

협력 스펙트럼 센싱에서 검출 에러를 최소화 하는 최적의 부사용자수의 임계값

*유정준, **이재영, ***허 준

*고려대학교, **고려대학교, ***고려대학교

*never07@korea.ac.kr, **jy4213@korea.ac.kr, ***junheo@korea.ac.kr

Optimal threshold number of secondary users for minimizing detection error probability in cooperative spectrum sensing

*You Chong-joon, **Lee jaeyoung, ***Heo jun

*Korea University, **Korea University ***Korea University

요약

Cognitive Radio(CR)기술은 주파수 자원을 효율적으로 이용하기 위해 Joseph Mittra가 개념을 적립한 것으로 유비쿼터스 시대의 부족한 주파수 자원을 극복 할 수 있는 기술로 각광받고 있다. 이와 같은 무선인지 기술(CR)을 도입하기 위한 핵심적인 요소는 부사용자(Secondary User)가 주사용자(Primary User)의 통신을 방해하지 않도록 주파수 점유 여부를 정확하게 판단 하는 Spectrum Sensing기술이다. 이 스펙트럼 센싱 기술에 두 가지 종류의 에러가 발생하는데 하나는 미검출 오류(miss error)이고 또 하나는 오경보 오류(false alarm error)이다. 따라서 본 논문은 이 두 가지를 합친 검출 오류(detection error)를 최소화 하기위해 협력 스펙트럼 센싱(Cooperative spectrum sensing)에서 몇 명 이상의 부사용자가 주사용자가 사용중이라 검출하였을 때 최종 결정이 주사용자가 사용한다고 결론 짓는 것이 최적인지를 수학적으로 분석하고 그 최적의 K값을 사용하여 전체 시스템의 성능을 향상 시키는 방법을 제시 한다.

1. 서론

현재의 무선통신 기술은 언제 어디서 누구와 어떤 정보든지 주고 받을 수 있는 것이 가능한 유비쿼터스 네트워크를 지향하는 방향으로 연구 및 발전을 해나가고 있다. 하지만 종래의 전화 이용이 이동통신 및 방송에서 이제는 교통, 의료, 과학, 치안에 이르기까지 생활 전 영역으로 확대됨에 따라 주파수 자원에 대한 요구가 급증하고 있으며 무선 통신 기술의 발전은 이러한 주파수 자원 수요의 증가를 가속화 시키고 있다. 이러한 주파수 부족 문제 해결과 주파수 이용 효율 극대화를 위해 실제로 사용되지 않고 비어 있는 주파수를 찾아서 통신하는 무선인지 기술이 주목 받고 있다.[1] 특히 무선인지 기술중에서도 스펙트럼 센싱 기술은 부사용자가 주변의 전파환경을 감지하여 비어있는 스펙트럼을 찾아내는 기술로 CR기술의 근간을 이룬다.

이러한 스펙트럼 센싱의 방법은 정합필터(matched filter), 신호 형태 검출(signal feature detection), 에너지 검출(energy detection)등이 있는데 전송될 신호의 형태를 모르는 경우에도 구현이 가능하며 그 복잡도와 센싱 시간을 고려할 때 에너지 검출 방법이 가장 적합하다. 하지만 부사용자 하나가 독립적으로 스펙트럼 센싱을 수행한다면 Hidden Node문제, 웨도우 페이딩 문제, 멀티패스 페이딩 문제 등이 발

생하여 정확히 검출해내지 못하는 경우가 발생 할 수 있다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해 부사용자가 개별적으로 센싱한 결과를 융합센터(Fusion Center)에서 공유하여 스펙트럼 점유 여부를 판단하고 수행하는 협력 스펙트럼 센싱(Cooperative Spectrum Sensing) 기술이 대두되었다.[3] 협력 스펙트럼 센싱은 여러 부사용자가 관측한 결과를 일단 융합센터에 전송하고 융합센터에서 이를 바탕으로 최종 판정을 내리는 연관정(soft decision)과 각 부사용자가 일차적으로 스펙트럼 사용 여부를 판단하고 그 결과를 융합센터에 전송하여 최종 판정을 내리는 경관정(hard decision)이 있다. 하지만 CR부사용자의 연관정 개별값을 융합센터에 보내게 되면 이로 인해 주파수 효율이 떨어지므로 경관정 협력 스펙트럼 센싱이 보다 일반적이다.

