한국ITS학회논문지
제7권, 제6호 (2008년 12월)
pp.101~109

클러스터링 기반의 CR시스템에서 가중치 협력 스펙트럼 센싱 기술의 개선연구

Improved Weighted-Collaborative Spectrum Sensing Scheme Using Clustering in the Cognitive Radio System

최 규 진* (Gyu-Jin Choi) 손 성 환** (Sung-Hwan Shon) 이 주 관*** (Joo-Kwan Lee) 김 재 명**** (Jae-Moung Kim)

요 약

본 논문은 클러스터링 기법을 도입하여 기존에 제안된 가중치 협력 스펙트럼 시스템에서 실질적으로 구하지 못했던 Pd를 구하고, 새로운 가중치 생성 알고리즘을 통하여 1차 사용자 신호의 감지 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 유사한 채널을 갖는 CR 사용자를 클러스터링 기법을 이용하여 그룹화하여 각각의 사용자로부터 획득한 센싱 결과를 토대로 Pd를 계산하였다. 또한, 각 클러스터의 검출확률의 제곱 합을 이용하여 가중치(Wj(n+1))를 생성하였다. 이는 기존의 방식보다 센싱 성능이 우수하였으며, 특히 1차 사용자의 신호가 갑자기 사라졌을 경우 신호가 없는 상황에서의 검출 확률인 false alarm rate가 낮아지는 결과를 보였다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 이를 검증한다.

Abstract

In this paper, we introduce clustering scheme to calculate probability of detection which is practically required for conventional weighted-collaborative sensing technique. We also propose an improved weighted-collaborative spectrum sensing scheme using new weight generation algorithm to achieve better performance in Cognitive Radio systems. We calculate Pd in each cluster which is a CR users group with similar channel situation. New weight factor is generated using square sum of all cluster's Pds. Simulations under slow fading show that we can get better total detection probability and lower false alarm rate when PU (Primary User) suddenly terminates their transmission.

Key words: Cognitive radio(CR), spectrum sensing, energy detection, weighted-collaborative sensing, clustering

---

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임. (No. M10600000194-06J0000-19410).
본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 지원으로 수행되었음.(R01-2006-000-10266-0(2008))
* 주저자 : 인하대학교 정보통신대학원 석사과정
** 공저자 : 인하대학교 정보통신대학원 박사과정
*** 공저자 : 인하대학교 정보통신대학원 석사과정
**** 공저자 : 인하대학교 정보통신대학원 교수
논문접수일 : 2008년 11월 10일
† 논문심사일 : 2008년 12월 3일
† 게재확정일 : 2008년 12월 5일

Ⅰ. 서 론

최근 무선망을 이용한 음악, 게임, UCC 등 다양한 서비스의 사용이 증가하면서, 이동 중에도 초고속 인터넷을 사용하고자 하는 욕구가 증가함에 따라 광대역 네트워크의 수요가 증가하여, 넓은 주파수 대역폭을 필요로 하는 시스템이 등장하였다. 또한, 도래하는 Ubiquitous Network 사회에서는 모든 기기들이 무선 네트워크로 연결되어 비즈니스, 의료, 오락, 교육, 행정 등의 생활의 전 분야에서 언제, 어디서, 누구와도 끊김 없는 정보통신 서비스를 이용할 수 있을 것이다. 모든 기기들이 무선 네트워크로 연결되기 위해선 무수한 전파 자원을 필요로 한다. 이러한 기술 개발에 필요한 주파수의 확보는 기술 구현의 핵심 사항이고, Ubiquitous 사회로의 진입을 판가름하는 결정적인 요소가 될 것이다.

동일한 주파수 대역을 다양한 시스템들이 함께 이용할 수 있는 주파수 공유 기술의 개발이 주파수의 부족을 해결 할 수 있는 방법으로 등장하였다. J. Mitola는 주파수가 할당되어 있지만, 실제로 사용하지 않고 비어있는 주파수를 감지하여 효율적으로 사용하는 무선 인지(Cognitive Radio : CR)기술을 제시하였다 [1]. 이러한 CR 기술을 구현하기 위해선 기존 시스템(Primary User : PU)의 신호를 정확히 감지해야하며 이러한 스펙트럼 센싱 기술은 CR 기술의 핵심으로써 현재 활발히 연구되고 있다. 대표적인 스펙트럼 센싱 기술로서 spectral correlation 특성을 이용한 cyclostationary detection 방법과 비교적 간단하고 구현이 쉬운 에너지 검출 기술이 있다.

