

1차 사용자가 주파수 대역을 사용 중인 경우를 H_1 이라 하고, 사용 중이지 않은 경우를 H_0 라 할 때, ad-hoc 네트워크내의 n 번째 CR 사용자로부터 수신된 신호 $y_n(k)$ 는 각각 식 (1) 및 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_1 : y_n(k) = h(k) \otimes s(k) + n(k) \quad (1)$$

$$H_0 : y_n(k) = n(k) \quad (2)$$

여기서 $h(k)$ 는 무선 채널의 impulse 응답이고, \otimes 는 컨볼루션(convolution) 연산을 나타낸다. 그리고 $n(k)$ 는 평균이 0 이고 분산이 σ_N^2 인 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)를 나타낸다. 무선 채널을 가우시안 채널로 가정하면 H_1 과 H_0 의 확률 밀도 함수(PDF: Probability Density Function)는 각각 식 (3) 및 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$f_{Y_n}(y|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \exp\left(-\frac{(y - \mu_s)^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (3)$$

$$f_{Y_n}(y|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (4)$$

여기서 μ_s 1차 사용자 신호의 평균값이다. Ad-hoc

네트워크 내의 각 CR 사용자로부터 수신된 신호는 신호처리를 거쳐서 local decision된 후, 이 결과들은 1차 사용자의 존재 유·무를 판단하는데 사용된다. Global decision에 사용되는 신호는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_U = \sum_{n=1}^N \hat{y}_n \quad (5)$$

여기서 \hat{y}_n 은 local decision 결과이다. 따라서 H_1 과 H_0 에서의 y_U 의 PDF는 각각 식 (6) 및 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{Y_U}(y|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_U^2}} \exp\left(-\frac{(y-\mu_U)^2}{2\sigma_U^2}\right) \quad (6)$$

$$f_{Y_U}(y|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_U^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_U^2}\right) \quad (7)$$

여기서 μ_U 와 σ_U^2 은 각각 \hat{y}_n 의 평균과 분산이다.

1차 사용자가 주파수 대역을 사용 중인 경우, 1차 사용자를 검출할 확률(detection probability)은 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_d &= \int_{\gamma(SNR)}^{\infty} f_{Y_U}(y|H_1) dy \\ &= \int_{\gamma(SNR)}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_U^2}} \exp\left(-\frac{(y-\mu_U)^2}{2\sigma_U^2}\right) dy \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $\gamma(SNR)$ 은 ad-hoc 네트워크 채널의 수신 신호 power에 따라 adaptive하게 update되는 임계값을 나타낸다. 식 (8)에서 $z = \frac{y-\mu_U}{\sigma_U}$ 로 치환하면, 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_d &= \int_{\frac{\gamma(SNR)-\mu_U}{\sigma_U}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \\ &= Q\left(\frac{\gamma(SNR)-\mu_U}{\sigma_U}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $Q(\cdot)$ 는 Q 함수를 나타낸다.

1차 사용자가 주파수를 사용하지 않는 경우, 오경보 확률(false alarm probability)은 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{fa} = \int_{\gamma(SNR)}^{\infty} f_{Y_U}(y|H_0) dy$$

$$= \int_{\gamma(SNR)}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_U^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad (10)$$

식 (10)에서 $z = \frac{y}{\sigma_U}$ 로 치환하면, 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{fa} &= \int_{\frac{\gamma(SNR)}{\sigma_U}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \\ &= Q\left(\frac{\gamma(SNR)}{\sigma_U}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

III. 모의 실험

본 논문에서는 표 1과 같은 실험 파라미터를 이용하여 실험하였다. 우선 채널 모델은 백색 잡음 채널(AWGN: Additive White Gaussian Noise)와 Rayleigh 채널 모델을 고려하였다. 오 경보 확률(FA probability)

표 1. 모의 실험 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

Parameters	Value
Channel model	AWGN / Rayleigh
FA probability	5 %, 10 %
Modulation scheme	BPSK
Combining method	EGC / MRC
Threshold method	Adaptive threshold