이와 같은 경관정 협력 스펙트럼 센싱에서 해당 주파수 대역이 비어있는지 사용되고 있는지를 판단하는 기준은 에너지 검출시의 임계값(threshold) 'X'를 기준으로 결정 된다. 즉 에너지가 'X'보다 크면 그 주파수 대역이 사용되어지고 있다는 '1'을 'X'보다 작으면 사용하고 있지 않다는 '0'을 전송하여 결정을 내리게 된다. 그리고 융합센터에서는 부사용자가 보내준 CR정보 '0'혹은 '1'을 가지고 융합센터에서 사용하고 있는 융합 룰을 사용하여 최종 결정을 내린다. 일반적으로 N개의 부사용자가 가운데 K명 이상이 '1'이라는 정보를 보냈을 경우 융합센터에서는 최종 결론을 주파수 대역이 사용되어지고 있다는 '1'을 그렇지 않은 경우는 '0'으로 결정 한다.

따라서 본 논문에서는 AWGN채널 상황에서 N명의 부사용자 가운데 몇 명 이상의 부사용자가 '1'이라는 정보를 전송해야 최종 결정을

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음
(NIPA-2010-C1090-1031-0009)

주파수 대역이 사용되어 진다고 결론 짓는 것이 검출 에러를 최소화하는데 최적인지 최적의 K값을 결정하는 방법에 대해 수학적으로 알아본다.

2. 센싱 모델

무선인지 시스템에서 주파수를 결정하기 전에 그 주파수 대역이 사용되는지의 여부를 판단하는 것이 중요하기 때문에 스펙트럼 센싱이 CR에서 매우 중요하다. 앞서 언급했듯이 센싱 방법은 에너지 검출 방법을 사용하므로, 수신된 신호의 에너지를 측정하여 정해져 있는 임계값 ' λ '와 비교하여 결정하게 되며 이를 2진 가설 검증(binary hypothesis testing)으로 다음과 같이 표현 된다.

$$P_f = P(Y > \lambda | H_0) \quad (1)$$

$$P_d = P(Y > \lambda | H_1) \quad (2)$$

여기서 P_f 는 오경보 확률(false alarm Probability)이며 H_0 는 주파수가 사용되지 않는 비어있는 상황이다. 마찬가지로 P_d 는 검출 확률(detection Probability)이며 H_1 는 주파수 대역이 주사용자에 의해 사용되어지고 있는 상황을 의미한다. 이 2진 가설 검증으로부터 우리는 CR 스펙트럼 검출의 에러를 최소화하는 것이 목적이므로 전체 에러 발생 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_e \triangleq P(H_1)(1 - P_d) + P(H_0)P_f \quad (3)$$

여기서 $P(H_1)$ 은 주사용자가 해당 주파수 대역을 사용하고 있을 확률이고 $P(H_0)$ 는 사용하고 있지 않을 확률이다. 그랬을 경우 주사용자가 수신한 신호 Y 는 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$y = \begin{cases} n(t) & H_0 \\ h_s(t) + n(t) & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise)이고 h 는 주사용자(PU)와 부사용자(SU) 사이의 채널 이득을 의미 한다. 수신된 신호를 제공하고 적분하면 그 신호의 에너지를 측정하면 에너지 검출 이론에 따라 Y 값은 다음과 같은 분포를 띄게 된다.[4]

$$Y = \begin{cases} \chi_{2u}^2 & H_0 \\ \chi_{2u}^2(2\gamma) & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

여기서 χ_{2u}^2 는 $2u$ 의 자유도를 갖는 중심카이제곱분포(central chi-square distribution), $\chi_{2u}^2(2\gamma)$ 는 비중심카이제곱분포(non-central chi-square distribution)를 뜻한다. u 는 관측시간과 관측 대역폭의 곱을 나타낸다. 그랬을 때, AWGN 채널에서 미검출 확률 P_m 과 오경보 확률 P_f 는 다음과 같이 주어진다.[5]

$$P_m = \Pr(Y < \lambda | H_1) = 1 - Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (6)$$

$$P_f = \Pr(Y > \lambda | H_0) = \frac{\Gamma(u, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(u)} \quad (7)$$

여기서 λ 는 검출 후 측정된 에너지의 임계값이며, Q_u 는 Marcum Q-함수(Generalized Marcum Q function), $\Gamma(\cdot)$ 는 감마 함수(gamma function), $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 는 불완전 감마 함수(incomplete gamma function)이다. 식에서 보는 바와 같이 미검출 확률 P_m 과 오경보 확률 P_f 는 관측 시간과 관측대역폭의 곱(time-bandwidth product) u 와 검출 임계값 λ 의 함수이다. 따라서 최종 에러 확률 P_e 는(3)과 (6), (7)을 합쳐서 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$P_e = P(H_1)(1 - Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda})) + P(H_0)\frac{\Gamma(u, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(u)} \quad (8)$$

