

논문 2010-47TC-7-7

인지무선 시스템을 위한 거리기반 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱

(Cooperative Spectrum Sensing with Distance Based Weight for Cognitive Radio Systems)

이 소 영*, 이 재 진**, 김 진 영***

(So Young Lee, Jaemin Lee, and Jin Young Kim)

요 약

본 논문은 면허사용자와 CR기기 사이의 거리에 따른 가중치가 적용된 결합방식 (Distance based weight combining : DWC)을 사용하여 에너지 검출 기반 협력 스펙트럼 센싱을 제안하고 이에 따른 분석 및 모의실험 결과를 나타낸다. 면허사용자의 신호는 OFDM기반의 시스템을 가정하였으며 면허 사용자와 CR 기기 사이의 무선 채널은 가우시안 (Gaussian) 채널로 모델링 하였다. 에너지 검출법을 위한 임계값은 각 채널의 SNR (Signal to Noise Ratio)에 따라 다르게 적용되었으며 각 채널의 잡음신호의 평균값으로 가정하였다. DWC를 적용한 협력 스펙트럼 센싱을 수행한 결과 거리에 따라 다양한 검출확률을 나타낸 단일 센싱에 비해 비교적 안정된 검출확률을 나타내는 것으로 알 수 있었으며, 동일이득 결합을 반영하여 협력스펙트럼 센싱을 수행한 것 보다 우수한 스펙트럼 센싱을 나타내었다.

Abstract

In this paper, we analysis the performance of cooperative spectrum sensing with distance based weight 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.

Keywords : Cognitive radio(CR), cooperative spectrum sensing, energy detection, equal gain combining(EGC), distance based weight combining(DWC)

I. 서 론

무선서비스의 급증 및 정보통신 기술의 발전에 따라 주파수 자원의 수요는 점점 증가하게 되었다. 그러나 주파수 자원은 국제전기통신연합 (ITU : International Telecommunication Union)의 기고문에서 “유한한 천연 자원(Limited natural resource)” 표현한 것처럼 제한된

* 학생회원, *** 정회원, 광운대학교
(Kwangwoon University)

** 정회원, 숭실대학교
(Soongsil University)

※ “본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2010-(C1090-1011-0005))

접수일자: 2010년6월7일, 수정완료일: 2010년7월19일

자원으로서 급격한 주파수 수요에 따른 공급이 어려운 것이 현실이다. 한국 전자통신 연구원의 주파수 사용현황 조사에 따르면 무선기기 개발 시 애로사항 설문결과 운용 채널 수 부족에 대한 응답이 약 20%에 이를 만큼 가용 채널수가 부족하다^[1]. 기존의 주파수 사용은 주파수 정책에 따라 국가적 차원에서 관리되고 있으며 제한된 면허 사용자에게 독점적 사용권을 제공하여 허가되지 않은 사용자는 기 할당된 주파수 대역을 사용할 수 없도록 하였다.

이에 따라 주파수를 보다 효율적이고 체계적으로 사용할 수 있는 기술에 대한 관심이 높아졌으며, 그 중 주파수 공유기술인 SDR (Software Define Radio)기반의 인지무선통신에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

인지무선통신은 주파수를 할당받은 면허 사용자가 해당 주파수를 사용하지 않을 경우, 비면허 사용자가 면허사용자에게 간섭을 주지 않고 해당 주파수를 사용할 수 있는 기술로서 제한된 주파수자원을 효율적으로 활용하기 위해 제안된 기술이다^[2-3]. 연방 통신 위원회 (FCC : Federal Communications Commission)는 TV 대역에 대한 비면허 사용자의 접근을 검토 중이며, 현재 제한적으로 DTV대역에 대해 무선마이크의 사용을 허락하고 있다. 또한 IEEE는 IEEE 802.22 working group^[4]을 구성하였으며, 각 국의 주요기관들 역시 인지 무선 통신 및 주파수 재배치에 따른 기술기준을 구축하기 위해 연구 중이다.