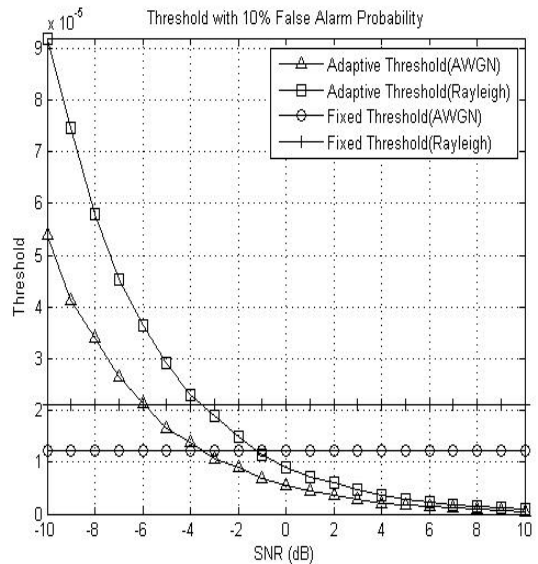


그림 2. 채널에 따른 threshold 그래프
Fig. 2. Threshold with channel model.

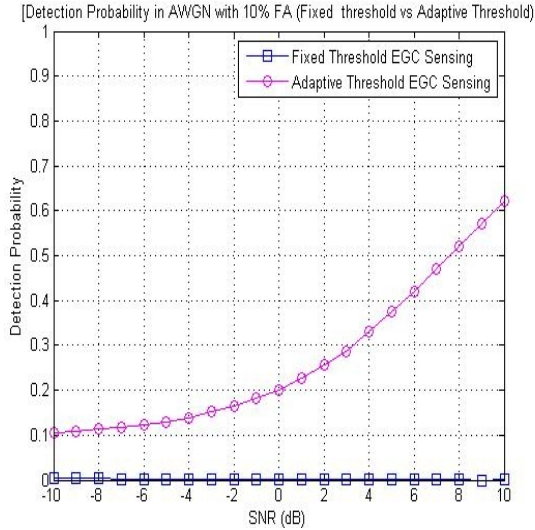


그림 3. AWGN 채널에서의 EGC를 이용한 threshold 적용 방식에 따른 신호 센싱 확률(FA=10 %) Fig. 3. EGC method in AWGN with 10 % FA.

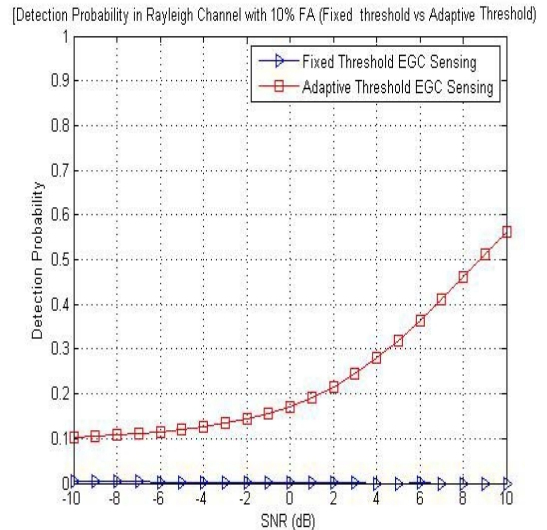


그림 4. Rayleigh 채널에서의 EGC를 이용한 threshold 적용 방식에 따른 신호 센싱 확률 (FA=10 %) Fig. 4. EGC method in Rayleigh channel with 10 % FA.

ty, false alarm probability)을 5 %, 10 %로 설정하였고, 각 인지 무선 기반 ad-hoc 네트워크 단말들의 변조 방식은 BPSK(Binary Phase Shift Keying)을 사용한다고 가정하였다. 그리고 CR기기가 센싱한 정보를 취합하는 방식으로 EGC(Equal Gain Combining), MRC(Maximum Ratio Combining)를 사용하였다. MRC와 EGC는 기본적인 다이버시티 개념이라 본 논문에서는 언급하지 않았고, 참고문헌을 참고 한다^[11]. 본 논문에서 제안한 adaptive threshold를 이용하여 수신 신호의 power에 따른 임계치(threshold) 적응적으로 변화시켜 실험하였다. 그림 2는 AWGN과 Rayleigh channel일 경우의 각각에 대한 FA 확률을 보여준다. 제안된 시스템은 그림 2의 threshold를 바탕으로 주 사용자의 신호를 검출하는 기준으로 삼는다.

