

논문 2010-47TC-8-6

인지 무선 시스템에서 스펙트럼 감지를 위한 적응 에너지 검파

(Adaptive Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio)

임 창 현*

(Chang Heon Lim)

요 약

에너지 검파 형태의 스펙트럼 감지는 수신 신호의 에너지를 검파 임계값과 비교하여 1차 사용자(primary user)의 활동 여부를 탐지한다. 그런데 이때 임계값은 달성하고자 하는 오류 경보 확률 및 잡음의 에너지 수준과 밀접한 관련을 갖는다. 따라서 만약 잡음의 에너지 수준이 변한다면 임계값도 조정되어야 한다. 현재까지 발표된 에너지 검파에 대한 연구들은 대부분 잡음의 에너지 수준을 이미 알고 있다는 것을 전제로 한 것이었다. 본 논문에서는 잡음의 백색성을 전제로 하여 임계값을 조절하는 방안을 제안하고, 그에 따른 검파 성능 분석 결과를 제시하고자 한다. 분석 결과, 제안한 방식은 잡음 에너지 수준과는 상관없이 일정한 오류 경보 확률을 달성할 수 있으며, 잡음 에너지를 추정하는데 사용되는 신호의 대역폭과 에너지 측정 기간의 곱이 커질수록 스펙트럼 감지 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

Abstract

Energy detection based spectrum sensing compares the energy of a received signal from a primary user with a detection threshold and decides whether it is active or not in the frequency band of interest. Here the detection threshold depends on not only a target false alarm probability but also the level of the noise energy in the band. So, if the noise energy changes, the detection threshold must be adjusted accordingly to maintain the given false alarm probability. Most previous works on energy detection for spectrum sensing are based on the assumption that noise energy is known a priori. In this paper, we present a new energy detection scheme updating its detection threshold under the assumption that the noise is white, and analyze its detection performance. Analytic results show that the proposed scheme can maintain a target false alarm rate without regard to the noise energy level and its spectrum sensing performance gets better as the time bandwidth product of the signal used to estimate the noise energy increases.

Keywords : cognitive radio, spectrum sensing, energy detection, adaptive detection, CFAR

I. 서 론

인지 무선(cognitive radio) 시스템^[1]은 스펙트럼 감지(spectrum sensing) 기능을 활용하여 1차 사용자(primary user)가 해당 대역에서 활동하고 있는 지 여부를 파악한 후에, 사용하고 있지 않다고 판단되면 해당 주파수 대역을 이용하는 무선 통신 시스템이다. 이 시스템을 사용하여 보다 유연한 주파수 접근(opportunistic spectrum access) 개념을 실현한다면 고

정 주파수 할당 정책으로 인해 초래되는 비효율적인 주파수 이용 문제를 해결할 수 있으며, 동시에 통신 서비스 확대에 의해 야기되는 주파수 자원 고갈 문제를 해소할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

인지 무선 시스템에서 사용하는 스펙트럼 감지 방식^[2]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 1차 사용자의 신호에 대한 정보를 거의 필요로 하지 않고 구현이 간단하다는 장점 때문에 많은 관심을 모으고 있다.

에너지 검파 방식을 사용하려면 1차 사용자가 해당

* 평생회원, 부경대학교 전자공학과
(Pukyong National University)

접수일자: 2010년4월14일, 수정완료일: 2010년8월13일

대역을 사용하지 않는 상황에서 수신하는 신호, 즉 잡음의 에너지 수준을 정확하게 아는 것이 중요하다. 왜냐하면 이를 근거로 검파 임계값을 설정하기 때문이다. 지금까지는 이를 알고 있다는 전제하에서 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 실제 환경에서는 잡음 환경이 시간에 따라 변할 수 있고, 2차 사용자(secondary user)의 단말기마다 다를 수 있기 때문에 만약 이를 감안하지 않고 일정한 검파 임계값을 사용한다면 그로 인해 발생하는 스펙트럼 감지 성능의 손실을 피할 수 없다. 이런 현상과 관련하여 [3]에서는 잡음에 대한 불확실성이 있을 때 검파기의 관측 시간을 늘리더라도 검파 성능이 개선되지 않는 상황이 생긴다는 사실을 이론적으로 설명한 바가 있다. 그리고 [4]와 [5]에서는 잡음 전력의 불확실성으로 인한 검파 성능의 저하를 줄이기 위하여 개별 2차 사용자의 단말기별로 여러 개의 임계값을 사용하고, 이들 단말기의 검파 결과를 수집하여 최종적으로 결정하는 협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing) 방식을 사용하는 방안을 제안한 바가 있다. 본 논문에서는 개별 단말기 차원에서 발생하는 잡음을 백색 잡음이라고 가정할 때 이를 이용하여 검파 임계값을 조정하는 방안을 제안하고, 그 성능을 분석하고자 한다.