인지무선통신의 가장 핵심 기술은 주파수 스펙트럼 환경을 검출하여 주파수 사용 현황을 감지하는 스펙트럼 센싱으로 CR센서가 장착된 비면허 사용자(이하 CR 기기라고 한다.)는 지속적으로 주변 환경을 인식하여 변화된 상황에 따라 시스템을 적절하게 적용하도록 한다. 스펙트럼 센싱 기술은 크게 에너지 검출방식 (Energy detection), 정합 필터 검출방식 (Matched filter detection), 특성 검출 방식 (Cyclostationary detection)으로 나눌 수 있으며 그중 가장 복잡도가 낮고 간단한 시스템인 에너지 검출 방식이 주로 사용되고 있다^[5].

그러나 스펙트럼 센싱은 음영지역 및 잠복터미널 등에 의하여 성능의 열화가 발생하게 되는데 이 같은 문제를 해결하고 스펙트럼 센싱의 신뢰성 및 정확도를 높이기 위해 다수의 CR기기들이 센싱 정보를 공유하는 협력 스펙트럼 센싱 기술이 제안되었다^[6-8]. 협력 스펙트럼 센싱은 다수의 CR기기가 개별 센싱한 정보를 공유하여 페이딩 및 잡음 등에 의한 영향을 완화하여 센

싱의 성능을 높일 수 있다.

본 논문은 면허사용자와 CR기기 사이의 거리에 따른 가중치가 적용된 결합방식 (Distance based weight combining : DWC)을 사용하여 에너지 검출 기반 협력 스펙트럼 센싱을 제안하고, 이에 따른 분석 및 모의실험 결과를 나타낸다. 면허사용자의 신호는 OFDM기반의 시스템을 가정하였으며 면허 사용자와 CR 기기 사이의 무선 채널은 가우시안 (Gaussian) 채널로 모델링 하였다. 에너지 검출법을 위한 임계값은 각 채널의 SNR에 따라 다르게 적용되었으며 각 채널의 잡음신호의 평균값으로 가정하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 협력 스펙트럼 센싱의 시스템 모델에 대하여 설명하고, 제 III장에서는 본 논문에서 제안하는 거리기반 가중치가 적용된 협력스펙트럼 센싱에 대해 설명하고 분석한다. 제 IV장은 모의실험을 통하여 제안한 협력 스펙트럼 센싱의 성능을 비교하였고, 마지막으로 본 논문의 결론을 제 V장에서 언급하였다.

II. 협력 스펙트럼 센싱 시스템 모델

본 논문은 면허사용자의 신호를 OFDM 신호로 구현하여 스펙트럼 센싱을 수행하였다. OFDM 신호는 4세대 이동통신의 핵심기술로 고속의 데이터 전송이 가능하다. 특히, OFDM 기반의 시스템은 다중 경로 페이딩 채널에서 강한특성을 보인다. 다음 식 (1)은 OFDM신호를 시간함수로 나타낸 것이다.

$$x(t) = \sum_{k=1}^K X_k[n] e^{j2\pi k \Delta f t} \quad (1)$$

K 는 부반송파의 수이고, Δf 는 부반송파 주파수 간격, $X_k[n]$ 은 k 번째 부반송파에서 n 번째 전송 심볼을 나타낸다. 그리고 $n = t/T_s$ 이고, T_s 는 심볼간격을 나타낸다.

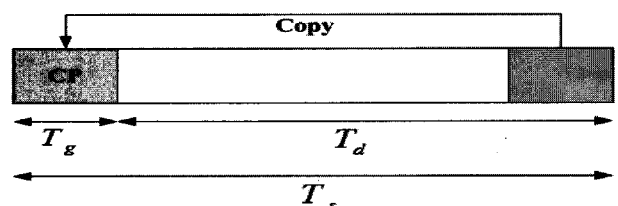


그림 1. OFDM 신호 구조
Fig. 1. OFDM symbol structure.

그림 1에서 OFDM 신호는 전체 T_s 의 길이를 가지고 있고 데이터 정보와 ISI (Inter symbol interference)를 방지하기 위해 삽입된 cyclic prefix (CP)는 각각 T_d 와 T_s 의 간격을 가지고 있다. 본 논문에 사용된 OFDM 신호는 부반송파의 숫자를 256개로 가정하였고 CP의 길이는 전체 데이터 간격의 1/8로 가정하였다.

