

무선 인지 시스템에서 협력 스펙트럼 센싱을 위한 최적화된 연판정 방식

Optimal Soft Decision for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems

이 소 영 · 김 진 영*

So Young Lee · Jin Young Kim*

요 약

협력 스펙트럼 센싱은 스펙트럼 센싱의 신뢰성 및 정확도를 높이기 위해 다수의 CR 기기들이 정보를 공유하여 면허 사용자를 검출하는 방식이다. 이때, CR 기기의 센싱 결과를 융합하는 방식에 따라 경판정 방식(hard decision method)과 연판정 방식(soft decision method)으로 구별할 수 있다. 본 논문은 면허 사용자와 CR 기기 사이의 거리에 따른 가중치가 적용된 결합 방식(Distance based Weight Combining: DWC)을 사용하여 에너지 검출 기반 협력 스펙트럼 센싱을 제안하고, 이에 따른 분석 및 모의 실험 결과를 나타낸다. 면허 사용자의 신호는 OFDM 기반의 시스템을 가정하였으며, 면허 사용자와 CR 기기 사이의 무선 채널은 가우시안(Gaussian) 채널로 모델링하였다. 에너지 검출법을 위한 임계값은 각 채널의 SNR(Signal to Noise Ratio)에 따라 다르게 적용되었으며, 각 채널의 잡음 신호의 평균값으로 가정하였다. DWC를 적용한 협력 스펙트럼 센싱을 수행한 결과, 거리에 따라 다양한 검출 확률을 나타낸 단일 센싱에 비해 비교적 안정된 검출 확률을 나타내는 것으로 알 수 있었으며, 동일 이득 결합을 반영하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행한 것보다 우수한 스펙트럼 센싱을 나타내었다.

Abstract

Cooperative spectrum sensing is proposed to overcome some problem such as multipath fading and shadowing and to improve spectrum sensing performance. There are different combining methods for cooperative spectrum sensing: hard decision method and soft decision method. In this paper, we analysis the performance of cooperative spectrum sensing with distance based weight that is kind of a soft decision rule for cognitive radio(CR) systems and CR systems sense the spectrum of the licensed user by using a energy detection method. Threshold is determined in accordance with the constant false alarm rate(CFAR) algorithm for energy detection. The signal of licensed user is OFDM signal and the wireless channel between a licensed user and CR systems is modeled as Gaussian channel. From the simulation results, the cooperative spectrum sensing with distance based weight combining(DWC) and equal gain combing(EGC) methods shows higher spectrum sensing performance than single spectrum sensing does. And the detection probability performance with the DWC is higher than that with the EGC.

Key words : Cognitive Radio(CR), Cooperative Spectrum Sensing, Energy Detection, Equal Gain Combining(EGC), Distance Based Weight Combining(DWC)

「이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업 연구임(No. 2010-00-22629).」

한국전파진흥협회 기술지원팀(Spectrum & Standardization Research Team, Korea Radio Promotion Association)

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

· 논문 번호 : 20100701-086

· 교신저자 : 이소영(e-mail : iwant@nate.com)

· 수정완료일자 : 2011년 3월 30일

I. 서 론

무선 서비스의 급증 및 정보 통신 기술의 발전에 따라 무선기기의 사용이 보편화 되었으며, 사용자들의 편의를 만족시키기 위해 높은 데이터 전송률이 지속적으로 요구되고 있다. 그러나 주파수 자원은 제한된 자원으로 급격한 주파수 수요만큼의 공급은 어려운 것이 현실이다. 미국 FCC(Federal Communications Commission)의 2002년 주파수 정책 보고서를 통해 현재 할당된 주파수 대역의 이용률이 15~85% 정도로 비효율적으로 활용되고 있음을 발표하였다^[1]. 이와 같은 주파수의 비효율적 사용을 완화하기 위하여 제한된 자원을 보다 효율적으로 사용하기 위한 연구가 진행 중이며, FCC는 2003년 12월 Notice of Proposed Rule Making(NPRM)을 통하여 유휴 주파수에 대한 중복 사용을 허용하는 기술인 무선 인지 기술(Cognitive Radio: CR)에 대한 내용을 발표하였다^[2].