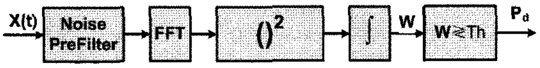
이러한 기술은 CR 사용자가 단독으로 감지하는 기술로써, 채널에 의한 신호의 감쇄가 심할 경우 감지 성능이 급격히 감소되는 성향을 갖고 있기에 다수의 CR 사용자가 센싱 정보를 공유하여 성능을 개선하는 협력 센싱 기법이 최근 각광받고 있다. 또한, 센싱 정보를 단순히 공유하지 않고 검출 성능에 따라 가중치를 부여하여 센싱 성능을 개선하는 방법론이 선행 연구를 통해 제안되었다 [2]. 그러나 이 기법은 각각의 CR 사용자의 Pd를 직접적으로 도출할 수 있는 방법을 제시하지 못하였다. 또한, 이 기법은 PU 신호가 존재할 경우에는 뛰어난 성능을 나타내었으나, 1차 사용자 신호의 전송이 중단될 경우, false alarm rate가 급격히 증가하는 단점을 나타내었다.

본 논문에서는 Pd를 도출하기 위해 클러스터링 기법을 도입하고 가중치(weight)를 부여하는 방법을 개선하여 스펙트럼 센싱의 신뢰도를 향상시키며 1차 사용자 신호의 전송이 갑자기 중단된 상황에서 false alarm rate를 감소시킬 수 있는 방법을 제안한다.

먼저, 지역 스펙트럼 센싱으로 사용된 energy detection, OR-rule에 기초한 conventional 협력 센싱 기술과 가중치 협력 센싱 기술을 소개하고, 본 논문에서 제안할 클러스터 기반의 개선된 가중치 협력 센싱 기법을 기술하고 시뮬레이션을 통하여 검증한 후, 결론과 향후 연구되어야 할 방안에 대해 기술한다.

Ⅱ. 에너지 검출 기술

1. 검출 과정



<그림 1> 에너지 검출기의 블록 다이어그램
<Fig. 1> Block diagram of the energy detection

<그림 1>은 고전적인 에너지 검출 방식을 나타낸 블록 다이어그램이다. 이 방법은 시간 T동안 노이즈 프리 필터를 통과한 수신 신호를 fast fourier 변환 후, 각 스펙트럼 성분을 제곱한다. 또한, 제곱한 스펙트럼 성분을 적분하여 노이즈 레벨에 따라 최적화된 문턱 값과 비교하여 수위의 사용자 신호의 존재 유무를 판단하는 비교적 간단한 기술이다 [3]. 수신된 신호의 추정된 에너지가 문턱 값보다 작다면, 해당 스펙트럼 밴드 내에 신호가 존재하지 않는다고 판단하며, 문턱 값보다 클 경우 신호가 존재한다고 판단한다. 일반적으로, 구간 T가 클수록 노이즈에 대한 영향이 작아지며, FFT의 사이즈가

클수록 스펙트럼의 해상도가 높아진다. 에너지 검출 방식은 낮은 연산량을 가지고 있기에, 2차 사용자의 스펙트럼 센싱 기술로써 가장 범용화된 기술로 고려되고 있다.

2. 검출 통계

에너지 검출 기술의 검정 통계량은 다음과 같이 표현된다.

$$W=\sum_{i=1}^{2TB}\frac{y_i^2}{2B\sigma^2} \quad (1)$$

T와 B는 각각 observation interval과 채널의 bandwidth를 나타내고, σ2 은 노이즈 파워, yi는 추출된 신호를 나타낸다.

고전적인 에너지 검출 방법은 다음과 같은 두 가지 가정에서 수행된다.

$$H_0: \quad y(t)=n(t) \quad (2)$$

$$H_1: \quad y(t)=h(t)*x(t)+n(t) \quad (3)$$

수식 (2,3)에서 y(t)는 CR 사용자가 수신한 신호를 나타내고, x(t)는 PU가 전송한 신호를 나타낸다. n(t)는 AWGN(additive white Gaussian noise)이며, h(t)는 채널 응답을 나타낸다.

