

무선인지 시스템에서 협력 스펙트럼 센싱 성능 향상을 위한 경관정 결합 기법

정회원 신 오 순*^o, 종신회원 신 요 안*

An Improved Combining of Hard Decisions for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems

Oh-Soon Shin*^o *Regular Member*, Yoan Shin* *Lifelong Member*

요 약

무선인지 기술은 비어있는 스펙트럼을 검출하고 이를 사용하여 통신하는 기술로서 주파수 부족 현상을 해소하기 위한 방안으로 활발히 연구가 이루어지고 있다. 무선인지 기술을 도입하기 위해 핵심적인 요소는 부사용자가 주사용자의 통신을 방해하지 않으면서 주파수 사용의 효율성을 최대화하는 것이다. 이를 위해서는 주사용자의 스펙트럼 점유 여부를 정확하게 판단하는 센싱 기술이 필요하다. 각각의 부사용자가 독립적으로 센싱을 수행하는 개별 센싱 기술은 음영지역, 잠복 터미널 문제 등이 있어서 최근 여러 부사용자가 협력하여 센싱을 수행하는 협력 스펙트럼 센싱 기술이 주목받고 있다. 본 논문은 협력 스펙트럼 센싱에 있어서 각 부사용자가 개별적으로 센싱한 결과의 경관정 값을 취합하여 이를 효과적으로 결합하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 과거의 협력 센싱 결과를 이용하여 각 부사용자의 개별 센싱 결과에 신뢰도를 나타내는 가중치를 부여하여 결합함으로써 협력 센싱 성능을 향상시킨다. 다양한 환경에서 제안한 방법의 검출 성능을 평가하여 기존의 가중치 없는 경관정 결합 방법과 비교한 결과를 제시한다.

Key Words: Cognitive Radio (CR), Combining, Cooperative Spectrum Sensing, Receiver Operating Characteristic (ROC)

ABSTRACT

Cognitive radio is considered as a promising solution to scarce spectrum problem. The primary object of cognitive radio is to increase spectral efficiency, while causing limited interference to primary users who are using the spectrum. Hence, an essential part of cognitive radio systems is spectrum sensing which determines whether a particular spectrum is occupied or not by a primary user at a particular time. However, sensing decision of each individual secondary user alone may not be reliable enough due to shadowing and multipath fading of wireless channels. The so called hidden terminal problem makes the problem even worse, possibly yielding undesired interference to the primary users. Recently, cooperative spectrum sensing is emerging as a remedy to these problems of individual sensing. Cooperative sensing allows a group of secondary users to share local sensing information to extract a global decision with high fidelity. In this paper, we investigate a cooperative spectrum sensing algorithm based on hard decisions of local sensing outcomes. Specifically, we propose an effective scheme for combining local decisions by introducing weighting factors that reflect reliability of the corresponding secondary user. Through computer simulations, the performance of the proposed combining scheme is compared with that of the conventional scheme without weighting factors in various environments.

* 본 연구는 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2008-331-D00345)과 송실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

* 송실대학교 정보통신전자공학부(ossin@ssu.ac.kr, yashin@e.ssu.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호: KICS2008-11-498, 접수일자: 2008년 11월 11일, 최종논문접수일자: 2009년 2월 6일

I. 서 론

전과 이용의 급속한 확산과 광대역 멀티미디어 서비스의 증가에 따라 주파수에 대한 수요가 급격히 증가하고 있고 실제로 할당된 대역 이외에 비어있는 대역이 거의 없을 정도로 주파수 부족이 심각한 문제로 대두되었다. 하지만 FCC(Federal Communications Commission)의 분석에 따르면 이미 할당된 대역 내에서 실제 특정 시간과 장소에서 15~80%의 주파수만 사용되고 있다^[1]. 따라서 주파수 부족 문제를 해결하기 위해서는 주파수 이용 효율을 극대화해야 하고 이를 위해 실제 비어있는 스펙트럼을 찾아서 통신하는 무선인지(cognitive radio) 기술이 필요하다^{[2][4]}.