스펙트럼 센싱의 목적인 면허사용자 검출은 해당 주파수 대역에 면허 사용자 사용여부에 따라 다음의 식 (2)와 같이 면허사용자가 사용 중일 때와 사용 중이지 않을 때의 두 가지 상태로 가정할 수 있다.

$$y(t) = \begin{cases} v(t), & H_0 \\ hs(t) + v(t), & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)에서 h 는 무선 채널의 감쇄 상수를 나타내고, $s(t)$ 는 면허 사용자의 신호를 나타낸다. $v(t)$ 는 독립적인 부가 백색 가우시안 잡음 (AWGN : Additive White Gaussian Noise)으로 가정하였다. 그리고 H_0 는 면허사용자가 주파수를 사용하지 않는 유휴상태를 나타내고, H_1 은 면허 사용자가 주파수를 사용 중임을 나타낸다.

각 CR기기의 신호 대 잡음비 (SNR: Signal to Noise ratio) γ 는 $\gamma = W/(N_0B)$ 로 정의할 수 있으며 W 는 CR 기기가 수신한 면허 사용자의 신호 전력을 나타낸다.

면허 사용자의 신호가 존재하는 경우 Y 은 자유도 (Degree of Freedom) $2r$ 의 central chi-square 분포를 따르고, 면허 사용자가 존재하지 않는 경우는 자유도 $2r$ 및 $2r\gamma$ 의 non-centrality 파라미터 ^[9]를 갖는 non-central chi-square 분포를 따른다.

$$Y \sim \begin{cases} \chi_{2r}^2, & H_0 \\ \chi_{2r}^2(2r\gamma), & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

Y 의 확률 분포 함수는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_Y = \begin{cases} \frac{y^{r-1} e^{-y/2}}{2^r \Gamma(r)} & H_0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{y}{2r\gamma} \right)^{r-1} e^{-\frac{2r\gamma+y}{2}} I_{r-1}(\sqrt{2r\gamma y}) & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)의 $\Gamma(\cdot)$ 은 감마 함수이고 $I_v(\cdot)$ 은 v 가 매개변수인 제1종 베셀함수이다.

협력 스펙트럼 센싱에 대한 간략한 시스템 모델은 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 면허 사용자 (Primary

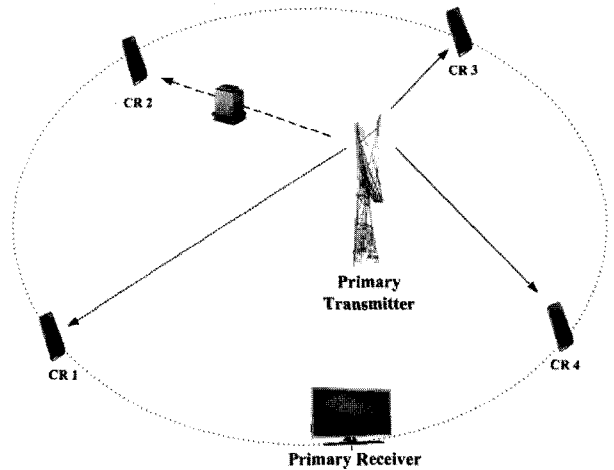


그림 2. 협력 스펙트럼 센싱 시스템 모델
Fig. 2. System model of distributed spectrum sensing.

User)와 N 개의 CR 기기로 이루어져있다고 가정한다.

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

III. 거리기반 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱

그림 2와 같은 협력 스펙트럼 센싱 시나리오에서 각 CR 기기는 다양한 페이딩 및 음영에 의한 성능의 열화가 발생하게 된다. 예를 들면 위 시나리오에서 CR2는 주변 조형물에 의한 음영이 발생하게 되고 이에 따라 CR2에 수신된 신호의 파워가 감소하게 되어 스펙트럼 센싱의 정확도가 다소 떨어질 수 있다. 또한 CR1은 CR3에 비해 경로에 의한 손실이 더 많이 발생하게 되어 CR1의 스펙트럼 센싱 성능이 CR3에 비하여 떨어지게 된다.