가정 H0는 관찰하는 밴드 내에 전송된 신호가 없음을 나타내며, 가정 H1 는 관찰하는 밴드 내에 페이딩에 의해 감쇄된 신호가 존재함을 나타낸다. H0의 경우 W는 평균이 0이고 분산이 1인 2TB 가우시안 랜덤 변수 제곱의 합이며 수식 (4)와 같은 형태로 표현할 수 있으며,

$$W=\sum_{i=1}^{2TB}\frac{n_i^2}{2B\sigma^2} \quad (4)$$

수식 (5)와 같이 2TB의 자유도를 갖는 chi-square

$$f(x)=\frac{x^{\frac{(2TB)-2}{2}}}{2^{TB}\Gamma(TB)}e^{-x/2}u(x) \quad (5)$$

distribution의 특성을 갖는다.

에너지 검출 기술의 Pfa(false alarm probability)는 수식 (6)과 같다.

$$P_{fa}=\Pr(W>\lambda/H_0)=\Pr(\chi^2_{2TB})>\lambda) \quad (6)$$

또한, χ2TB2는 2TB의 자유도를 갖는 chi-square 랜덤 변수를 나타내며 λ는 검출기의 성능에 영향을 끼치는 문턱 값을 나타낸다. 검출기의 false alarm probability를 정하면, 문턱 값 λ는 chi-square함수의 역을 이용하여 구할 수 있다.

수식 (7)은 에너지 검출 기술의 detection probability를 나타낸다.

$$P_d=\Pr(W>\lambda/H_1) \quad (7)$$

일반적으로 전송 신호의 특성을 알 수 없으므로 가정 H1에 따른 검정통계 W의 정확한 표현을 구할 수 없으나 [3]에서 제시한 것처럼 평균이 제로가 아닌 가우시안 통계를 갖는 전송신호로 가정하고 검정통계를 구할 수 있다.

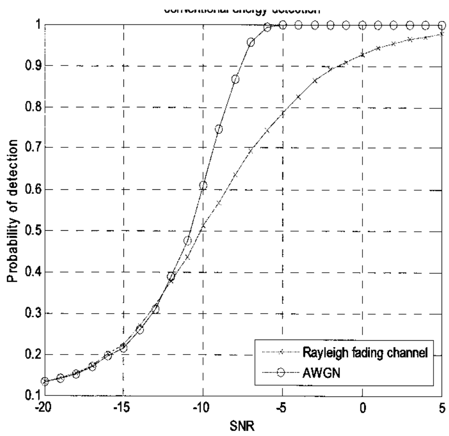
SNR에 따른 Detection Probability와 ROC 커브를 통하여 에너지 검출 방법의 성능을 구현하였다. 이것은 다음과 같이 fading을 겪지 않은 신호와 fading을 겪는 신호 두 가지를 이용하여 실험하였다.

$$r_i=x_i+n_i \quad (8)$$

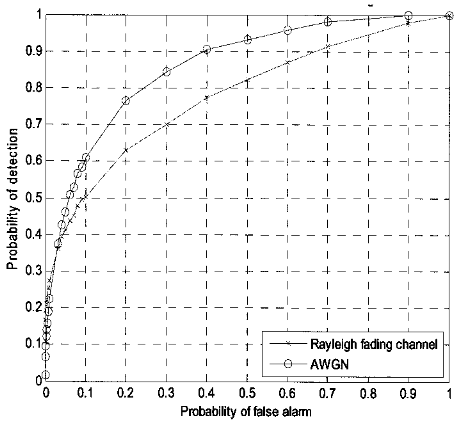
$$r_i=h_i*x_i+n_i \quad (9)$$

<표 1>은 simulation에 사용된 시스템의 parameter이고 <표 2>는 Rayleigh채널의 delay특성을 나타낸다. <그림 2>는 SNR에 따른 Pd(Probability Detection)을 나타낸 그래프로써 SNR -20dB~5dB 구간 동안 Pf=0.1을 갖는 문턱값을 이용하여 모의 실험하였다.

<그림 3>은 ROC 성능 그래프이며, SNR=-10 dB이다. 이 두 그래프에서 확인되는 것과 같이 Fading에 의한 신호의 감쇄로 검출기의 검출 성능이 급격히 감소함을 알 수 있다.