3. 최적의 협력 주파수 검출

무선인지 시스템에서는 주파수 검출 시에 잠복터미널 문제, 쉼도잉이나 페이딩 등의 여러 문제들로 검출 시 일어날 수 에러를 줄이기 위해 여러 부사용자의 정보를 종합하여 결정을 내리는 협력 스펙트럼 센싱(Cooperative spectrum sensing)을 사용한다.[2] 실제로 다수의 부사용자가 정보를 보내어 종합하여 최종 결론을 내린다면 부사용자 간의 정보가 서로 영향을 미치지 않는다고 하였을 때 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

융합센터에서는 최종 결정을 내릴 때 OR룰이나 AND룰을 사용하여 결정을 한다. OR룰은 부사용자중 한명이라도 주사용자의 신호가 존재한다고 판단하면, 융합센터는 주사용자의 신호가 존재한다고 결정하는 융합 방법이며, AND룰은 모든 부사용자가 주사용자가 존재한다고 판단해야만 주사용자가 존재한다고 결정하는 융합 방법이다.

앞에서 언급한 두 가지 방법은 모두 극단적인 융합 방법이므로 효율적이지 못하다. 따라서 우리는 총 N 개의 부사용자 가운데 K 개 이상의 부사용자가 주사용자의 신호가 있다고 판단하면 최종 결정을 주사용자의 신호가 있다고 판단하는 K -out-of- N 룰을 사용한다고 가정한다. 어차피 K -out-of- N Rule도 K 값이 1이면 OR룰, K 가 N 이면 AND룰을 포함하는 더 큰 개념의 융합 방법이다.

따라서 각 융합 방법에 따른 미검출 확률과 오경보 확률은 다음과 같게 된다.

$$OR - Rule: \begin{cases} P_{m,t} = P_m^N \\ P_{f,t} = 1 - (1 - P_f)^N \end{cases} \quad (9)$$

$$AND - Rule: \begin{cases} P_{m,t} = 1 - (1 - P_m)^N \\ P_{f,t} = P_f^N \end{cases} \quad (10)$$

$$K - out - of - N - Rule \begin{cases} P_{m,t} = 1 - \sum_{j=K}^N \binom{N}{j} (1 - P_m)^j P_m^{N-j} \\ P_{f,t} = \sum_{j=K}^N \binom{N}{j} P_f^j (1 - P_f)^{N-j} \end{cases} \quad (11)$$

여기서 P_{mi} 는 융합센터에서 내린 최종 결정이 미검출 에러가 되었을 확률이고 P_{fa} 는 융합센터의 최종결정이 오경보 에러가 될 확률이다. 따라서 협력 스펙트럼 센싱(Cooperative spectrum sensing)에서 중요한 것은 검출 에러를 최소로 하는 것이며, 이를 최소화 할 수 있는 최적의 K 값을 찾는 것이 중요하다. 따라서 (11)을 (3)에 대입하면 다음과 같다.

$$P_e = P(H_1) \left(1 - \sum_{j=K}^N \binom{N}{j} (1 - P_m)^j P_m^{N-j} \right) + P(H_0) \left(\sum_{j=K}^N \binom{N}{j} P_f^j (1 - P_f)^{N-j} \right) \quad (12)$$

P_e 를 최소화하는 최적의 K 의 값이 \tilde{K} 라 하면 $P_e(\tilde{K})$ 이 최소가 되는 곳에서는 다음의 식이 만족되어야 한다.

$$P_e(\tilde{K}-1) - P_e(\tilde{K}) \approx 0 \quad (13)$$

따라서 (12)을 (13)에 대입하여 간단히 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & P_e(\tilde{K}-1) - P_e(\tilde{K}) \\ &= P(H_1) \left(\binom{N}{\tilde{K}} (1 - P_m)^{\tilde{K}} P_m^{N-\tilde{K}} \right) \\ & \quad - P(H_0) \left(\binom{N}{\tilde{K}} P_f^{\tilde{K}} (1 - P_f)^{N-\tilde{K}} \right) \approx 0 \end{aligned} \quad (14)$$