이와 같이 각 CR기기는 무선기기로 거리 및 네트워크 구성의 변화가 발생할 수 있는데 본 논문에서는 CR 기기의 이동성을 반영하여 거리에 따른 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱을 제안한다. CR 기기의 거리의 변화를 적용한 가중치는 다음의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w_i = \frac{\gamma_i dB}{L_i dB} = \frac{10 \log(Y_i/Y_m)}{10 v \log(d_i/d_m)} = \frac{10 \log(\gamma_i/\gamma_m)}{10 v \log(d_i/d_m)} \quad (5)$$

식 (5)에서 d_i 는 각 CR 기기와 면허사용자간 현재 거리를 나타내고, Y_i 는 각 CR 기기의 수신전력, v 는 경로 손실 상수이고, $Y_m = \sum Y_i/n$, d_m 은 모든 CR 기기와 면허사용자간 거리의 평균값을 나타낸다. 위의 거리에 따른 가중치가 반영된 CR 기기의 수신에너지를 융합한 결과는 다음 식 (6)과 같다.

$$Y_t = \sum_{i=1}^n w_i Y_i \quad (6)$$

식 (3)은 식 (6)에 의해 다음 식 (7)과 같은 분포를 가지게 된다.

$$Y_t = \begin{cases} X_{2nr}^2, & H_0 \\ X_{2nr}^2 (2r\gamma_t), \text{ where, } \gamma_t = \sum_{i=1}^n w_i \gamma_i & H_1 \end{cases} \quad (7)$$

각 CR기기의 수신에너지를 융합한 결과는 임계값 T 와 비교하여 검출 확률은 $P_D = P_r(Y_t > T|H_1)$ 로 나타내고 오검출 확률은 $P_F = P_r(Y_t > T|H_0)$ 로 각각 나타낼 수 있으며 P_D 와 P_F 는 각각 식 (8) 및 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_D = Q \left(\frac{T - 2r \sum_{i=1}^n w_i (1 + \gamma_i)}{\sqrt{4r \sum_{i=1}^n w_i^2 (1 + 2\gamma_i)}} \right) \quad (8)$$

$$P_F = Q \left(\frac{T - 2r \sum_{i=1}^n w_i}{\sqrt{4r \sum_{i=1}^n w_i^2}} \right) \quad (9)$$

위 식에서 $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 이다.

IV. 실험

본 논문은 이번 장에서는 모의실험을 통하여 거리기반의 가중치를 적용한 협력 스펙트럼 센싱의 성능을 나

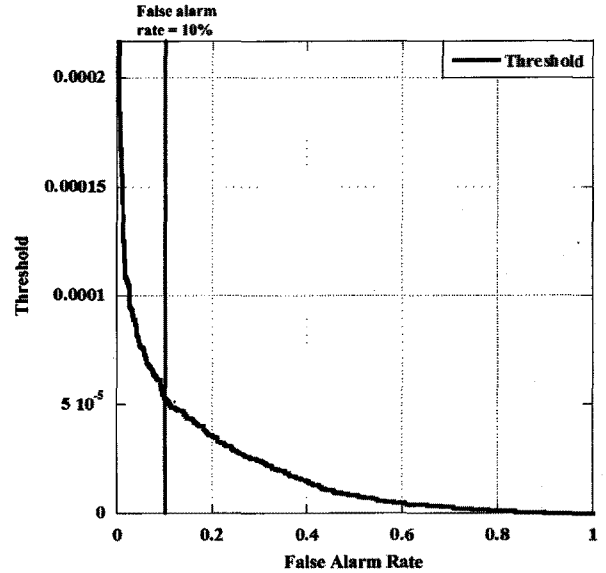


그림 3. 오검출 확률에 따른 임계값
Fig. 3. Measured threshold value versus false alarm rate.

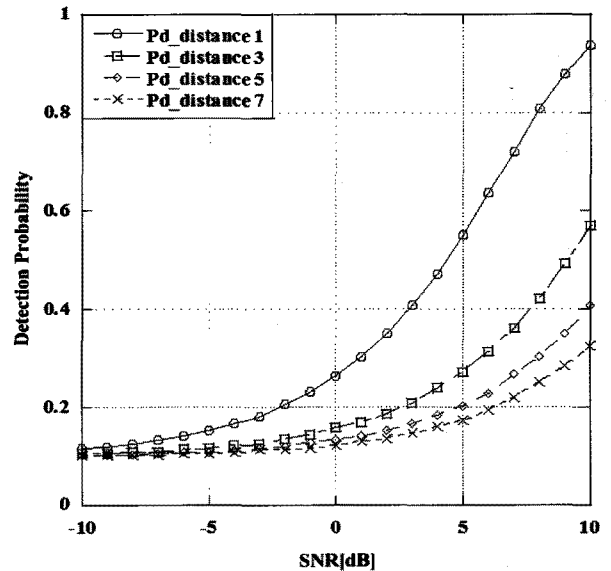


그림 4. 면허 사용자와 CR 기기 사이 거리 및 SNR에 따른 스펙트럼 센싱 확률
Fig. 4. Detection probability versus SNR for different distances between licensed and unlicensed users.