그림 2에서 보이듯이, AWGN 채널에 비해 채널 상태가 좋지 않은 Rayleigh channel의 FA 확률이 높은 것을 알 수 있다. 이는 같은 조건, 즉 같은 수신 신호의 power에는 Rayleigh channel이 AWGN 채널에 비해 신호 검출 성능이 낮음을 알 수 있게 한다. 그림 3~6은 FA가 10 %일 때 AWGN 채널과 Rayleigh channel에서의 EGC와 MRC를 사용하여 실험한 결과 그래프들이다. 그림 3, 4는 combining method 중에 EGC를 사용하여 AWGN 채널과 Rayleigh channel

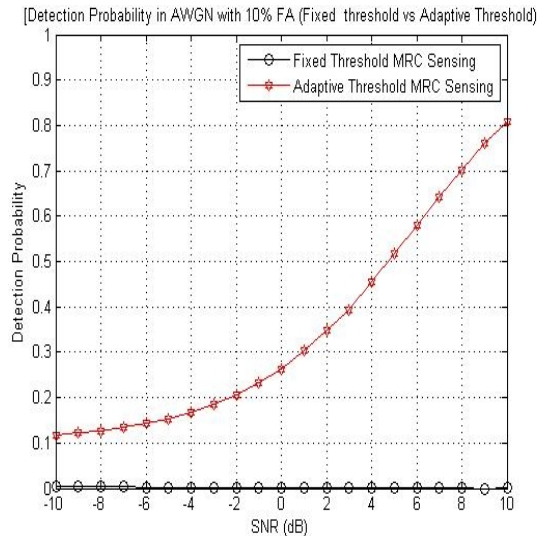


그림 5. AWGN 채널에서의 MRC를 이용한 threshold 적용 방식에 따른 신호 센싱 확률(FA=10 %) Fig. 5. MRC method in AWGN with 10 % FA.

에서의 실험값을 비교한 그래프들이다. 고정된 임계치가 수신 신호의 power 대비 detection probability가 어느 채널에서든 0으로 신호 검출이 되지 않지만, adaptive한 임계치는 수신 신호의 power 대비 detection probability가 상승하는 그래프를 볼 수 있다.

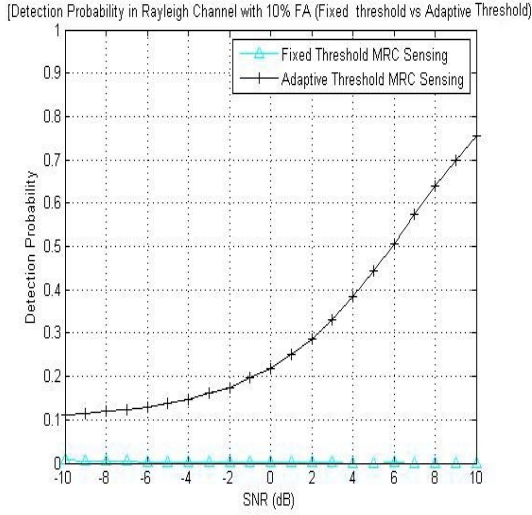


그림 6. Rayleigh 채널에서의 MRC를 이용한 threshold 적용 방식에 따른 신호 센싱 확률(FA=10%)

Fig. 6. MRC method in Rayleigh channel with 10% FA.

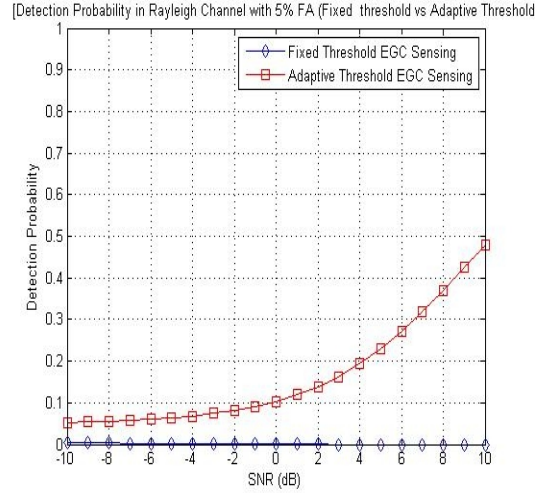


그림 8. Rayleigh 채널에서의 EGC를 이용한 threshold 적용 방식에 따른 신호 센싱 확률(FA=5%)

Fig. 8. EGC method in Rayleigh channel with 5% FA.