<그림 2> SNR에 따른 에너지 검출기의 성능
<Fig. 2> The detection probability of the energy detection



<그림 3> 에너지 검출기의 ROC 곡선
<Fig. 3> The ROC curve of the energy detection

Ⅲ. 클러스터링 기반의 Weighted 협력 센싱 기법

1. Conventional 협력 센싱 기법

fading 채널 환경에서 PU 신호는 shadowing /deep fading의 영향으로 스펙트럼 센싱의 신뢰도가 급격히 감소 할 수 있다. 이를 개선하기 위하여 다중의 2차 사용자가 협력하여 스펙트럼 센싱의 신뢰도를 높이는 기법이 제안되었다 [4].

N개의 CR 사용자는 동일한 평균 SNR과 I.I.D. (Independently and Identically Distributed)의 특성을 갖는 Rayleigh fading channel을 겪는다는 가정을 하자. CR 사용자는 다른 N-1 사용자로부터 센싱 정보를 전달 받아 그중 하나의 정보라도 PU 신호가 인식된다면 PU 신호를 감지하였다고 판단한다.

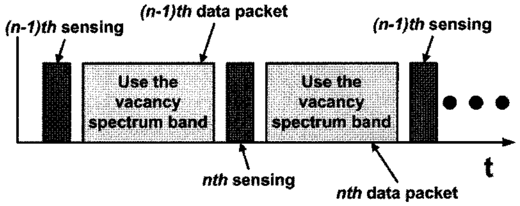
이러한 결정법을 OR-rule이라 정의하고, Detection Probability와 False Alarm Probability를 각각 수식 (10, 11)과 같이 나타낼 수 있다. Pd는 각각의 2차 사용자의 Detection Probability, Pfa는 각각의 2차 사용자의 False Alarm Probability, N은 2차 사용자의 수를 나타내며, 각각 수식 (3) 과 수식 (2)를 통하여 정의된 값이다.

$$Q_d = 1-(1-P_d)^N \tag{10}$$

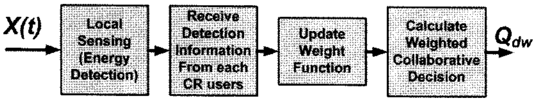
$$Q_{fa} = 1-(1-P_{fa})^N \tag{11}$$

2. 가중치 협력 센싱 기법

<그림 4>은 CR시스템이 비어있는 특정 주파수 밴드를 사용하는 방법을 나타낸다. PU의 주파수 밴드 사용 여부를 확인하기 위해, CR 사용자는 주기적으로 데이터 전송을 중지하고, 스펙트럼 센싱을 수행한다. 그림에서 나타내는 것과 같이, (n-1)번째 센싱을 수행하고 비어있는 것이 확인되면, (n-1)번째 데이터 패킷을 전송하여 주파수 밴드를 사용한 후, 전송을 중지하고 n번째 스펙트럼 센싱을 수행한다. PU 신호가 존재할 때에도 주기적으로 스펙트럼 센싱하여 주파수 사용 여부를 모니터링한다.



<그림 4> CR system에서 비어있는 특정 주파수 밴드 사용 시나리오
<Fig. 4> Scenario of using vacant frequency in the CR system



<그림 5> 가중치 협력 센싱 기법의 블록 다이어그램
<Fig. 5> The block diagram of the weight collaborative spectrum sensing

<그림 5>는 가중치 협력 센싱 기법의 블록 다이어그램이다. 각 CR 사용자는 PU 신호(x(t))를 센싱하고, Pd를 CR 기지국에 전송한다.

PU와 CR 사용자간의 채널환경이 슬로우 페이딩이라 가정하면, 주기적으로 반복되는 스펙트럼 센싱의 결과(1,2,...n-1,n번째 센싱)가 매우 유사할 것이다.

