

지능형 교통시스템을 위한 인지무선 시스템의 효과적 분산형 센싱

Efficient distributed spectrum sensing for cognitive radio systems for ITS system

이 소 영

(광운대학교, 석사과정)

김 은 철

(삼성 탈레스, 전문연구원)

김 진 영

(광운대학교, 부교수)

Key Words : Cognitive radio, distributed spectrum sensing, energy detection, equal gain combining (EGC), maximum ratio combining (MRC)

목 차

I. 서론

II. 협력 스펙트럼 센싱

III. 성능 분석

IV. 실험 결과

V. 결론

I. 서론

본격적인 IT시대로 진입함에 따라 IT기기에 대한 활용도가 급격히 높아졌으며, 최근 KT 경제경영연구소가 발표한 “2010 방송통신시장 전망보고서”에 따르면 내년 이동전화 가입자가 올해 보다 약 2.8% 증가해 인구대비 보급률이 101%에 달할 것으로 전망하였다 [1]. 이와 같은 정보통신 기술의 발전 및 무선기기의 사용이 확장됨에 따라 주파수 자원의 수요는 점점 증가하게 된다. 그러나 연방 통신 위원회 (FCC: Federal Communications Commission)의 조사에 따르면 시간적, 지역적으로 할당된 주파수의 사용률이 15%~85%로서 유향한 주파수 자원이 비효율적으로 운용되고 있음을 보여주었다 [2-4]. 따라서 주파수의 사용의 효율성을 높이기 위해 J. Mitola [5]는 이미 할당된 주파수 중에서 실제 사용되지 않는 유향주파수를 감지하여 이를 효율적으로 공유하여 사용할 수 있도록 하는 인지무선 (CR: Cognitive Radio) 기술을 제안하였다.

인지무선기술은 주변 환경을 인지하여 유향 주파수 자원을 능동적으로 탐색하여 비면허 사용자에게 서비스를 제공하고 기존의 무선 서비스 사용자에게 간섭신호를 미치지 않으며 사용하는 기술이다. FCC는 2003년 12월 Notice of Proposed Rule Making (NPRM)을 통하여 유향 주파수에 대한 중복 사용가능성에 대한 내용을 발표하였다 [6].

인지무선기술에서는 비면허사용자인 CR기기는 면허사용자에게 간섭을 일으키지 않고 유향주파수 대역을 사용하기위해 정확한 스펙트럼 센싱기술이 기술이 필요하다. 그러나 스펙트럼 센싱은 음영지역 및 잠복터미널 등에 의하여 성능의 열화가 발생하게 되는데 이 같은 문제를 해결하고 스펙트럼 센싱

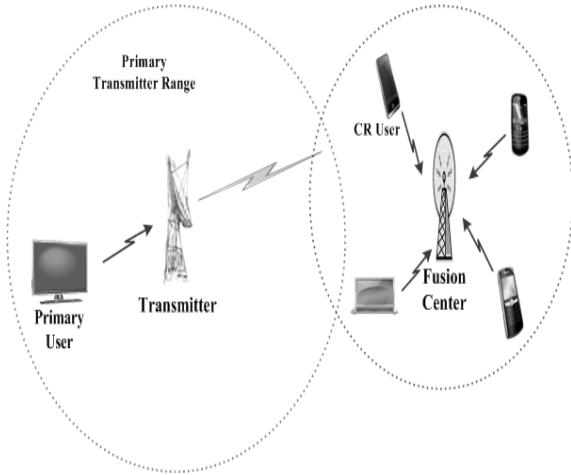
의 신뢰성 및 정확도를 높이기 위해 다수의 CR기기들이 센싱 정보를 공유하는 협력 스펙트럼 센싱 기술이 제안되었다 [7-9].

협력 스펙트럼 센싱은 각 CR 기기들의 센싱 결과를 융합하는 방법에 따라 경판정 방식 (Hard Decision Method)과 연판정 방식 (Soft Decision Method)으로 구별 할 수 있다. 경판정 방식은 각 CR기기들이 일차적으로 면허사용자의 스펙트럼 사용을 판단하여 그 결과를 융합센터에 전송하면 융합센터에서 이를 취합하여 최종판정방식에 따라 면허 사용자의 존재를 최종 판단하게 된다. 연판정 방식은 각 CR기기가 개별판정을 내리지 않고 CR기기가 수신한 신호를 그대로 융합센터에 전송하여 융합방식에 따라 결합한 후 최종판정을 내리는 방식이다.