무선 인지 기술은 주파수를 할당 받은 면허 사용자가 해당 주파수를 사용하지 않을 경우, 비면허 사용자가 면허 사용자에게 간섭을 주지 않고 해당 주파수를 사용할 수 있는 기술로서, 제한된 주파수 자원을 효율적으로 활용하기 위해 제안된 기술이다^{[3][4]}. FCC는 TV 대역에 대한 비면허 사용자의 접근을 검토 중이며, 현재 제한적으로 DTV 대역에 대해 무선 마이크의 사용을 허락하고 있다. 또한, IEEE는 IEEE 802.22 working group^[5]을 구성하였으며, 각국의 주요 기관들 역시 무선 인지 기술 및 주파수 재배치에 따른 기술 기준을 구축하기 위해 연구 중이다. 무선 인지 기술의 가장 핵심 기술은 주파수 스펙트럼 환경을 검출하여 주파수 사용 현황을 감지하는 스펙트럼 센싱으로 CR 센서가 장착된 비면허 사용자(이하 CR 기기라고 한다.)는 지속적으로 주변 환경을 인식하여 변화된 상황에 따라 시스템을 적절하게 적용하도록 한다. 그러나 스펙트럼 센싱은 음영 지역 및 잠복 터미널 등에 의하여 성능의 열화가 발생하게 되는데, 이 같은 문제를 해결하고 스펙트럼 센싱의 신뢰성 및 정확도를 높이기 위해 다수의 CR 기기들이 센싱 정보를 공유하는 협력 스펙트럼 센싱 기술이 제안되었다^{[6]~[8]}.

협력 스펙트럼 센싱은 각 CR 기기들의 센싱 결과를 융합하는 방법에 따라 경관정 방식(hard decision method)과 연관정 방식(soft decision method)으로 구별할 수 있다. 경관정 방식은 각 CR 기기들이 일차적으로 면허 사용자의 스펙트럼 사용을 판단하여 그 결과를 융합 센터에 전송하면 융합 센터에서 이를 취합하여 최종 판정 방식에 따라 면허 사용자의 존재를 최종 판단하게 된다. 연관정 방식은 각 CR 기기가 개별 판정을 내리지 않고 CR 기기가 수신한 신호를 그대로 융합 센터에 전송하여 융합 방식에 따라 결합한 후 최종 판정을 내리는 방식이다.

본 논문은 경관정 방식에 비하여 센싱 성능이 우수한 연관정 방식을 적용하여 협력 스펙트럼 센싱의 성능을 알아보도록 한다. 또한, 연관정 방식의 성능을 최적화하기 위해 면허 사용자와 CR 기기 사이의 거리에 따른 가중치가 적용된 결합 방식(Distance based Weight Combining: DWC)을 사용하여 에너지 검출 기반 협력 스펙트럼 센싱을 제안하고, 이에 따른 분석 및 모의 실험 결과를 나타낸다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서는 협력 스펙트럼 센싱의 시스템 모델에 대해 설명하였고, 제Ⅲ장에서는 협력 스펙트럼 센싱의 융합 방식 및 연관정 방식을 최적화하기 위한 거리 기반 가중치가 적용된 융합 방식에 대해 설명한다. 제Ⅳ장은 모의 실험을 통하여 협력 스펙트럼 센싱의 성능을 비교하였고, 마지막으로 본 논문의 결론을 제Ⅴ장에서 언급하였다.

Ⅱ. 시스템 모델

협력 스펙트럼 센싱은 페이딩 및 셰도잉 등에 의한 스펙트럼 센싱의 열화를 완화시키기 위해 제안된 방법으로 각각의 비면허 사용자의 센싱 결과를 공유하여 스펙트럼 센싱의 성능을 향상시킨다.