가중치 협력 스펙트럼 센싱 기법은 과거의 센싱 정보를 이용하여(1,2,...n-2,n-1,n) 수식 (12-13)과 같은 방법으로 가중치(Wj(n+1))를 설정한다. CR 기지국은 수식 (15)와 같이 각 사용자의 가중치를 이용하여 Qdw(collaborative detection probability)를 계산한다 [2].

$$W_j(n+1) = W_j(n)P_{d,j}(n) / \overline{W(n)P_d(n)} \qquad (12)$$

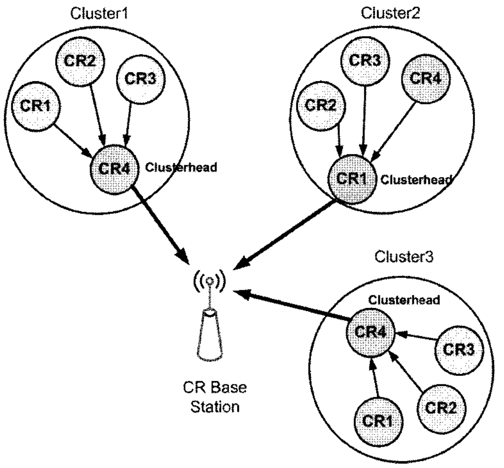
$$\overline{W(n)P_d(n)} = \frac{1}{N_j}\sum_{j=1}^{N_j} W_j(n)P_{d,j} \qquad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{N_j} W_j = N \qquad (14)$$

$$Q_{dw} = 1 - \prod_{j=1}^{N_j} W_j \cdot (1 - P_{d,j}) \qquad (15)$$

3. 클러스터링을 이용한 협력 센싱 기법

강한 동질성을 갖는 노드를 클러스터화 하고, Cluster head를 연결하는 LCA(Linked Cluster Architecture)가 [5]에서 제안되었으며, LCA2 알고리즘을 통하여 발전하였다 [6].



<그림 6> 클러스터링 기반의 CR 시스템의 구조도
<Fig. 6> Cluster-based collaborative spectrum sensing in CR system

LCA 알고리즘은 Highest degree를 갖는 노드를 클러스터 헤드로 지정하고 이와 동질성을 갖는 노드들을 군집화하여 클러스터로 지정한다. 이러한 클러스터링 기법은 기존의 가중치 협력 센싱 기법이 지니고 있는 중요한 문제를 해결할 수 있다.

가중치 협력 센싱 기법은 검출한 Pd를 이용하여 가중치를 부여하게 되는데, 각각의 CR 사용자가 에너지 검출 방법을 이용하여 검출하면 신호의 존재 유무만 판단할 수 있고 실제로 Pd를 구할 수 없다.

따라서 Pd를 실질적으로 구할 수 있는 알고리즘을 필요로하며 클러스터링 기법을 이용하여 이것을 해결할 수 있다.

Spectrum Sensing을 위한 Clustering기법의 구조는 <그림 6>과 같으며 <그림 7>의 윗 블럭은 클러스터링 과정을 나타낸 것이다 .

클러스터링 기법을 적용하기 위해서 클러스터 내의 CR 사용자는 아주 밀접해 있고, CR 사용자의 채널 정보는 유사하다는 가정을 필요로 한다.

클러스터링은 다음과 같은 단계를 통하여 수행된다. 첫 번째, 모든 CR 사용자는 분산된 클러스터링 알고리즘 [6-8]을 통하여 몇 개의 클러스터로 분리된다. 클러스터 내에서 가장 활성화된 CR 사용자를 Cluster Head로 지정하고 클러스터 내의 모든

CR 사용자의 정보를 수집하여 각각의 CR 사용자는 Cluster Head로부터 정보를 제공 받는다.

결론적으로, 협력 센싱을 수행하기 위해 각 CR 사용자는 Energy Detection 방법을 이용하여 지역 스펙트럼 센싱을 수행하고 그 결과를 Cluster Head에 전달한다. 수집된 Sensing 결과 Gi,j(ith CR 사용자, jth Cluster)를 바탕으로 센싱 정보 Pd,j를 도출한다. 검출 유무에 따라 Gi,j 는 1 또는 0 이며 그 합을 클러스터 내의 CR 사용자의 수 ni로 나누어 Pd,j를 계산한다 [9].

$$P_{d,j} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} G_{i,j}}{n_i} \tag{17}$$

4. 개선된 협력 스펙트럼 센싱 기법

앞서 제시되었던 가중치 기법은 센싱 횟수가 증가 할수록 가중치의 신뢰도가 급격히 낮아진다. 임의의 가중치가 0으로 수렴하는 경우가 빈번하여 그에 따라 detection 성능이 저하되는 문제점을 갖고 있다. 특히, PU신호가 존재하다 사라진 경우, false alarm할 가능성이 높은 문제점이 발생하였다. Weight를 계산하는 방법을 변환하여 이러한 문제점을 개선할 수 있다.