본 논문에서는 경판정 방식에 비해 성능이 높은 연판정 방식을 적용하여 분산형 센싱의 성능을 분석 하였다. 또한 경판정 방식과의 성능을 비교하여 두 가지 방식에 대한 스펙트럼 센싱 성능을 모의실험을 통하여 나타내었다. 본 논문에서 면허 사용자와 CR 기기 사이의 무선 채널은 가우시안 (Gaussian) 채널로 모델링 하였으며, CR 기기와 융합 센터 (Fusion Center) 사이의 제어 (Control) 채널은 완벽한 (Perfect) 채널로 가정하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 협력 스펙트럼 센싱의 시스템 모델 및 각 융합방식에 대하여 설명하고, 제 III장에서는 연판정 방식을 적용한 분산형 협력 스펙트럼 센싱의 성능을 수학적으로 분석하였다. 제 IV장은 모의실험을 통하여 협력 스펙트럼 센싱의 성능을 비교하였고, 마지막으로 본 논문의 결론을 제 V장에서 언급하였다.

II. 협력 스펙트럼 센싱



<그림 1> 분산형 스펙트럼 센싱 시스템 모델

협력 스펙트럼 센싱은 페이딩 및 선택도잉 등에 의한 스펙트럼 센싱의 열화를 완화시키기 위해 제안된 방법으로 각각의 면허 사용자의 센싱결과를 공유하여 스펙트럼 센싱의 성능을 향상 시킨다.

인지 무선시스템은 주파수의 상태를 면허사용자가 존재할 때와 부재중일 때의 두 가지로 가정하는데 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$H_0: y[k] = v[k] \quad (1)$$

$$H_1: y[k] = hs[k] + v[k] \quad (2)$$

식 (2)에서 h 는 무선 채널의 감쇄 상수를 나타내고, $s[k]$ 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 근접해있는 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 융합센터로 이루어져 있다.

분산형 스펙트럼 센싱은 각 CR기기의 수신 신호의 에너지 값을 통해 면허 사용자의 존재를 판단한다. 이때 정확하게 면허 사용자를 검출해 내는 검출 확률은 $Prob\{Decision = H_1|H_1\}$ 와 $Prob\{Decision = H_0|H_0\}$ 로 나타내고, 에러검출 확률은 센싱 주파수 대역에 면허 사용자가 있음에도 불구하고 없다고 판단하는 $Prob\{Decision = H_0|H_1\}$ 또는 면허 사용자가 주파수를 사용하지 않는데 사용 중이라고 판단하는 $Prob\{Decision = H_1|H_0\}$ 로 나타낸다.

CR 기기에 수신된 신호는 각각 독립된 채널로 수신되며,

m ($m = 1, 2, \dots, M$) 번째 CR 기기에 수신 신호의 에너지 Y_m 는 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 CR기기의 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 사용자의 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[10]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 검출방식을 채택하였다 [11]. CR 기기에서는 수신신호의 에너지를 임계값 T 와 비교하여 임계값 이상이면 면허사용자가 존재한다고 판단하고, 수신신호의 에너지가 임계값 미만일 경우 면허 사용자가 없다고 판단한다.

III. 성능 분석

1. 경판정 방식 (Hard Decision Method)

각 CR 기기에서 수신된 에너지 값을 통해 개별 판정을 내린 뒤, 개별 판정결과를 융합센터로 전송하여 최종판정을 내리는 방식이다. 융합센터는 AND, OR 및 Majority 방식 등의 최종판정 방식을 통하여 면허 사용자의 유, 무를 판단한다.

이와 같은 판정방식은 협력센싱에서 CR기기의 사용자수를 반영하여 결정한다. AND방식은 모든 CR기기의 개별 판정결과가 면허사용자가 있다고 판정한 경우에만 최종 판정이 면허 사용자가 존재한다고 판정하고, OR방식의 경우 CR기기의 개별 판정결과 중 하나라도 면허 사용자가 있다고 판단하면 최종판단이 면허 사용자가 있다고 판정된다. AND나 OR방식이 최종판정을 결정하는데 있어 극단적인 방식을 채택하는데 반해 Majority방식은 개별 판정결과와 다수의 의견을 반영하여 비교적 합리적이며 신뢰성 있는 판정방식으로 볼 수 있다. 경판정 방식에서 개별 판정은 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_i[k] = H(Y_m - T_i) \quad (7)$$

위 식에서 $D_i[k]$ 와 T_i 는 각각 CR기기의 개별 판정 결과 및 False alarm rate에 따른 임계값을 나타낸다.

$H(\cdot)$ 함수는 Heaviside step function 으로, Y_m 이 임계값보다 크거나 같으면 $D_i[k] = 1$ 이고, Y_m 가 임계값보다 작으면 $D_i[k] = 0$ 이다.