인지 무선 시스템은 주파수의 상태를 면허 사용자가 존재할 때와 부재중일 때의 두 가지로 가정하는데, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$H_0: y[k] = v[k] \tag{1}$$

$$H_1: y[k] = h_s[k] + v[k] \tag{2}$$

식 (2)에서 h 는 무선 채널의 감쇄 상수를 나타내

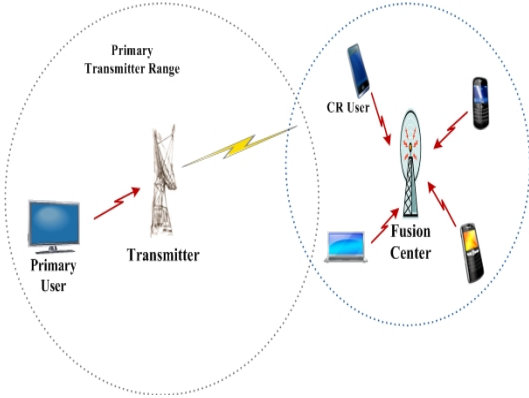


그림 1. 분산형 스펙트럼 센싱의 시스템 모델
Fig. 1. System model of distributed spectrum sensing.

고, $s[k]$ 는 면허 사용자의 신호를 나타내며, 평균은 0이고, 분산은 σ_s^2 의 값을 가진다. $v[k]$ 는 독립적인 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)으로 평균은 0이고, 분산은 σ_n^2 이다. 그리고 H_0 는 면허 사용자가 존재하지 않는 경우이고, H_1 은 면허 사용자가 주파수를 사용 중이거나, CR 기기의 범위 내에 근접해 있는 경우를 나타낸다. 분산형 센싱에 대한 간략한 시스템 모델은 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 면허 사용자(primary user)와 M 개의 CR 기기, 그리고 CR 기기의 센싱 결과를 취합하는 융합 센터로 이루어져 있다.

CR 기기에 수신된 신호는 각각 독립된 채널로 수신되며, $m(m=1, 2, \dots, M)$ 번째 CR 기기에 수신 신호의 에너지 Y_m 은 다음과 같다.

$$Y_m = \sum_{k=1}^L |y_m(k)|^2 \quad (3)$$

식 (3)에서 L 은 수신된 신호의 샘플 개수를 나타내고, $y_m(k)$ 은 면허 사용자로부터 m 번째 CR 기기에 수신된 신호를 나타낸다. 여기서 $y_m(k)$ 의 가우시안 분포를 따른다. $y_m(k)$ 에서 잡음의 평균 전력을 1이라고 가정하면, m 번째 CR 기기의 순시(instantaneous) 신호 대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio) γ_m 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_m = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L s_m^2(k) \quad (4)$$

여기서 $s_m(k)$ 는 m 번째 CR 기기가 수신한 면허 사

용자의 송신 신호를 나타낸다.

면허 사용자의 신호가 존재하는 경우, Y_m 은 자유도(degree of freedom) L 의 central chi-square 분포를 따르고, 면허 사용자가 존재하지 않는 경우는 자유도 L 및 $\lambda_m = L\gamma_m$ 의 non-centrality 파라미터^[9]를 갖는 non-central chi-square 분포를 따른다.

$$Y_m \sim \begin{cases} \chi_L^2 & , H_0 \\ \chi_L^2(\lambda_m) & , H_1 \end{cases} \quad (5)$$

이 때 L 값이 무한히 크다고 가정하면, Y_m 의 확률 분포는 중심 극한 정리(central limit theorem)에 따라서 정규 분포의 특징을 가지게 되며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_m \sim \begin{cases} N(L, 2L) & : H_0 \\ N(L(1+\gamma_m), 2L(1+2\gamma_m)) & : H_1 \end{cases} \quad (6)$$

본 논문은 면허 사용자의 신호를 알 수 없다는 가정 하에 CR 기기가 면허 사용자의 유, 무를 판단하는 방법으로 에너지 검출 방식을 채택하였다^[10]. CR 기기에서는 수신 신호의 에너지를 임계값 T 와 비교하여 임계값 이상이면 면허 사용자가 존재한다고 판단하고, 수신 신호의 에너지가 임계값 미만일 경우 면허 사용자가 없다고 판단한다.