이 식에서 '0'에 근사하게 접근하는 것을 '0'과 같다고 놓고 이항하고 양변에 자연로그를 취한 후 K 에 대해서 간단히 하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\tilde{K} = \frac{\ln \left(\frac{P(H_1) P_m^N}{P(H_0) (1 - P_f)^N} \right)}{\ln \left(\frac{P_f \cdot P_m}{(1 - P_f)(1 - P_m)} \right)} \quad (15)$$

여기서 (15)에 (6), (7)을 대입하면 다음과 같다.

$$\tilde{K} = \frac{\ln \left(\frac{P(H_1) (1 - Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}))^N}{P(H_0) (1 - \frac{\Gamma(u, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(u)})^N} \right)}{\ln \left(\frac{\frac{\Gamma(u, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(u)} \cdot (1 - Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}))^N}{(1 - \frac{\Gamma(u, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(u)}) (1 - (1 - Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}))^N)} \right)} \quad (16)$$

따라서 검출에러를 최소화 하는 \tilde{K} 는 식(16)과 같다. 하지만 \tilde{K} 는 자연수이기 때문에 식(16)에서 가장 가까운 자연수 값이 검출 에러를 최소화 하는 \tilde{K} 가 된다.

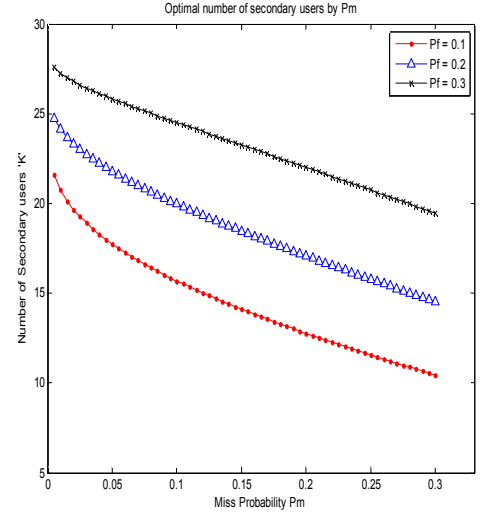


그림1. 최적의 부사용자의 수와 미검출 확률의 관계

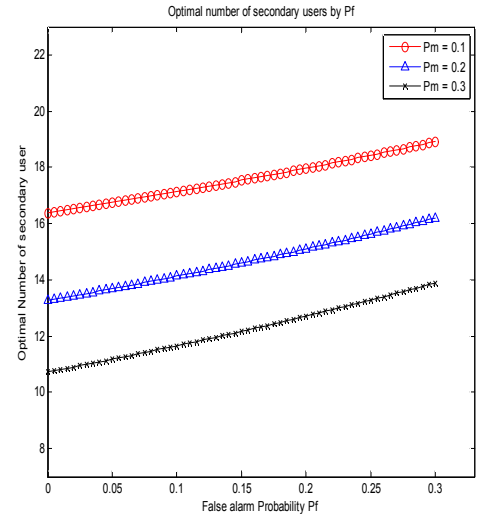


그림2. 최적의 부사용자의 수와 오경보 확률의 관계

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션은 CR의 총 부사용자(SU)의 수가 '30'명이고 관측시간과 관측대역폭의 곱 $u = TW = 3$ 으로 가정 하였다. 그림1은 미검출 확률과 해당 주파수 대역을 주사용자가 사용하고 있다고 판단한 부사용자수의 임계 수치 K 의 최적값과의 관계를 나타낸 그래프이다. $P(H_1) = P(H_0) = 0.5$ 로 설정하였다. 그림은 오경보 확률을 각각 0.1, 0.2, 0.3으로 했을때의 그래프를 나타낸다. 미검출확률이 높을수록 더 적은 부사용자들이 사용중이라고 판단했을 때 융합센터에서 최종 판정을 사용중이라 하는 것이 적절하다는 것을 확인 할 수 있다.

그림2는 반대로 오경보 확률과 최적의 K 값과의 그래프를 나타낸 것이다. 그래프에서 미검출확률은 각각 0.1, 0.2, 0.3으로 고정하고 $P(H_1) = P(H_0) = 0.5$ 로 설정 후 시뮬레이션 한 결과 오경보 확률이 높을수록 최적의 K 값이 커지는 것을 확인 할 수 있다.

또 그림3에서는 해당 주파수 대역이 사용되어지는 빈도수와 부사용자의 임계값 K 와의 그래프를 나타낸 것이다. 오경보 확률과 미검출 확률은 각각 $P_m = P_f = 0.2$ 로 설정한 결과 해당 주파수 대역의 사용빈도가 높을수록 K 가 낮아지며 해당 주파수 대역의 사용빈도가 낮으면 K 값은 커지는 것을 확인 할 수 있다.