본 논문에서는 I 장 서론에 이어 II 장에서는 본 논문에서 제안하는 스펙트럼 감지 시스템의 구조에 대해서 기술하고, III 장에서는 그에 대한 스펙트럼 감지 성능을 수학적으로 분석한다. 그리고 IV 장에서는 수치 분석 사례를 제시하고, 마지막으로 V 장에서 결론을 맺고자 한다.

II. 시스템 구성

본 논문에서 제안하는 시스템의 구성은 그림 1에 나타낸 바와 같다. 먼저 수신 잡음의 에너지를 측정하는 별도의 주파수 대역 B_R 을 설정하고, 이 대역은 어떤 단말기도 사용하지 않는 것으로 한다. 그리고 수신기에서 발생하는 열잡음(thermal noise)은 전력 스펙트럼 밀도의 특성이 백색 잡음(white noise)과 유사하다는 사실을 고려하여, B_R 대역의 잡음 전력 스펙트럼 밀도는 인지 무선 시스템이 사용하는 주파수 대역 B_C 의 전력 스펙트럼 밀도와 같다고 가정한다. 그러면 B_R 대역의 잡음 전력에 대한 B_C 대역의 잡음 전력은 일정한 비율

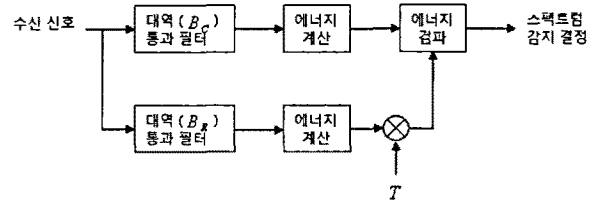


그림 1. 시스템 구조
Fig. 1. System model.

을 유지하기 때문에, 그림 1에서 보는 바와 같이 B_R 대역을 통해 수신한 신호를 사용하여 잡음의 에너지를 측정하고, 이를 토대로 B_C 대역에서 사용할 검파 임계값을 결정할 수 있다^[6].

2차 사용자가 B_C 대역을 이용하기 위해서는 1차 사용자가 B_C 대역을 사용하는 지 여부를 파악해야 한다. 이때 1차 사용자가 활동하는 경우를 가설 H_1 , 그렇지 않은 경우를 가설 H_0 라고 하면, 2차 사용자가 수신하는 신호 $r_C(t)$ 는 어느 가설이 유효하냐에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_C(t) = \begin{cases} \alpha s(t) + w(t), & H_1 \\ w(t), & H_0 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 $s(t)$ 은 1차 사용자 신호를 나타내고, $w(t)$ 는 대역폭인 W_C 인 대역 통과 신호(bandpass signal)로서 평균이 0이고 통과 대역 내의 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 가우시안 잡음을 나타낸다. 여기에서 잡음의 대역폭을 제한한 것은 수신 필터의 특성을 반영한 것이다. 그리고 α 는 1차 사용자 송신기와 2차 사용자 단말기 사이에 존재하는 채널의 이득을 나타내는 것으로, 본 논문에서는 이 채널을 레일리(Rayleigh) 채널이라고 가정한다.

한편, B_R 대역에서는 잡음만 존재하므로 수신 신호 $r_R(t)$ 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_R(t) = n(t) \quad (2)$$

위 식에서 $n(t)$ 는 대역폭인 W_R 인 대역 통과 신호(bandpass signal)로서 평균이 0이고 통과 대역 내의 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 가우시안 잡음이다.