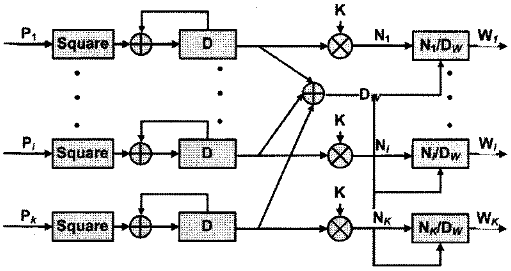
j번째 클러스터의 로컬 검출 확률의 제곱 합은 수식 (18)과 같다.

$$f_j(n) = \sum_{k=1}^{n} P_{d,j}(k)^2 \tag{18}$$

이는 각 클러스터가 n번 센싱한 결과를 제곱하여 더한 것으로써 f1(n), f2(n),...fj(n)을 모두 더하면 수식 (19)과 같다.

$$D(n) = \sum_{j=1}^{N_j} \left(\sum_{k=1}^{n} P_{d,j}(k)^2 \right) \tag{19}$$

fj(n)을 수식(19)로 나누면 전체 로컬 검출 확률의 제곱 합 중 각각 클러스터의 제곱 합이 차지하는 비율이 나타난다. 이를 클러스터 수 Nj로 정규화하면 수식 (20)과 같이 표현할 수 있다.



<그림 7> 새로운 가중치 생성기
<Fig. 7> New weight generator

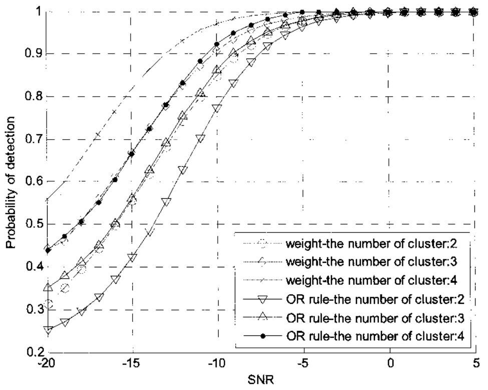
$$W_j(n+1) = \frac{\sum_{k=1}^{n} P_{d,j}(k)^2}{N_j \cdot D(n)} \tag{20}$$

클러스터간의 상대적인 로컬 검출 확률에 따라 Wj(n+1) 값은 0~Nj 값을 갖는다. 앞장에서 나타냈던 것과 같이 Wj(n+1)를 가중치로 사용하여 수식 (15)에 적용 할 수 있으며, <그림 7>은 이를 도식화 한 것이다.

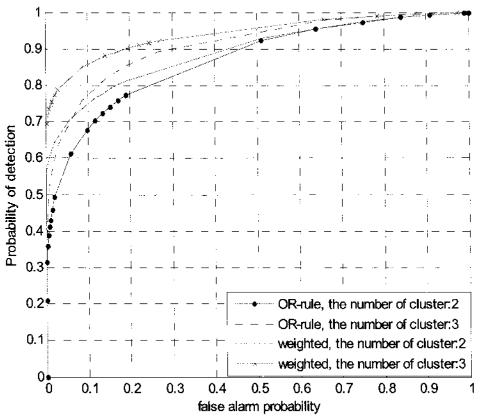
Ⅳ. 모의 실험

본 알고리즘을 검증하기 위하여, 표 1, 2와 같은 환경에서 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용된 수위 사용자 시스템과 채널은 <표 1, 2>과 같으며, 각 클러스터 내에 1000개의 CR 사용자가 있다고 가정하였다.