III. 협력 스펙트럼 센싱

3-1 경판정 방식(Hard Decision Method)

각 CR 기기에서 수신된 에너지 값을 통해 개별 판정을 내린 뒤, 개별 판정 결과를 융합 센터로 전송하여 최종 판정을 내리는 방식이다. 융합 센터는 AND, OR 및 Majority 방식 등의 최종 판정 방식을 통하여 면허 사용자의 유, 무를 판단한다. 이와 같은 판정 방식은 협력 스펙트럼 센싱에서 CR 기기의 사용자수를 반영하여 결정한다. AND 방식은 모든 CR 기기의 개별 판정 결과가 면허 사용자가 있다고 판정한 경우에만 최종 판정이 면허 사용자가 존재한다고 판정하고, OR 방식의 경우 CR 기기의 개별 판정 결과 중 하나라도 면허 사용자가 있다고 판단하면 최종 판정이 면허 사용자가 있다고 판정된다. AND나 OR 방식이 최종 판정을 결정하는데 있어 극단적인 방식을 채택하는데 반해, Majority 방식은 개별 판정

표 1. 각 최종 판정 방식에 따른 임계값
Table 1. Threshold values for different decision rules.

Decision rule	Threshold
AND	1/M
OR	M
Majority	M/2

결과의 다수의 의견을 반영하여 비교적 합리적이며 신뢰성 있는 판정 방식으로 볼 수 있다. 표 1은 최종 판정 방식에 따른 임계값을 나타낸 것으로 M은 CR 기기의 수를 나타낸다.

3-2 연판정 방식(Soft Decision Method)

일반적으로 연판정 방식은 경판정 방식에 비하여 복잡도는 높아지지만 센싱의 성능은 향상시킬 수 있다. 연판정 방식의 방법으로는 일반적으로 최대 비율 결합법(Maximal Ratio Combining: MRC), 동일 이득 결합법(Equal Gain Combining: EGC)이 있다. 연판정 방식은 경판정 방식에서 개별 판정을 내리고 융합 센터로 전송한 것과 달리, 수신된 에너지 값을 바로 융합 센터로 전송한 후에 융합 센터에서 각 연판정 방식에 따라서 최종 판정한다는 점이 다르다. 각 CR 기기에 수신된 신호의 에너지는 가중치를 적용하여 융합한다. 각 i번째 CR 기기에 적용된 가중치 성분을 w_i 이라고 할 때 가중치를 적용하여 각 CR 기기의 에너지 값을 융합한 값은 식 (7)과 같다.

$$Y_S = \sum_{i=1}^M w_i Y_i \quad (7)$$

Y_i 와 w_i 는 i번째 CR 기기의 독립적 성분으로서, 식 (7)에 따라 Y_S 의 가우시안 분포를 정리하면 식 (8)과 같다.

$$Y_S \sim \begin{cases} N(L \sum_{i=1}^M w_i, 2L \sum_{i=1}^M w_i^2) & : H_0 \\ N(L \sum_{i=1}^M w_i(1+\gamma_i), 2L \sum_{i=1}^M w_i^2(1+2\gamma_i)) & : H_1 \end{cases} \quad (8)$$

각 CR 기기의 수신 에너지를 융합한 결과는 임계값 T_S 와 비교하여 검출 확률은 $P_D = P_r(Y_S > T_S | H_1)$ 로 나타내고, 오검출 확률은 $P_F = P_r(Y_S >$