스펙트럼 센싱(spectrum sensing) 기술은 부사용자(secondary user)가 주변의 전파 환경을 감지하여 비어있는 스펙트럼을 찾아내는 기술로 무선인지 통신의 근간을 이루는 기술이다. 스펙트럼 센싱이 부정확하면 이미 해당 주파수를 사용 중인 주사용자(primary user)에 큰 간섭을 미칠 수도 있고, 특정 주파수가 실제로 비어 있음에도 불구하고 사용하지 못할 수 있다. 따라서 무선인지 기술이 추구하는 타기기에 미치는 간섭을 최소화하면서 주파수 이용 효율을 높이하고자 하는 목적을 달성하기 위해서는 신속하고 정확한 센싱이 필수적이다.

스펙트럼 센싱 기술로는 에너지 검출(energy detection), 정합 필터(matched filter), 신호특성 검출(signal feature detection) 방법 등이 있는데, 구현 복잡도와 센싱에 필요한 시간을 고려할 때 에너지 검출이 가장 현실적인 접근 방법이라 생각된다^[5]. 에너지 검출 방법은 특정 대역에서 수신신호의 에너지 레벨을 추정하고 이를 임계치(threshold)와 비교하여 해당 주파수 대역에서 신호의 존재 유무를 검출하는 방법이다.

한편 부사용자별로 독립적으로 수행하는 센싱 방법은 잠복 터미널 문제(hidden terminal problem)에 노출되어 있다^[6]. 즉, 주사용자가 해당 주파수를 사용하고 있음에도 불구하고 산, 빌딩 등의 전파 장애물 때문에 발생하는 섀도우 페이딩(shadow fading)과 다중경로 페이딩(multipath fading) 때문에 이를 검출하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 잠복 터미널 문제를 완화하기 위해 각 부사용자가 개별적으로 센싱한 결과를 여러 부사용자들이 서로 공유하여 스펙트럼 점유 여부에 대한 판단을 수행하고 그 결과를 공유하는 협력 스펙트럼 센싱(cooperative

spectrum sensing) 기술이 최근에 대두되었다^{[6][9]}.

협력 센싱에서는 융합센터(fusion center)가 각 개별 부사용자가 센싱한 결과를 취합하고 이를 결합하여 스펙트럼 점유 여부에 대한 최종적인 판정을 한다. 부사용자간 상호 협력을 통해 특히 주사용자 신호가 약하게 도달하는 부사용자의 검출 성능을 향상시킬 수 있다. 한편, 협력 센싱에서 개별 부사용자의 센싱 결과는 양자화되어 융합센터로 전달되어야 하기 때문에 이는 전체 시스템의 주파수 효율을 감소시키는 오버헤드로 작용한다. 따라서 각 부사용자의 센싱 결과를 융합센터로 전달하기 위한 비트 수를 최소화하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 각 부사용자가 스펙트럼 사용 여부에 대해 개별적으로 경관정(hard decision)을 하고, 그 결과를 한 비트(bit) 정보로 융합센터에 전달하는 것이 가장 효율적이다.

개별 부사용자로부터 취합한 경관정 값을 결합하는 방법은 AND 방식과 OR 방식^[9] 등이 있는데 이는 기본적으로 각 부사용자가 개별적으로 내린 판정이 동일한 신뢰도를 갖는다고 가정하고 있다. 그러나 실제로 주사용자 가까이 있는 부사용자의 판정 결과가 멀리 떨어져 있는 부사용자의 판정 결과보다 상대적으로 신뢰도가 높을 것이다. 부사용자가 검출 에너지의 연판정(soft decision)을 융합센터로 전달하는 경우는 이러한 신뢰도가 연판정 값에 자연스럽게 반영이 되고, 또한 다양한 결합 방법이 이미 제안되었다^{[7][8]}. 하지만 경관정을 융합센터로 전달하는 경우 부사용자들의 상대적인 신뢰도가 반영되지 못한다.

본 논문에서는 협력 센싱 성능 향상을 위한 효과적인 경관정 결합 방법을 제안한다. 제안한 방법에서 각 부사용자는 기존 경관정 결합 방법과 마찬가지로 한 비트에 해당하는 경관정 값을 융합센터로 전달한다. 융합센터에서는 전달 받은 경관정 값을 토대로 각 부사용자의 신뢰도를 자체적으로 추정한다. 구체적으로, 융합센터는 각 부사용자로부터 전달 받은 개별 판정 결과를 과거의 협력 센싱 결과와 비교하여 이를 토대로 각 부사용자의 신뢰도를 계산하고 지속적으로 갱신한다. 신뢰도를 가중치로 사용하여 경관정 값을 결합함으로써 기존의 경관정 결합 방법이 갖고 있는 모든 부사용자에게 동일한 가중치를 부여하는 한계를 극복하고 연판정 결합 방법과 유사한 성능을 얻고자 한다. 모의실험을 통해 다양한 환경에서 제안한 결합 방법의 성능을 평가하고 기존의 방법과 비교한 결과를 제시한다.