III. 성능 분석

1. 오류 경보 확률

B_R 대역의 수신 신호 $r_R(t)$ 로부터 B_C 대역의 잡음 에너지를 추정하는데 사용할 시험 통계값(test statistic) Y 를 다음과 같이 정의한다^[7].

$$Y = \int_0^{T_R} r_R^2(t) dt \quad (3)$$

위 식에서 T_R 은 $r_R(t)$ 의 에너지를 측정하는 시간을 가리킨다. 이때 $T_R W_R$ 의 값을 정수 N_R 으로 근사화하면, Y 는 $\alpha = N_R$, $\beta = N_0$ 인 감마 분포(gamma distribution)를 따른다^[8-9].

임의의 확률 변수 X 의 확률 밀도 함수를 $f_X(x)$ 라고 표현할 때, X 에 대한 MGF(moment generating function) $M_X(z)$ 를 다음과 같이 정의하면

$$M_X(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-zx} dx \quad (4)$$

Y 는 감마 분포를 따르기 때문에 $M_Y(z)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다^[8].

$$M_Y(z) = (1 + N_0 z)^{-N_R} \quad (5)$$

한편, B_C 대역의 수신 신호로부터 스펙트럼 감지에 사용할 시험 통계량 X 를 다음과 같이 정의한다.

$$X = \int_0^{T_C} r_C^2(t) dt \quad (6)$$

1차 사용자가 활동하지 않을 때는 $r_C(t) = w(t)$ 가 되고, $w(t)$ 와 $n(t)$ 가 유사한 통계적 특성을 갖고 있기 때문에 시험 통계량 X 는 Y 와 동일한 통계적 분포를 갖는다. 식(3)에서와 마찬가지로 $T_C W_C$ 의 값을 정수 N_C 로 근사화할 때, X 는 $\alpha = N_C$, $\beta = N_0$ 인 감마 분포(gamma distribution)를 따른다. 그리고 X 의 MGF를 $M_X(z)$ 라고 하면

$$M_X(z) = (1 + N_0 z)^{-N_C} \quad (7)$$

가 된다.

일반적으로 스펙트럼 감지에 사용되는 검파 임계값은 목표로 하는 오류 정보 확률과 잡음 에너지에 따라 달라진다. 본 논문에서 제안한 방식에서는 시험 통계량 Y 가 시험 통계량 X 와 일정한 비율을 갖는다는 점에 착안하여 시험 통계량 Y 에 임의의 값 T 를 곱하여 스

펙트럼 감지에 사용할 임계값을 결정하고자 한다^[6]. 이때 T 의 값은 달성하고자 하는 오류 정보 확률에 의해서만 결정된다는 것을 예상할 수 있다.

그럼 1의 시스템에 대하여 오류 정보 확률 P_{FA} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA} = \int_0^{\infty} f_Y(y) \int_{T_y}^{\infty} f_X(x) dx dy \quad (8)$$

이때 [6]의 결과를 활용하면 식(8)의 적분을 다음과 같이 유수 정리(residue theorem)를 사용하는 형태로 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{FA} &= - \sum_{k_0} \text{res} \left[M_X(z) \frac{M_Y(-Tz)}{z}, z_{k_0} \right] \\ &= \sum_{m=0}^{N_C-1} \binom{N_R+m-1}{m} \frac{T^m}{(1+T)^{N_R+m}} \end{aligned} \quad (9)$$

위 식에서 z_{k_0} 는 $M_X(z)$ 의 극(pole)을 나타낸다. 식(9)에서 볼 수 있는 바와 같이 오류 정보 확률 P_{FA} 는 T 에 따라 그 값이 달라지는 형태가 되고, 잡음 전력 밀도와는 관련이 없음을 확인할 수 있다. 따라서 달성하고자 하는 오류 정보 확률이 주어지면 그에 따라 T 를 결정할 수 있으며, 잡음의 전력 밀도가 변하더라도 오류 정보 확률에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

2. 검파 확률

1차 사용자가 활동할 때는 수신 신호 $r_C(t) = \alpha s(t) + w(t)$ 가 된다. 신호 $s(t)$ 의 에너지를 E_s 라고 나타내고, 신호 대 잡음 전력비를 나타내는 γ 를 $\alpha^2 E_s / N_0$ 로 정의하면, γ 가 주어진 상태에서 시험 통계량 X 의 MGF $M_X(z|\gamma)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_X(z|\gamma) = \frac{1}{(1 + N_0 z)^{N_C}} \exp\left(-\frac{N_0 \gamma z}{(1 + N_0 z)}\right) \quad (10)$$