<그림 8>은 클러스터 수에 따른 Pd를 SNR에 따라 나타낸 그래프이며, 로컬 사용자의 Pf가 0.1을 만족하는 문턱 값을 사용하였다. 클러스터의 수가 2,3,4일 경우, 각각의 클러스터가 spectrum sensing을 두 번 수행하여, 첫 번째 sensing에서 업데이트 된 weight를 이용하여 결과를 도출하였다. OR-rule을 적용한 기법에 비해 동일한 SNR에서 20%이상, 2~3dB 낮은 SNR에서 동일한 Pd 성능을 확인 할 수 있다. <그림 9>은 클러스터 수가 2,3일 경우 ROC



<그림 8> OR-rule과 새로운 가중치 협력 방식의 Pd 그래프
<Fig. 8> Detection probability of OR-rule and new weighted collaborative spectrum sensing



<그림 9> OR-rule과 새로운 가중치 협력 방식의 ROC 곡선
<Fig. 9> ROC curve of OR-rule and new weighted collaborative spectrum sensing

그래프이며, SNR=-10dB라 가정하였다. 제안한 알고리즘은 OR-rule 기법에 비해 좋은 성능을 보여주고 있으며, 특히 낮은 Pf에서의 성능이 크게 향상되어 있음을 알 수 있다.

<그림 10>은 클러스터가 3개일 경우, OR-rule, 기존의 weighted method와 제안한 weighted method의 성능을 나타낸 그래프이다. <그림 7>의 경우와 마찬가지로 두 번의 spectrum sensing을 수행하였다.

<표 1> 채널 파라메터(M.1225 Ped A)
<Table 1> Channel parameters (M.1225 Ped A)

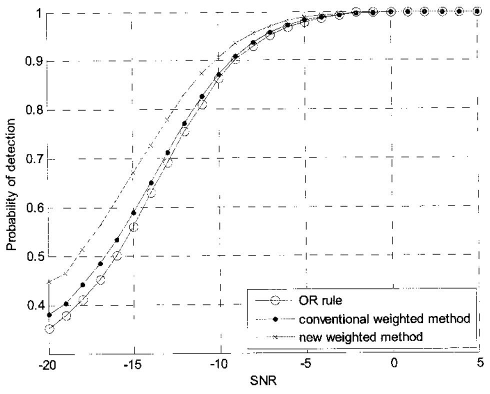
Tap	Relative Delay(ns)	Average Power(dB)
1	0	0.0
2	110	-9.7
3	190	-19.2
4	410	-22.8

<표 2> 시뮬레이션 파라메터
<Table 2> Simulation parameters

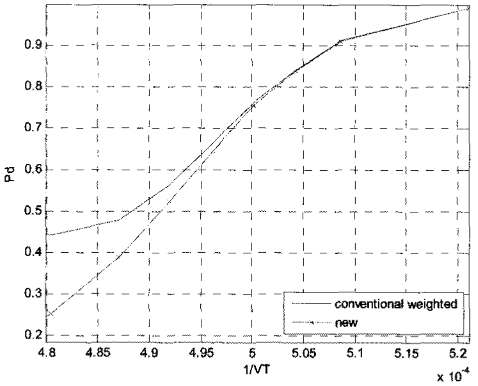
Parameter	Value
Modulation Type	QPSK
Degree of freedom	5
Bandwidth	1MHz
Maximum Doppler frequency	5.56 Hz
FFT size	1024

제안한 weighted 기법이 앞서 제안한 기법보다 우수한 성능을 나타내고 있다.

<그림 11>는 수위 사용자가 주파수를 사용하다가 사용을 정지하였을 때, CR 시스템의 Pf를 나타낸다. spectrum sensing은 6회 수행하였으며, 처음 5회 동안은 신호가 존재하다가 마지막 6회 sensing 하였을 때에는 신호가 존재 하지 않는 경우를 가정하여 시뮬레이션 하였으며, x축은 각 클러스터가



<그림 10> 협력 센싱 기법에 따른 Pd 그래프
<Fig. 10> Detection probability comparison for different collaborative spectrum sensing method



<그림 11> 협력 센싱 기법에 따른 Pfa 그래프
<Fig. 11> False alarm probability comparison for different collaborative spectrum sensing method