타낸다. 모의실험을 위한 시스템 모델은 II장에서 설명한바와 같이 면허 사용자의 신호를 OFDM 신호로 하였으며 다수의 CR기기 (거리는 모두 다르다) 단일 면허 사용자로 이루어져있다. 스펙트럼 센싱방법으로는 복잡도가 낮고 간단한 에너지 검출법을 적용하였으며 임계값은 그림 3과 같이 False alarm rate가 적용된 CFAR (Constant False Alarm Rate) 알고리즘 [11]에 의해 설정

되었다. 임계값은 일반적으로 False alarm rate가 10%인 값을 사용하며 임계값에 따라 스펙트럼 센싱 성능이 달라질 수 있다.

그림 4는 면허사용자와 CR 기기간 거리가 모두 다를 경우 단일 센싱을 수행하였을 때 검출 확률을 나타낸 것이다. distance뒤에 숫자가 클수록 면허사용자와의 거리가 먼 CR기기이다.

실험 결과 CR기기와 면허사용자간 거리가 멀수록 경로 손실 발생에 따라 수신 전력이 떨어지게 되어 검출 확률도 낮아지게 됨을 알 수 있다. 따라서 거리가 먼 CR기기의 경우 면허사용자의 신호를 검출하는 것이 매우 힘든 상황이 된다.

이러한 문제점을 해결하기위해 거리에 따른 가중치를 적용하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행한 결과는 다음 그림 5와 같다. 그림 5는 False alarm rate에 따른 임계값이 각각 5%와 10%일 때 거리기반 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱의 검출확률이다. False alarm rate가 낮을수록 임계값이 커지기 때문에 검출확률은 낮아지게 되는 것을 실험 결과를 통하여 알 수 있다. 또한 적절한 검출확률을 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 유

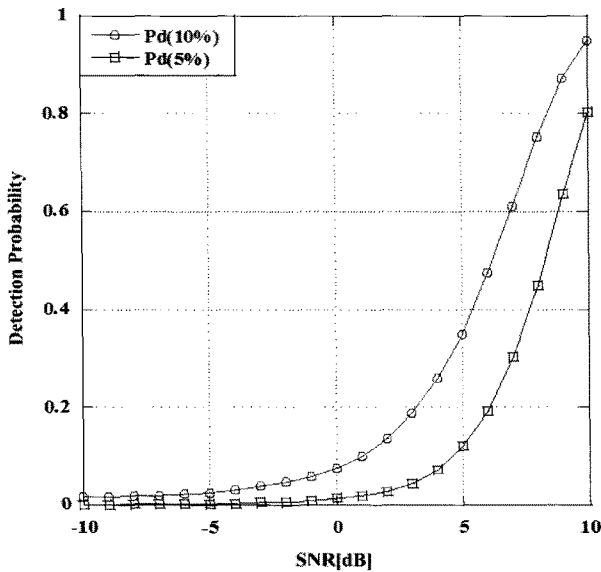


그림 5. 거리기반 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱의 검출확률

Fig. 5. The detection probability of cooperative spectrum sensing with weighted based on distance.

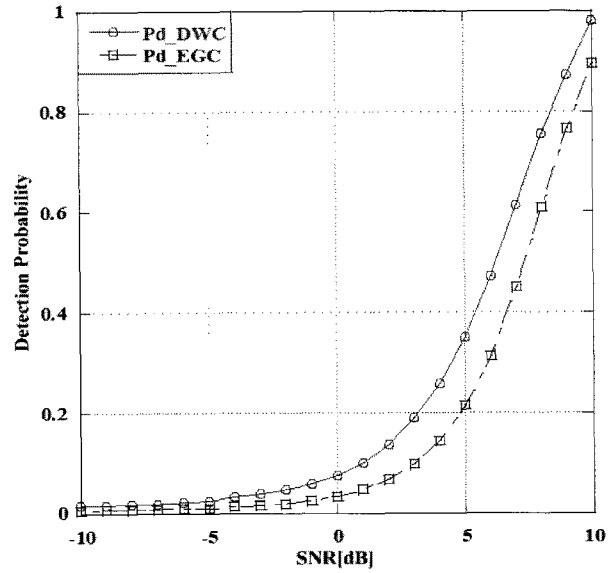


그림 6. DWC와 EGC의 검출확률 비교

Fig. 6. Detection probability comparison between DWC combining with EGC combining.