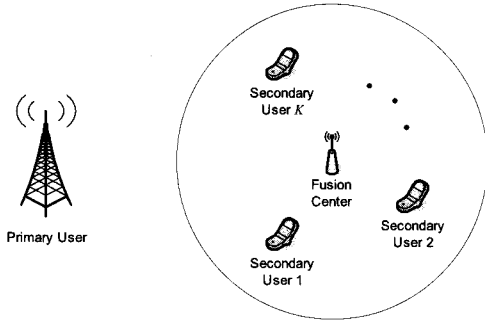


그림 1. 협력 센싱 시나리오

II. 협력 센싱 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 주사용자가 존재하고 그 주위에 K 명의 부사용자와 이를 관장하는 융합센터가 존재하는 일반적인 시나리오를 가정한다. 예를 들어, IEEE 802.22 Wireless Regional Area Network (WRAN) 표준에 적용하면 주사용자는 디지털/아날로그 TV 또는 Part 74 신호 송신기, 융합센터는 WRAN 기지국, 부사용자는 WRAN 기지국 내에 있는 Consumer Premise Equipment (CPE)에 해당된다.

협력 센싱 시스템은 그림 2와 같이 K 명의 부사용자의 검출기와 융합 장치로 이루어진다. 각 부사용자는 L 개의 표본을 적분하는 에너지 검출기를 이용하여 주사용자 신호의 존재 여부를 결정한다. 즉, 부사용자 k 가 센싱 구간 n 에서 측정하는 에너지 값 $E_k[n]$ 은 주사용자 신호의 존재 유무에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_k[n] = \begin{cases} \sum_{\ell=1}^L |v_k[n, \ell]|^2, & H_0 \\ \sum_{\ell=1}^L |s_k[n, \ell] + v_k[n, \ell]|^2, & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 H_0 과 H_1 은 각각 주사용자 신호가 존재하지 않는 가설과 존재하는 가설을 나타내고, $s_k[n, \ell]$ 과 $v_k[n, \ell]$ 은 부사용자 k 가 센싱 구간 n 에서 수신하는 주사용자 신호와 잡음의 ℓ 번째 표본을 나타낸다. 각 사용자의 개별 판정은 H_0 과 H_1 간의 가설 검정 문제로서 부사용자 k 가 융합센터로 전송하는 개별 센싱 결과의 경판정 값 $D_k[n] \in \{0, 1\}$ 은 다음과 같이 생성할 수 있다.

$$D_k[n] = H(E_k[n] - \gamma_k) \quad (2)$$

식 (2)에서 $H(\cdot)$ 은 Heaviside step function을 나타

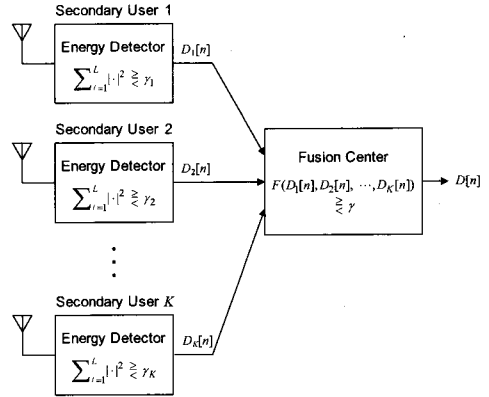


그림 2. 협력 센싱 시스템

내고 γ_k 는 판정 임계치를 나타낸다. 즉, $E_k[n]$ 값이 임계치보다 크거나 같은 경우 $D_k[n] = 1$, 임계치보다 작은 경우 $D_k[n] = 0$ 을 융합센터로 보낸다.