$T_S | H_0)$ 로 각각 나타낼 수 있으며, 식 (8)을 적용하면 P_D 와 P_F 는 각각 식 (9) 및 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_D = Q \left(\frac{T_S - L \sum_{i=1}^M w_i (1 + \gamma_i)}{\sqrt{2L \sum_{i=1}^M w_i^2 (1 + 2\gamma_i)}} \right) \quad (9)$$

$$P_F = Q \left(\frac{T_S - L \sum_{i=1}^M w_i}{\sqrt{2L \sum_{i=1}^M w_i^2}} \right) \quad (10)$$

위 식에서 $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 이다. 식 (9)와 (10)에서 P_D 는 아래의 식 (11)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_D = Q \left(\frac{Q^{-1}(P_F) - \sqrt{\frac{L}{2} \sum_{i=1}^M \alpha_i \gamma_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \alpha_i^2 (1 + 2\gamma_i)}} \right) \quad (11)$$

식 (11)의 $Q^{-1}(x)$ 는 $Q(x)$ 의 역함수이고, α_m 은 정규화된 가중치 성분으로서 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{w_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^M w_i^2}} \quad (12)$$

이 때 γ_i 성분은 오검출 확률 P_F 에 따르며, 식 (11)의 검출 확률이 최대화되었을 때 최적화된 가중치 성분을 가지게 되고, 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^M \alpha_i^2 = 1, 0 < \alpha_i < 1 \quad (13)$$

반면, CR 시스템에서 각 CR 기기에 수신된 면허 사용자의 에너지는 일반적으로 매우 낮다⁹⁾. 즉, i번째 CR 기기의 순시 SNR이 $\gamma_i \ll 1$ 으로 나타난다.

그러므로 식 (12)에서 $\sqrt{\sum_{i=1}^M \alpha_i^2 (1 + 2\gamma_i)} \approx 1$ 로 나타난다. 따라서 식 (12)은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_D \approx Q\left(Q^{-1}(P_F) - \sqrt{\frac{L}{2}} \sum_{i=1}^M \alpha_i \gamma_i\right) \quad (14)$$

3-3 최적화된 연관정 방식 제안

본 논문에서는 협력 스펙트럼 센싱의 성능을 높이고, 각 CR 기기가 융합 센터와의 이격 거리에 따른 센싱 성능을 반영하여 기존의 연관정 방식보다 효과적인 센싱을 수행하기 위해 CR 기기의 이동성을 반영한 거리에 따른 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱을 제안한다. CR 기기는 무선기기로 거리 및 네트워크 구성의 변화가 발생할 수 있는데, 이에 따라 각 CR 기기의 센싱 성능이 달라지므로 CR 기기의 개별 판정 결과에 가중치를 반영하여 개별 센싱 결과를 융합한다. 본 논문에서는 CR 기기의 거리의 변화를 적용한 가중치는 다음의 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w_i = \frac{\gamma_i dB}{L_i dB} = \frac{10 \log(Y_i / Y_m)}{10 v \log(d_i / d_m)} = \frac{10 \log(\gamma_i / \gamma_m)}{10 v \log(d_i / d_m)} \quad (15)$$

식 (15)에서 d_i 는 각 CR 기기와 면허 사용자간 현재 거리를 나타내고, Y_i 는 각 CR 기기의 수신 전력, v 는 경로 손실 상수이고, $Y_m = \sum Y_i/n$, d_m 은 모든 CR 기기와 면허 사용자간 거리의 평균값을 나타낸다.

IV. 모의 실험

본 논문은 이번 장에서는 모의 실험을 통하여 거리 기반의 가중치를 적용한 협력 스펙트럼 센싱의 성능을 나타낸다. 모의 실험을 위한 시스템 모델은 II장에서 설명한 바와 같이 면허 사용자의 신호를 OFDM 신호로 하였으며, 다수의 CR 기기(거리는 모두 다르다.) 단일 면허 사용자로 이루어져 있다. 스펙트럼 센싱 방법으로는 복잡도가 낮고 간단한 에너지 검출법을 적용하였으며, 임계값은 False alarm rate가 적용된 CFAR(Constant False Alarm Rate) 알고리즘^[10]에 의해 설정되었다. 임계값은 일반적으로 False alarm rate가 10 %인 값을 사용하며 임계값에 따라 스펙트럼 센싱 성능이 달라질 수 있다.