앞에서 언급한 바와 같이 1차 사용자 송신기와 인지 무선 단말기 사이의 채널이 레일리 페이딩(Rayleigh fading)을 따른다면 γ 의 확률 밀도 함수 $f_\gamma(\gamma)$ 는 다음과 같은 형태가 되어야 한다.

$$f_\gamma(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right) & \gamma \geq 0 \\ 0 & \gamma < 0 \end{cases} \quad (11)$$

위 식에서 $\bar{\gamma}$ 는 γ 의 평균값이다. 따라서 식(10)와 식(11)로부터 $M_X(z)$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M_X(z) = \int_{-\infty}^{\infty} M_X(z|\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma$$

$$= \frac{1}{(1 + N_0 z)^{N_C - 1} (1 + (1 + \bar{\gamma}) N_0 z)}$$
(12)

한편, 그림 1의 시스템에 대한 검파 확률 P_D 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_D = \int_0^{\infty} f_Y(y) \int_{T_y}^{\infty} f_X(x) dx dy$$
(13)

여기에 식(9)를 유도할 때 사용했던 방법을 적용하면, 검파 확률 P_D 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_D = - \sum_{kl} \text{res} \left[M_X(z) \frac{M_Y(-Tz)}{z}, z_{kl} \right]$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{\left(1 + \frac{T}{1 + \bar{\gamma}}\right)^{N_R}} & N_C = 1 \\ \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{1 + \bar{\gamma}}\right)^{N_C - 1} \left(1 + \frac{T}{1 + \bar{\gamma}}\right)^{N_R}} \\ - \frac{1}{1 + \bar{\gamma}} \sum_{m=0}^{N_C - 2} \left(1 + \frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{N_C - m - 1} \\ \times \sum_{l=0}^m \binom{N_R + l - 1}{l} \frac{T^l}{(1 + T)^{N_R + l}} & N_C \geq 2 \end{cases}$$
(14)

위 식에서 z_{kl} 는 $M_X(z)$ 의 극(pole)을 나타낸다.

IV. 수치 분석 사례

III장에서 유도한 분석 결과를 토대로 스펙트럼 감지 성능 분석 사례를 제시하고자 한다. 먼저 분석 환경을 설정하기 위하여 신호 대 잡음비의 평균값 $\bar{\gamma} = 0$ dB, $N_C = 10$ 으로 하고, 목표로 하는 오류 정보 확률 $P_{FA} = 10^{-3}$ 으로 가정하였다.

그림 2는 고정된 검파 임계값을 사용하는 방식에서 검파 임계값에 오차가 있을 경우에 그것이 실제 오류 정보 확률에 어떠한 영향을 미치는 가를 보여주고 있다. 그림에서 dev값은 실제 검파 임계값에서 정확한 검파 임계값을 뺀 결과를 정확한 검파 임계값으로 나눈 값인데, 그림에서 보는 바와 같이 dev값이 0과 차이가 많이 날수록 오류 정보 확률이 목표값과 많이 달라진다

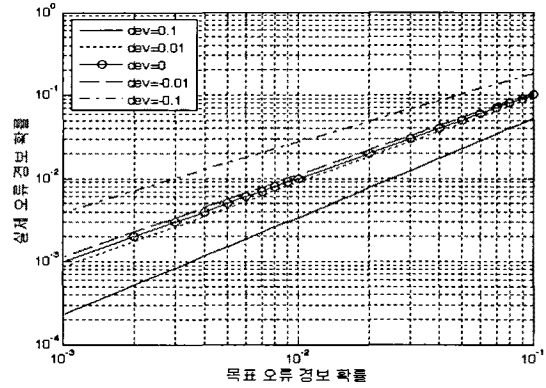


그림 2. 고정 검파 임계값을 사용하는 방식에서 검파 임계값의 오차에 따른 영향

Fig. 2. Effects of detection threshold error in a fixed detection threshold based system.