융합센터는 K 명의 부사용자로부터 취합한 개별 센싱의 판정값 $D_1[n], D_2[n], \dots, D_K[n]$ 을 결합한 후 이를 임계치 γ 와 비교하여 스펙트럼 사용 여부에 대한 최종적인 판정을 내린다. 결합 방법을 나타내는 함수를 $F(\cdot)$ 라 하면 최종 판정 결과 $D[n] \in \{0, 1\}$ 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D[n] = H(F(D_1[n], D_2[n], \dots, D_K[n]) - \gamma) \quad (3)$$

융합센터는 $D[n] = 0$ 인 경우에 스펙트럼을 필요로 하는 부사용자에게 사용 권리를 부여하고, $D[n] = 1$ 인 경우는 모든 부사용자들이 스펙트럼을 사용하지 못하도록 한다.

III. 경판정 결합 방법

3.1 기존의 결합 방법

경판정 값의 결합방법으로 제안된 가장 단순한 방법은 경판정 값의 산술 평균을 취하는 것으로서 이를 식으로 표현하면 다음과 같다⁹⁾.

$$F(D_1[n], D_2[n], \dots, D_K[n]) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K D_k[n] \quad (4)$$

임계치를 $\gamma = 1$ 로 설정하면 AND 방식에 해당되고, $\gamma = 1/K$ 로 설정하면 OR 방식에 해당된다.

3.2 LR 기반의 결합 방법

이론적으로 최적의 결합 방법은 Likelihood Ratio (LR)를 이용한 방법으로서 다음과 같이 표현할 수 있다¹⁰⁾.

$$F(D_1[n], D_2[n], \dots, D_K[n]) = \frac{F(D_1[n], D_2[n], \dots, D_K[n] | H_1)}{F(D_1[n], D_2[n], \dots, D_K[n] | H_0)} \quad (5)$$

개별 경관정 값 $D_1[n], D_2[n], \dots, D_K[n]$ 이 서로 독립이라고 가정하면 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(D_1[n], D_2[n], \dots, D_K[n]) = \prod_{k=1}^K \frac{P(D_k[n] | H_1)}{P(D_k[n] | H_0)} \quad (6)$$

$$= \prod_{k \in S_1[n]} \frac{P(D_k[n] = 1 | H_1)}{P(D_k[n] = 1 | H_0)} \prod_{k \in S_0[n]} \frac{P(D_k[n] = 0 | H_1)}{P(D_k[n] = 0 | H_0)}$$

식 (6)에서 부사용자의 인덱스 집합 $S_j[n]$ 은 $S_j[n] = \{k: 1 \leq k \leq K, D_k[n] = j\}$, $j = 0, 1$ 로 정의된다. 식 (6)의 결합 방법을 구현하기 위해 융합센터는 $D_k[n]$ 의 조건부 확률을 알아야 한다. 하지만 현실적으로 이를 알기 어렵고 또한 확률 분포가 채널 환경에 따라 변할 수 있기 때문에 구현하기 어렵다. 식 (6)에서 주목할 점은 올바른 판정을 하는 확률이 클수록 해당 부사용자의 판정값이 결합한 값에 큰 기여를 한다는 것이다.

3.3 제안하는 결합 방법

식 (4)에 따른 경관정 결합 방법의 문제점은 모든 부사용자의 개별 경관정 값이 동일한 비중으로 최종 판정을 위한 결정변수에 반영된다는 점이다. 그러나 주사용자 신호를 잘 받을 수 있는 환경에 있는 부사용자, 즉 올바른 판정을 하는 확률이 큰 부사용자의 경관정 값이 그렇지 않은 부사용자의 경관정 값보다 신뢰도가 높을 것임은 직관적으로나 식 (6)으로부터 자명하다. 융합센터가 연판정 값을 전달받는 경우는 신뢰도가 연판정 값에 반영되어 있지만, 경관정의 경우는 그렇지 못하다. 따라서 본 논문에서는 융합센터가 각 부사용자의 경관정 값으로부터 신뢰도를 자체적으로 추정하고 이를 지속적으로 갱신하는 알고리즘을 고안한다. 이러한 신뢰도를 결합 가중치로 사용하여 연판정 결합 방법과 마찬가지로 신뢰도가 높은 부사용자의 경관정 값이 최종 판정에 상대적으로 큰 기여를 할 수 있도록 한다. 주목할 점은 각 부사용자가 융합센터로 전송하는 정보는 경관정 결합 방법과 동일하게 한 비트의 경관정 값이라는 점이다. 제안하는 경관정 결합 방법을 식으로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(D_1[n], D_2[n], \dots, D_K[n]) = \sum_{k=1}^K w_k[n] D_k[n] \quad (7)$$

식 (7)에서 $w_k[n]$ 은 센싱 구간 n 에서 부사용자 k 의 가중치, 즉 신뢰도(trust factor)를 나타낸다. 식 (7)과 같이 가중치를 이용한 결합 방법은 연판정의 경우 [7], [8] 등에서 여러 가지 방법이 고안되었지만, 경관정의 경우는 고려되지 않았다.