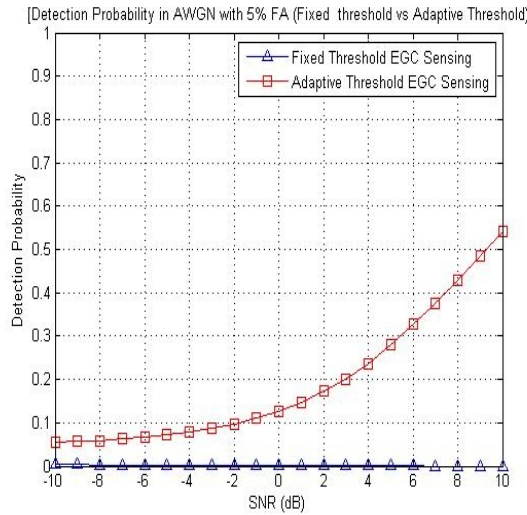


그림 7. AWGN 채널에서의 EGC를 이용한 threshold 적용 방식에 따른 신호 센싱 확률(FA=5%)

Fig. 7. EGC method in AWGN with 5% FA.

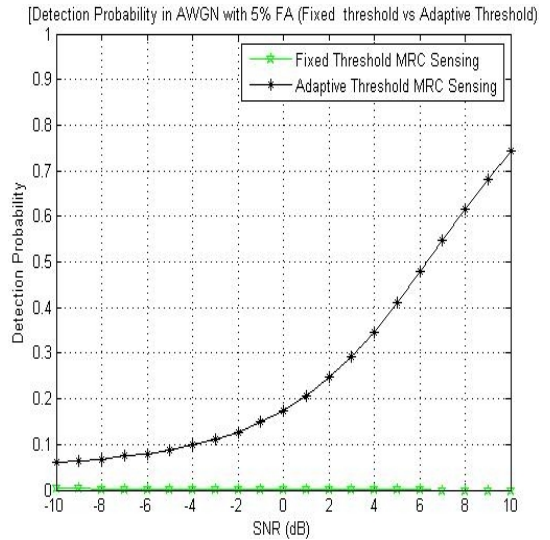


그림 9. AWGN 채널에서의 MRC를 이용한 threshold 적용 방식에 따른 신호 센싱 확률(FA=5%)

Fig. 9. MRC method in AWGN with 5% FA.

AWGN 채널에서 신호 검출이 높게 나타난 것을 볼 수 있는데, 페이딩이 심한 Rayleigh 채널에서도 adaptive threshold를 사용한 그래프 값이 AWGN 채널과 비슷한 신호 검출이 되었음을 보였다. 그림 5, 6은 MRC를 이용한 각 채널에서의 실험값을 비교하였다. 앞에 그림 3, 4의 사용하였던 EGC보다 MRC를

사용하였을 때 수신 신호의 power 대비 높은 신호 검출이 되는 것을 보였다.

그림 7~10은 FA를 여러 범위에서 제안한 알고리즘 성능을 확인하기 위해 FA이 5%일 때 실험한 결과 그래프이다. 그림 3~6의 FA 10%일 때보다는 수신 신호의 power 대비 detection probability가 약간

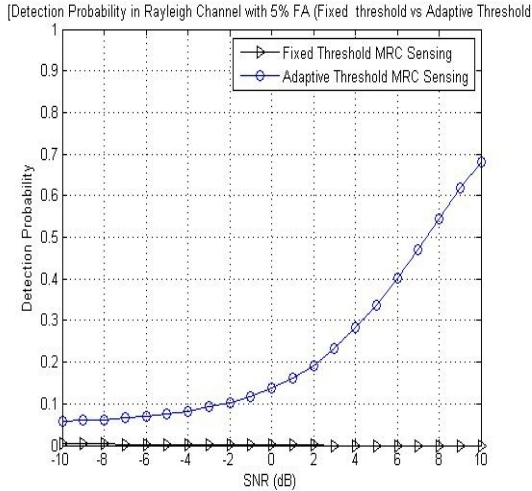


그림 10. Rayleigh 채널에서의 MRC를 이용한 threshold 적용 방식에 따른 신호 센싱 확률 (FA=5%)
 Fig. 10. MRC method in Rayleigh channel with 5% FA.