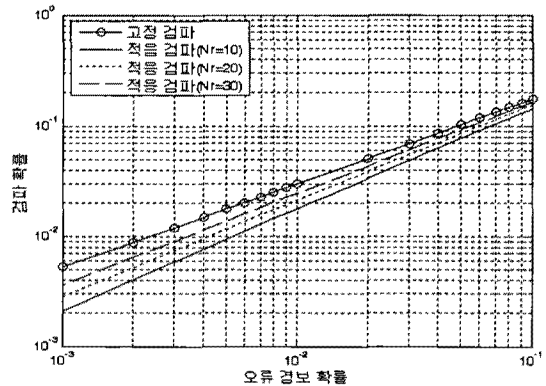


그림 3. 고정 검파 임계값을 사용하는 방식과 적응 임계값을 사용하는 방식 비교

Fig. 3. Comparison of the adaptive detection threshold based system with the fixed detection threshold based system.

는 것을 알 수 있다.

그림 3은 고정된 검파 임계값을 사용하는 방식과 적응 검파 임계값을 사용하는 방식간의 검파 성능을 비교한 것이다. 이때 고정된 검파 임계값을 사용하는 방식은 이상적인 임계값을 사용하는 것으로 가정한다. 그림에서 보는 바와 같이 적응 검파 임계값을 사용하는 방식은 고정된 검파 임계값을 사용하는 방식보다 검파 성능이 떨어지지만, N_R 값을 증가시키면 그 격차가 줄어들음을 확인할 수 있다. 이는 N_R 이 커질수록 잡음의 에너지 수준에 대한 추정 오차가 줄어들기 때문이다. N_R 은 T_R 와 W_R 의 곱이기 때문에 N_R 을 크게 하려면 T_R 을 길게 하거나 W_R 을 크게 하면 된다. 또한 이 관계는 N_R 이 주어졌을 때 스펙트럼 감지에 소요되는 시간을

줄이기 위해서는 B_R 의 대역폭을 크게 해야 하고, 반대로 스펙트럼 감지에 소요되는 대역폭 W_R 을 줄이려면 스펙트럼 감지에 필요한 시간 T_R 을 늘려야 한다는 것을 의미하므로 결과적으로 T_R 과 W_R 을 교환할 수 있다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 수신 잡음의 에너지 수준을 추정하여 이를 토대로 에너지 검파를 수행하는 방식을 제안하고 그 성능 분석 결과를 제시하였다. 제안한 방식은 잡음의 전력 밀도가 모든 주파수에서 동일하다는 전제에 기초한 것으로서, 잡음 전력만을 추정하기 위한 별도의 주파수 대역을 설정해두고 이를 활용하여 인지 무선 시스템이 사용하는 대역의 잡음 에너지를 추정하는 방식이다. 분석 결과, 제안한 방식은 잡음 에너지 수준과는 상관없이 일정한 오류 경보 확률을 달성할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 별도로 설정한 대역의 대역폭과 잡음 에너지 측정 기간의 곱이 커질수록 스펙트럼 감지 성능이 향상되며 궁극적으로는 정확한 검파 임계값을 사용하는 방식의 검파 성능에 수렴한다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] R. Tandra and A. Sahai, "SNR Walls for Signal Detection," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.2, no.1, pp.4-17, Feb. 2008.
- [4] D. Chen, J. Li and J. Ma, "Cooperative Spectrum Sensing under Noise Uncertainty in Cognitive Radio," *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp.1-4, Oct. 2008.
- [5] C. Song, Y. D. Alemseged, H. N. Tran, G. Villardi, C. Sun, S. Filin, and H. Harada, "Adaptive Two Thresholds Based Energy Detection For Cooperative Spectrum Sensing," *Consumer Communications and Networking*

Conference, pp.1-6, Jan. 2010.

- [6] X. Y. Hou, N. Morinaga, and T. Namekawa, "Direct Evaluation of Radar Detection Probabilities," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 418-424, July 1987.
- [7] H. Urkowitz, "Energy Detection of Unknown Deterministic Signals," *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-532, April 1967.
- [8] A. D. Whalen, *Detection of Signals in Noise*, Academic Press, Inc., 1971.
- [9] V. K. Rohatgi, *An introduction to Probability Theory and Mathematical Statistics*, John Wiley & Sons, Inc., 1976.

저 자 소 개



임 창 현(평생회원)

1986년 서울대학교 전자공학과 학사

1988년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사

1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사

1994년~현재 부경대학교 전자공학과 교수

<주관심분야:통신, 레이더 신호처리>