융합센터는 신뢰도 $w_k[n]$ 을 추정하기 위해 주사용자에 의한 채널 점유상태가 인접한 센싱 구간에서 변할 확률이 작다는 가정 하에,^[11] 각 부사용자의 현재 센싱 구간에서의 개별 센싱 결과 $D_k[n]$ ($k=1, 2, \dots, K$)을 이전 센싱 구간에서의 협력 센싱 결과 $D[n-1]$ 과 비교한다. 이로부터 $D_k[n] = D[n-1]$ 이면 부사용자 k 의 신뢰도를 증가시키고, 반대로 $D_k[n] \neq D[n-1]$ 이면 부사용자 k 의 신뢰도를 감소시킨다. 또한 평균화 효과를 얻기 위해 신뢰도 값을 여러 센싱 구간 동안 누적한다. 이를 구체화하여 융합센터에서 식 (7)의 결합을 위해 사용하는 부사용자 k 의 신뢰도 $w_k[n]$ 을 다음과 같이 계산하는 방법을 제안한다.

$$\mu_k[n] = \lambda \mu_k[n-1] + |D_k[n] - D[n-1]| \quad (8)$$

$$w_k[n] = \frac{1/\mu_k[n]}{\sum_{k=1}^K 1/\mu_k[n]} \quad (9)$$

식 (8)에서 $\mu_k[n]$ 은 신뢰도와 반비례하는 값으로 식 (8)에 따라 forgetting factor λ 를 갖고 매 센싱 구간마다 갱신되며, 식 (9)는 $\sum_k w_k[n] = 1$ 이 되도록 정규화 하는 과정을 나타낸다. 이러한 과정을 통해 주사용자 신호가 상대적으로 강하게 도달하는 부사용자의 신뢰도가 상대적으로 커지게 되고 따라서 식 (7)의 결합에서 큰 비중을 차지함으로써 협력 센싱 성능 향상을 기대할 수 있다.

IV. 성능 평가

본 장에서는 모의실험을 통해 III장에서 제안한 경관정 결합 방법의 성능을 다양한 채널 환경에서 평가한다. 주사용자 신호가 존재하는 H_1 구간과 반대의 경우인 H_0 구간의 길이는 각각 평균이 20 샘플, 50 샘플인 기하분포(geometric distribution)를 따른다고 가정하고, 각 부사용자의 에너지 검출기 적분구간의 길이 L 은 10으로 설정하였다. H_1 의 경우 주사용자와 부사용자 k 간의 채널은 경로손실, 새도우 페이딩 및 다중경로 페이딩을 겪는다고 가정한다. 다중경로 페

이딩은 Rayleigh 분포를 따르며 Doppler 주파수와 표본구간의 길이의 곱이 0.01인 Jakes 모델에 따라 시변하는 페이딩 환경을 가정한다. 식 (2)와 (3)의 임계치는 모두 동일한 값으로 설정하고 이를 변화시키면서 H_0 의 경우 H_1 으로 틀리게 판정하는 오검출 확률(false alarm probability)과 H_1 의 경우 H_1 으로 올바르게 판정하는 검출 확률(detection probability)의 변화를 보여주는 수신기 동작특성(receiver operating characteristic)을 통해 센싱 성능을 평가한다. 다음에 제시하는 모의실험 결과에서 “Conventional”로 표시한 그래프들은 식 (4)의 방법에 해당되고, “Proposed”로 표시한 그래프들은 제안한 식 (7)-(9)의 방법의 성능을 나타낸다.