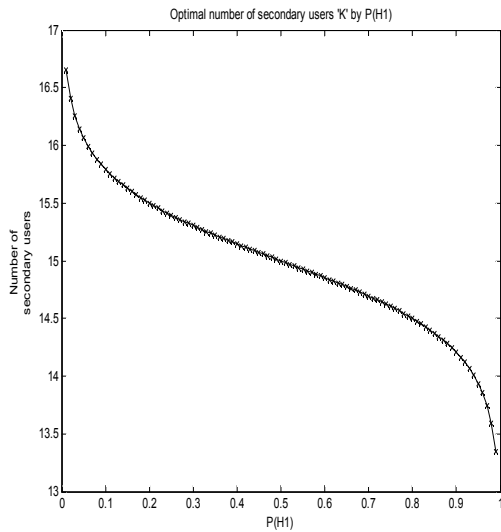


그림3. 최적의 부사용자의 수와 주파수 대역 사용율의 관계

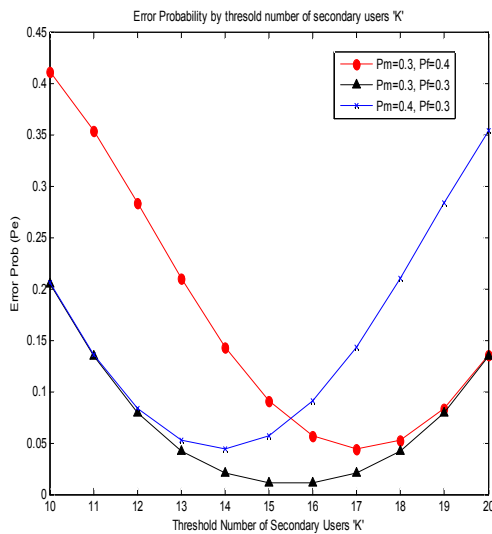


그림4. 부사용자의 임계값 'K'와 검출에러와의 관계

그림4는 부사용자수의 임계값 'K'와 검출에러 P_e 와의 관계를 나타낸 그래프이다. 미검출확률과 오경보확률의 변화에 따라 최적의 K 값이 다르다는 것을 다시 확인 할 수 있고 또 임계값 K를 잘못 선택하였을 경우와 최적의 'K'값으로 선택하였을 경우의 검출에러의 차이를 보여주고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 무선인지(Cognitive Radio) 시스템에서 협력 주파수 스펙트럼 센싱(Cooperative Spectrum Sensing)을 할 경우 서로 다른 N명의 부사용자(SU)가 서로 다른 CR정보를 전송할 경우에 K명 이상의 부사용자가 주사용자 있다고 판단하는 경우 융합센터에서 최종 결정을 주사용자가 사용중이라고 판단하는 시스템에서 최적의 K값을 찾는 방법에 대해 제안 하였다. 또 수학적으로 이것이 최적임을 증명하였다. 결과적으로 K값을 결정짓는 요인은 $P(H_1)$, $P(H_0)$, P_m , P_f 들로 주사용자가 해당주파수 대역을 사용하고 있을 확률과 그렇지 않을 확률, 미검출확률, 오경보 확률등이 최적의 K값을 결정짓게 되며, 미검출

확률과 오경보 확률등은 관측시간과 관측대역폭의 곱 'u', 센싱 후 에너지의 임계값 ' λ ', 그리고 주사용자와 부사용자간 채널의 SNR값 ' γ '에 의하여 결정되게 된다. 이와 같이 다양한 계수들을 통하여 결정된 최적의 K값을 이용하면 전체 시스템의 성능을 향상 시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.Mitola and G.Q.Maguire, "Cognitive radio: Making software radios more personal," IEEE Pers. Commun., vol.6, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [2] S. Haykin, "Cognitive radio : Brain-empowered wireless communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.23, no.2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [3] A.Ghasemi, E.S.Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," in Proc. IEEE. Inter. Symp. Dyspan 2005, pp. 131-136, Nov. 2005.
- [4] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," Proc. IEEE, vol. 55, pp. 523-531, Apr. 1967.
- [5] F. F. Digham, M. S. Alouini, et al., "On the energy detection of unknown signals over fading channels," IEEE Transactions on Communications, vol. 55, No. 1, pp.21-24, Jan. 2007.
- [6] Shujing Xie, Lianfeng Shen and Jishun Liu, "Optimal Threshold of Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio", IEEE WCSP 2009, pp 1-5, Nov. 2009.