그림 3은 면허 사용자와 CR 기기간 거리가 모두

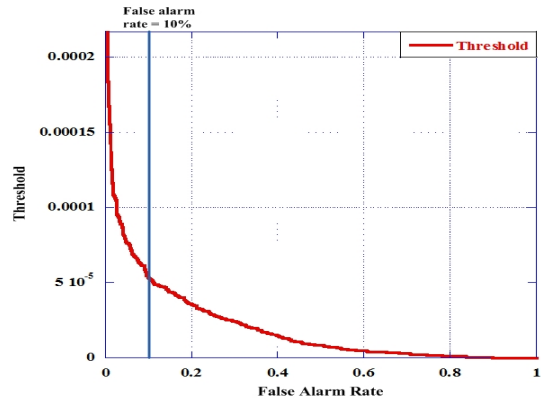


그림 2. 오검출 확률에 따른 임계값

Fig. 2. Measured threshold value versus false alarm rate.

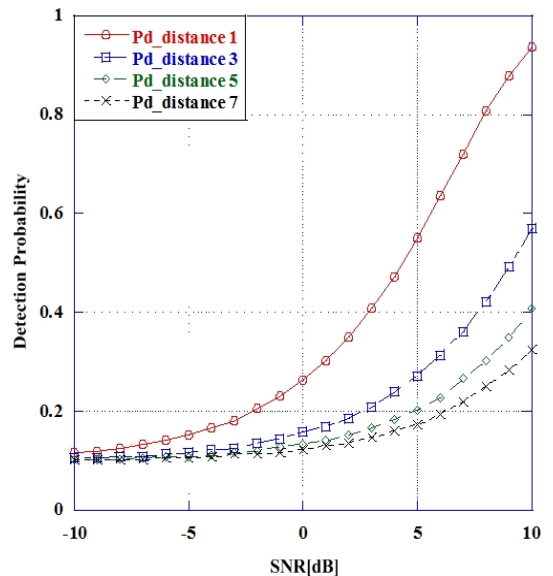


그림 3. 면허 사용자와 CR 기기 사이 거리 및 SNR에 따른 스펙트럼 센싱 확률

Fig. 3. Detection probability versus SNR for different distances between licensed and unlicensed users.

다를 경우, 단일 센싱을 수행하였을 때 검출 확률을 나타낸 것이다. Distance 뒤에 숫자가 클수록 면허 사용자와의 거리가 먼 CR 기기이다.

실험 결과, CR 기기와 면허 사용자간 거리가 멀수록 경로 손실 발생에 따라 수신 전력이 떨어지게 되어 검출 확률도 낮아지게 됨을 알 수 있다. 따라서 거리가 먼 CR 기기의 경우, 면허 사용자의 신호를 검

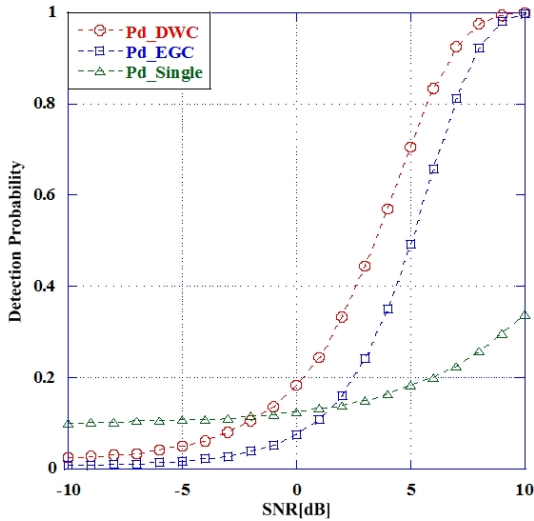


그림 4. DWC와 EGC의 검출 확률 비교
Fig. 4. Detection probability comparison between DWC combining with EGC combining.