먼저 모든 K 부사용자가 동일한 경로손실과 새도우 페이딩을 겪고 서로 독립인 다중경로 페이딩을 겪는 시나리오를 가정하자. 이 경우 모든 부사용자의 수신 신호대잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)의 평균값은 동일하다. 이러한 시나리오는 그림 1에서 부사용자들이 주사용자로부터 충분히 멀리 떨어진 경우에 해당된다. 그림 3은 이러한 시나리오에서 $K=5$, SNR = -10dB인 경우 수신기 동작특성을 보여준다. 제안한 방법의 경우 forgetting factor λ 를 변화시킬 때 $\lambda=0.1, 0.3, 0.5$ 에서는 유사한 성능을 보이나, $\lambda=0.7, 0.9$ 로 증가하면 성능이 점점 열화 되는 현상을 보인다. 이는 λ 가 너무 크면 채널 특성이 상이한 구간에서 신뢰도가 평균화되어 신뢰도 추정의 오차가 커지기 때문으로 해석된다. 그림 3으로부터 제안한 방법이 기존의 방법보다 항상 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있고, 성능 이득을 최대화하기 위해서는 적절한 λ 값을 선택해야 함을 알 수 있다. 다음에 제시될 제안한 방법에 대한 모의실험 결과에서는 모두

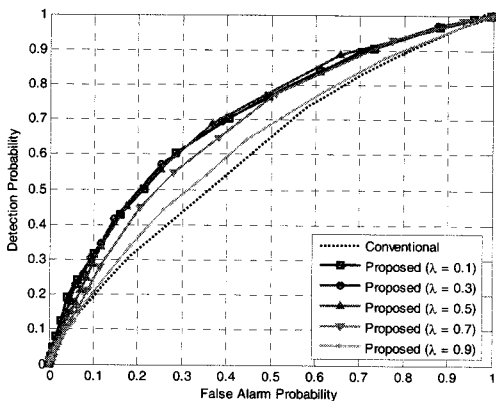


그림 3. 부사용자들의 평균 수신 SNR이 동일한 경우 협력 센싱 수신기 동작특성 비교 ($K=5$, SNR = -10dB).

$\lambda=0.3$ 을 가정하여 성능을 도출하였다.

다음으로 부사용자들이 주사용자로부터 반경 R 내의 영역에 균일하게 분포하고 서로 독립적인 새도우 페이딩을 겪는 시나리오를 가정한다. 이 경우 각 부사용자는 서로 다른 수신 SNR을 갖게 된다. 이러한 시나리오는 그림 1에서 주사용자가 융합센터와 동일한 곳에 위치하는 경우에 해당된다. 경로 손실의 거리에 따른 감쇄상수는 3.7로 가정하였고, 새도우 페이딩은 표준편차가 6dB인 log-normal 분포를 따른다고 가정하였다. 그림 4는 이러한 경우 수신기 동작특성을 보여준다. 여기서 SNR은 거리 R 에서의 SNR 중간값을 의미한다. 그림 3의 경우보다 제안한 방법의 성능 이득이 훨씬 크게 나타남을 관찰할 수 있다. 이는 부사용자별 수신 SNR이 서로 다른 경우 부사용자간 신뢰도의 차이가 커지고 따라서 이를 반영한 제안한 방법의 성능 이득이 큰 것으로 판단된다.

그림 5는 거리 R 에서의 SNR 중간값이 -10dB이고 새도우 페이딩이 없는 경우 주사용자와 10명의

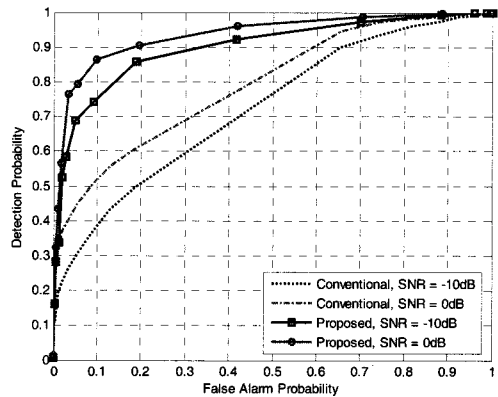


그림 4. 부사용자들의 평균 수신 SNR이 다른 경우 협력 센싱 수신기 동작특성 비교 ($K=5$).

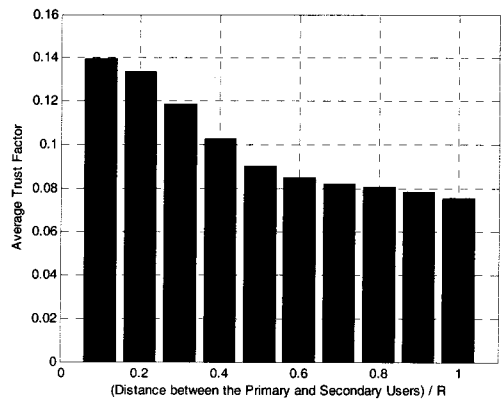


그림 5. 거리에 따른 평균 신뢰도 ($K=10$, 거리 R 에서 SNR 중간값 = -10dB).