낮지만, FA이 5%일 때나 10%일 때 모두 고정된 threshold보다 제안한 adaptive threshold의 detection probability가 월등히 높은 결과값을 보였다. 그림 7, 8은 각 채널에 따른 EGC를 이용한 실험 결과 그래프이다. FA이 10%일 때와 채널이 다르더라도 고정된 threshold보다는 adaptive threshold 값의 신호 검출 확률이 더 높게 나온 것을 확인할 수 있었다. 그림 9, 10은 EGC가 아닌 MRC를 사용하였다. EGC를 사용하였을 때보다는 MRC를 사용하였을 때 시스템의 신호 검출 성능이 우수함을 보였다. 앞선 실험 결과들을 살펴보면, 고정된 threshold를 이용하였을 경우, detection probability가 모두 0에 근접하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 2에서 보이듯이, SNR이 -4 dB 이하일 때, 사이에서 고정된 threshold의 크기가 adaptive한 threshold의 크기보다 작게 된다. 에너지 검출의 경우 1차 사용자의 수신 신호의 에너지만을 가지고 신호 검출을 하는 것이기 때문에, -4 dB 이하의 SNR 환경에서는 낮은 크기의 threshold로 신호를 검출할 수가 없다. 이와는 반대로, 0 dB 이상의 SNR 환경에서는, 신호의 크기는 고정되어 있다고 할 때, 노이즈 성분이 신호 크기에 비례해서 작아지기 때문에, 신호의 크기보다 더 큰 threshold를 가지고 신호 검출을 할 경우, 본 논문의 실험 결과에서처럼 신호

검출이 제대로 되지 않는다. 따라서, CR 기반 ad-hoc 네트워크에서는 비교적 단순한 에너지 검출 기법이 가장 많이 사용되고 있고, 본 논문의 결과에서처럼 신호 검출이 거의 되지 않는 것을 막기 위해 다양한 연구가 진행 중이지만, 이러한 상황에서 시스템 복잡도를 크게 증가시키지 않으면서 신호 검출 확률을 높일 수 있는, 본 논문에서 제안한 adaptive threshold를 갖는 기법이 CR 기반 ad-hoc 네트워크에서의 한 가지 해법이 될 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 주파수 부족 및 소 출력 무선통신 기기의 통신 인프라 구축 없이 스펙트럼을 사용하게 하기 위한 인지 무선 기반 ad-hoc 네트워크에서 신호 검출 성능을 향상시키기 위한 방법을 제안하였다. 고정된 threshold 복잡도는 adaptive threshold의 복잡도보다 낮지만 신호 검출 확률이 현저히 낮고, energy detection이 ad-hoc 네트워크에서는 워낙 성능이 안 좋기 때문에, 조금 복잡하더라도 고정된 threshold보다 논문에서 제안한 adaptive threshold 기법을 이용하는 것이 detection probability를 높이는데 좋다. 인지 무선 기반 ad-hoc 네트워크에서 adaptive threshold 기법을 이용하여 시스템의 신호 검출 성능이 우수함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. Y. Kim, *Cognitive Radio Systems*, Gyobo Publishers, Seoul, Korea, 2008.
- [2] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered-wireless communications", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-219, Feb. 2005.
- [3] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. Vuran, and S. Mohant, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey", *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127-2159, May 2006.
- [4] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios", *38th Annual Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Nov. 2004.

- [5] J. Mitola III, G. Q. Maguire Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal", *IEEE Personal Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [6] Charles E. Perkins, *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley, 2001.
- [7] C. K. Toh, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems*, Prentice Hall PTR, 2002.
- [8] J. Zhu, Z. Xu, F. Wang, B. Huang, and B. Zhang, "Double threshold energy detection of cooperative spectrum sensing in cognitive radio", *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, p. 15, May 2008.
- [9] A. Gorcin, A. Q. Khalid, H. Celebi, and H. Arslan, "An adaptive threshold method for spectrum sensing in multi channel cognitive radio networks", in *Proc. IEEE 17th International Conference on Telecommunications(ICT)*, Doha, Qatar, pp. 425-429, Apr. 2010.
- [10] J. W. Lee, J. H. Kim, H. J. Oh, and S. H. Hwang, "Energy detector using adaptive-fixed threshold in cognitive radio systems", In *Proc. 14th Asia-Pacific Conference on Communications*, Tokyo, Japan, pp. 1-4, Oct. 2008.
- [11] T. S. Rappaport, *Wireless Communications - Principles and Practice*, Prentice Hall, 1996.

이 경 선



2011년: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2011년~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] 디지털 통신, 협력통신, 인지 무선 통신

김 진 영



1998년: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
 2000년: 미국 Princeton University, Research Associate
 2001년: SK 텔레콤 네트워크연구원 책임연구원
 2009년: 미국 M.I.T 공대 Visiting Scientist

2001년~현재: 광운대학교 전자융합공학과 교수
 [주 관심분야] 전력선 통신, 스마트 그리드, 가시광 통신, UWB, LED-ID, DMB, RFID/USN 기술, 이동무선통신, 통방융합기술, 인지 무선 통신

김 윤 현



2006년: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2008년: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2008년~현재: 광운대학교 전파공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전력선통신, 가시광 통신, 협력통신, 인지 무선 통신