사용한 문턱 값의 역수이다. local energy detection의 경우, Pf는 문턱 값이 낮아질수록 증가한다. 기존에 제안된 weighted-collaborative sensing기법은 Pf가 크게 증가할 수 있는 단점이 있으나, <그림 10>에서 나타내는 바와 같이 제안된 방법은 Pfa가 30~50% 개선되는 효과를 얻을 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 CR 시스템에서 PU 신호를 감지하는 스펙트럼 센싱 기법에 관한 것이다. Shadow/deep fading의 영향으로 센싱의 신뢰도가 크게 감소하므로, 이를 극복하기 위해 다중의 CR 사용자가 협력 스펙트럼 센싱하여 신뢰도를 향상시키는 기법들이 등장하였다. 기존에 제안된 가중치 협력 스펙트럼 센싱 기법은 Pd(detection probability)를 계산할 실질적인 방법을 필요로 하였으며, 클러스터링 기법을 이용하여, 유사한 환경을 갖는 CR 사용자간에 공유된 센싱 정보를 바탕으로 Pd를 도출할 수 있었다. 또한 새로운 가중치 부여 기법을 제안하였다. 이 기법은 슬로우 페이딩 환경에서 기존의 협력 센싱보다 Pd(Probability Detection)가 증가하고, Pfa (False Alarm Probability)가 감소하는 결과를 보였으며, 패스트 페이딩 환경에서 가중치를 부여할 수 있는 방안이 요구된다.

참고문헌

[1] J. Mitola, *Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio,* Ph. D. Dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden

[2] X. Huang, N. Han, G. Zheng, S. H. Shon, and J. Kim, "An efficient weighted-collaborative sensing scheme in cognitive radio," *KICS Jounnal,* vol. 25, no. 10, pp. 984-991, Oct. 2007.

[3] H. Urkowits, "Energy detection of unknown deterministic signals," *Proc. IEEE,* vol. 55, no. 4, pp. 523~531, April 1967.

[4] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," *Proc. 1st IEEE Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks,* pp. 131-136, Nov. 2005.

[5] D. J. Baker and A. Ephremides, "The architectural organization of a mobile radio network via a distributed algorithm," *IEEE Trans. Communications,* vol. 29, no. 11, pp. 1694-1701, Nov. 1981.

[6] A. Ephremides, J. E. Wieselthier, and D. J. Baker, "A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling," *Proc. IEEE,* vol. 75, no. 1, pp. 56-73, Jan. 1987.

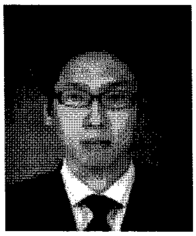
[7] A. K. Parekh, "*Selecting routers in ad-hoc wireless networks,*" *Proc. International Telecommunications Symposium,* ITS, pp. 420-424, Aug. 1994.

[8] S. Bandyopadhyay and E. Coyle, "An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks," *Proc. IEEE INFOCOM,* pp. 1712-1723, April 2003.

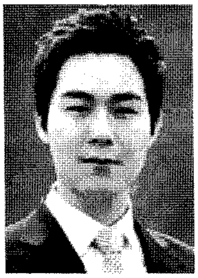
[9] J. K. Lee, Y. Kim, S. Sohm, and J. Kim, "Weighted-cooperative spectrum sensing scheme using clustering in cognitive radio systems," *Proc. Int. Conf. Advanced Communication Technology,* vol. 1, pp. 786-791, Feb. 2008.

저자소개

최 규 진 (Choi, Gyu-Jin)
2006년 2월 : 인하대학교 전자공학부(공학사)
2006년 3월~현재 : 인하대학교 정보통신대학원 (공학석사)



손 성 환 (Shon, Sung-Hwan)
2004년 2월 : 인하대학교 전자공학부(공학사)
2006년 2월 : 인하대학교 정보통신대학원(공학사)
2006년 3월~현재 : 인하대학교 정보통신대학원 (공학박사)



이 주 관 (Lee, Joo-Kwan)
2007년 8월 : 인하대학교 컴퓨터공학부(공학사)
2007년 9월~현재 : 인하대학교 정보통신대학원 (공학석사)

김 재 명 (Kim, Jae-Moung)
1974년 : 한양대학교 전자공학부(공학사)
1981년 : 미국 남가주대학교(USC) 전기공학과(공학석사)
1987년 : 연세대학교 전기공학과(공학박사)
1974년 3월~1979년 6월 : 한국과학기술연구소, 한국통신기술연구소 근무
1982년 9월~2003년 3월 : 한국전자통신연구원, 위성통신연구단장, 무선방송연구소 소장 역임
2003년 4월~현재 : 인하대학교 정보통신대학원 교수