휴 주파수를 보다 효과적으로 사용할 수 있게 된다.

그림 6은 동일이득 결합 (Equal gain combining : EGC)을 적용한 경우의 협력 스펙트럼 센싱과 거리기반 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱의 검출확률을 비교하여 나타낸 결과이다.

동일이득 결합이 적용된 협력 스펙트럼 센싱은 거리를 무시하고 가중치가 모든 CR기기마다 동일하게 적용하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행한 것으로 거리기반의 가중치가 적용된 협력 스펙트럼 센싱이 동일이득 결합 방식에 비하여 검출확률이 높게 나타난다.

V. 결 론

본 논문은 면허사용자와 CR기기 사이의 거리에 따른 가중치가 적용된 결합방식을 사용하여 에너지 검출 기반 협력 스펙트럼 센싱을 제안하였다. CR 기기는 일반적으로 무선기기로서 이동에 따른 네트워크의 구조 및 면허사용자와의 거리가 유동적으로 변화하게 되는데 일반적 협력 스펙트럼 센싱에서 동일이득 결합방식은 거리의 변화를 배제하고 모든 CR 기기의 가중치를 동등하게 가정하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행하였다. 본 논문은 거리의 변화를 반영한 가중치를 제안하였고 이에 따른 분석 및 모의실험 결과를 나타내었다. 거리에 따라 단일 센싱을 수행한 결과 거리가 먼 CR 기기의 경우 면허사용자의 신호를 검출하기 매우 힘든 것으로 알 수

있었다. WC를 적용한 협력 스펙트럼 센싱을 수행한 결과 거리에 따라 다양한 검출확률을 나타낸 단일 센싱에 비해 비교적 안정된 검출확률을 나타내는 것으로 알 수 있었으며, 동일이득 결합을 반영하여 협력스펙트럼 센싱을 수행한 것 보다 우수한 스펙트럼 센싱을 나타내었다.

참고 문헌

[1] 장재혁, 안춘모, 김태한, 성기훈, “국내 무선기기 산업 및 주파수 사용현황 조사,” 전자통신동향분석, 제 24권 3호, 139-146쪽, 2009년 6월

[2] J. Y. Kim. *Cognitive Radio Communications*, Gyobo Publishers ,Seoul ,Korea, 2008.

[3] J. Mitola III and G. Q. Maguire Jr., “Cognitive radio: making software radios more personal,” *IEEE Personal Commun.*, vol. 6, No. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.

[4] 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.

[5] T. Yucda and H. Arslan, “A survey of spectrum

sensing algorithms for cognitive radio applications,” *IEEE Commun. Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.

[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 and 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] H. Urkowitz, “Energy detection of unknown deterministic signals,” in *Proc. of IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-531, Apr. 1967.

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

저 자 소 개



이 소 영(정회원)
2004년 광운대학교 전자공학부
학사 졸업.
2010년 현재 광운대학교 전파공학과 석사 과정.

<주관심분야 : 무선통신, Cognitive Radio, 가시광통신>



김 진 영(정회원)
1998년 서울대학교 전자공학과
공학박사
2000년 미국 Princeton University,
Research Associate
2001년 SK 텔레콤 네트워크
연구원 책임연구원

2009년 미국 M.I.T 공대 Visiting Scientist
2010년 현재 광운대학교 전파공학과 부교수
<주관심분야 : 디지털통신, 무선통신, 채널부호화>



이 재 진(정회원)
1983년 2월 연세대학교
전자공학과 학사
1984년 12월 U. of Michigan,
Dept. of EECS 석사
1994년 12월 Georgia Tech. Sch.
of ECE 박사

1995년 1월 ~1995년 12월 Georgia Tech. 연구원
1996년 1월 ~1997년 02월 현대전자 정보통신
연구소 책임 연구원
1997년 3월 ~2005년 8월 동국대학교
전자공학과 부교수
2010년 현재 숭실대학교 정보통신전자공학부
교수

<주관심분야 : 통신이론, 채널코딩, 기록저장 시스템>