부사용자간 거리를 각각 $0.1R$, $0.2R$, ..., $1.0R$ 로 설정한 경우 식 (8)-(9)에 의해 계산된 신뢰도가 거리에 따라 어떻게 변하는지를 보여준다. 임계치는 오검출 확률이 0.1이 되도록 설정하였다. 예상한 바와 같이 거리가 멀어질수록 평균 신뢰도가 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선인지 통신 시스템을 위한 협력 센싱에 있어서 각 부사용자의 개별 센싱 결과의 경관정 값을 결합하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 각 부사용자의 개별 관정값을 이전 센싱 구간에서의 협력 센싱 결과와 비교하여 부사용자들에게 신뢰도를 부여하고 이를 지속적으로 갱신하도록 고안되었다. 이렇게 구한 신뢰도를 결합의 가중치로 사용함으로써 신뢰도가 높은 부사용자의 개별 센싱 결과가 최종 센싱 결정변수에 상대적으로 크게 반영되도록 하였다. 모의실험을 통하여 제안한 방법의 성능을 기존의 동일 가중치 방법의 성능과 비교하여 다양한 환경에서 성능 이득을 검증하였다. 특히, 위치에 따른 부사용자간 평균 수신 SNR이 서로 다른 경우 제안한 방법이 기존 방법에 비해 큰 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다.

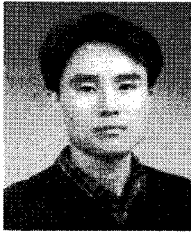
참 고 문 헌

- [1] FCC Spectrum Policy Task Force, "Report of the spectrum efficiency working group," ET Docket No. 02-115, Nov. 2002.
- [2] J. Mitola, "Cognitive radio," Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2000.
- [3] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.23, No.2, pp.210-220, Feb. 2005.
- [4] A. N. Mody et al., "Recent advances in cognitive communications," *IEEE Commun. Mag.*, Vol.46, No.10, pp.54-61, Oct. 2007.
- [5] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access," *IEEE Signal Processing Mag.*, Vol.24, No.3, pp.79-89, May 2007.
- [6] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative

- spectrum sensing in cognitive radio networks," *Proc. IEEE Inter. Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp.131-136, Baltimore, MD, USA, Nov. 2005.
- [7] Z. Quan, S. Cui, and A. H. Sayed, "An optimal strategy for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp.2947-2951, Washington, DC, USA, Nov. 2007.
- [8] J. Ma and Y. Li, "Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp.3139-3143, Washington, DC, USA, Nov. 2007.
- [9] W. Zhang, R. K. Mallik, and K. B. Letaief, "Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks," *Proc. IEEE Inter. Conf. Commun. (ICC)*, pp.3411-3415, Beijing, China, May 2008.
- [10] P. K. Varshney, *Distributed Detection and Data Fusion*. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [11] H. Kim and K. G. Shin, "In-band spectrum sensing in cognitive radio networks: energy detection or feature detection?," *Proc. ACM Inter. Conf. Mobile Computing and Networking*, pp.14-25, San Francisco, CA, USA, Sept. 2008.

신 오 순 (Oh-Soon Shin)

정회원



1998년 2월 서울대학교 전기공학부 학사

2000년 2월 서울대학교 전기공학부 석사

2004년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사

2004년 3월~2005년 9월 Harvard University 박사후연구원

2006년 4월~2007년 8월 삼성전자 통신연구소 책임연구원

2007년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 전임강사

<관심분야> 통신이론, 통신시스템, 통신신호처리

신 요 안 (Yoan Shin)

종신회원



1987년 2월 서울대학교 전자공학과 학사

1989년 2월 서울대학교 전자공학과 석사

1992년 12월 University of Texas at Austin 전기및컴퓨터공학과 박사

1992년 12월~1994년 7월 오스틴소재 MCC (Microelectronics & Computer Technology Corp.) 연구 콘소시엄 Member of Technical Staff

1994년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학 교수
<관심분야> CDMA 및 OFDM 모뎀, UWB 전송 시스템, MIMO 시공간신호처리, Cognitive Radio