출하는 것이 매우 힘든 상황이 된다.

그림 4는 동일 이득 결합(Equal Gain Combining: EGC)을 적용한 경우의 협력 스펙트럼 센싱과 거리 기반 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱의 검출 확률을 비교하여 나타낸 결과이다. 동일 이득 결합이 적용된 협력 스펙트럼 센싱은 거리를 무시하고, 가중치가 모든 CR 기기마다 동일하게 적용하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행한 것으로 거리 기반의 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱이 동일 이득 결합 방식에 비하여 검출 확률이 높게 나타난다. 또한, 적절한 검출 확률을 나타내고 있어 멀리 떨어진 CR 기기의 경우 협력 스펙트럼 센싱에 따른 혜택을 더 많이 받게 되며, 모든 CR 기기에서 효과적으로 면허 사용자의 유, 무를 알게 되어 단일 센싱을 수행한 경우보다 유휴 주파수를 보다 효과적으로 사용할 수 있게 된다.

V. 결 론

본 논문은 면허 사용자와 CR 기기 사이의 거리 기반 가중치가 적용된 결합 방식을 사용하여 에너지 검출 기반 협력 스펙트럼 센싱을 제안하였다. CR 기기는 무선기기로서 이동에 따른 네트워크의 구조 및 면허 사용자와의 거리가 유동적으로 변화하게 되는

데, 동일 이득 결합 방식은 거리의 변화를 배제하고 모든 CR 기기의 가중치를 동등하게 가정하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행하였다. 본 논문은 거리의 변화를 반영한 가중치를 제안하였고, 이에 따른 분석 및 모의 실험 결과를 나타내었다. 거리에 따라 단일 센싱을 수행한 결과, 거리가 먼 CR 기기의 경우 면허 사용자의 신호를 검출하기 매우 힘든 것으로 알 수 있었다. 거리 기반 가중치를 적용한 협력 스펙트럼 센싱을 수행한 결과, 거리에 따라 다양한 검출 확률을 나타낸 단일 센싱에 비해 비교적 안정된 검출 확률을 나타내는 것으로 알 수 있었으며, 동일 이득 결합을 반영하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행한 것보다 우수한 스펙트럼 센싱을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] FCC, "Spectrum policy task force", *Rep. ET Docket*, no. 02-135, 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. Y. Kim, *Cognitive Radio Communications*, Gyo-bo Publishers, Seoul, Korea, 2008.
- [4] 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.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. Vuran, and S. Mohanty, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey", *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127-2159, May 2006.
- [6] Z. Quan, S. Cui, and A. H. Sayed, "An optimal strategy for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks", in *Proc. of IEEE GLOBECOM 2007*, pp. 2947-2951, Nov. 2007.
- [7] G. Ganesan, Y. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks", in *Proc. of IEEE DySPAN 2005*, pp. 137-143, Nov. 2005.
- [8] A. Ghasemi, E. S. Sousa, "Asymptotic performance

of collaborative spectrum sensing under correlated log-normal shadowing", *IEEE Commun. Lett.*, vol 11, no. 1, pp. 34-36, Jan. 2007.

[9] F. F. Digham, M. -S. Alouini, and M. K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over

fading channels", in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 5, pp. 3575-579, May 2003.

[10] G. Minkler, J. Minkler, *CFAR*, Magellan Book Company, 1990.

이 소 영



2004년: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
2008년 8월~현재: 광운대학교 전자공학과 석사과정
2010년 7월~현재: 한국전파진흥협회
[주 관심분야] 무선 통신, Cognitive

Radio, 가시광 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

entist

2001년~현재: 광운대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 디지털 통신, 무선 통신, 채널부호화