이렇게 계산된 개별 검출 결과는 융합 센터로 전송되어 결합되고 결합된 결과는 경판정 방식을 적용한 임계값 (T_H)과 비교되어 최종적으로 면허 사용자의 유, 무를 판정하게 된다. 융합센터에서 개별 판정결과를 융합한 값은 다음 식 (8)과 같다.

$$Y_H = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M D_i[k] \quad (8)$$

식 (6)에 따라 Y_H 의 가우시안 분포를 정리하면 식 (9)와 같다 [12].

$$Y_H \sim \begin{cases} N(L, \frac{2L}{M}) & : H_0 \\ N(L \sum_{m=1}^M \frac{1}{M} (1 + \gamma_m), 2L \sum_{m=1}^M \frac{1}{M^2} (1 + 2\gamma_m)) & : H_1 \end{cases} \quad (9)$$

각 CR기기의 개별 판정결과를 융합한 결과는 임계값 T_H 와 비교하여 검출 확률은 $P_D = P_r(Y_H > T_H | H_1)$ 로 나타내고 오검출 확률은 $P_F = P_r(Y_H > T_H | H_0)$ 로 각각 나타낼 수 있으며 식 (9)를 적용하면 P_D 와 P_F 는 각각 식 (10)와 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_D = Q \left(\frac{T_H - L \sum_{m=1}^M \frac{1}{M} (1 + \gamma_m)}{\sqrt{2L \sum_{m=1}^M \frac{1}{M^2} (1 + 2\gamma_m)}} \right) \quad (10)$$

<표 1> 각 최종 판정방식에 따른 임계값

Decision Rule	Threshold (T_H)
AND	$T_H = 1/M$
OR	$T_H = 1$
Majority	$T_H = M/2$

$$P_F = Q \left(\frac{T_H - L}{\sqrt{\frac{2L}{M}}} \right) \quad (11)$$

식 (10) 및 (11)에서 T_H 는 경판정 방식에서의 최종 판정방식에 따른 임계값으로서 다음 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

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)을 사용한다. 연판정 방식은 경판정 방식에서 각 CR기기에서 먼저 개별 판정을 내리고 융합센터로 전송한 것과 달리 수신된 에너지 값을 바로 융합센터로 전송한 후에 융합센터에서 각 연판정 방식에 따라서 최종 판정한다는 점이 다르다. 각 CR 기기에 수신된 신호의 에너지를 가중치를 적용하여 융합한다. 각 m 번째 CR기기에 적용된 가중치 성분을 w_m 이라고 할 때 가중치를 적용하여 각 CR 기기의 에너지 값을 융합한 값은 식 (12)와 같다.

$$Y_S = \sum_{m=1}^M w_m Y_m \quad (12)$$

Y_m 과 w_m 은 m 번째 CR기기의 독립적 성분으로서 식(12)에 따라 Y_S 의 가우시안 분포를 정리하면 식(13)과 같다.

$$Y_S \sim \begin{cases} N(L \sum_{m=1}^M w_m, 2L \sum_{m=1}^M w_m^2) & : H_0 \\ N(L \sum_{m=1}^M w_m (1 + \gamma_m), 2L \sum_{m=1}^M w_m^2 (1 + 2\gamma_m)) & : H_1 \end{cases} \quad (13)$$

각 CR기기의 수신에너지를 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 (13)을 적용하면 P_D 와 P_F 는 각각 식 (14) 및 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_D = Q \left(\frac{T_S - L \sum_{m=1}^M w_m (1 + \gamma_m)}{\sqrt{2L \sum_{m=1}^M w_m^2 (1 + 2\gamma_m)}} \right) \quad (14)$$

$$P_F = Q \left(\frac{T_S - L \sum_{m=1}^M w_m}{\sqrt{2L \sum_{m=1}^M w_m^2}} \right) \quad (15)$$

위 식에서 $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 이다. 식 (14)와 (15)에서 P_D 는 아래의 식 (16)과 같이 정의 할 수 있다.

$$P_D = Q \left(\frac{Q^{-1}(P_F) - \sqrt{\frac{L}{2}} \sum_{m=1}^M \alpha_m \gamma_m}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \alpha_m^2 (1 + 2\gamma_m)}} \right) \quad (16)$$

식 (16)의 $Q^{-1}(x)$ 는 $Q(x)$ 의 역함수이고, α_m 은 정규화된 가중치 성분으로서 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_m = \frac{w_m}{\sqrt{\sum_{m=1}^M w_m^2}} \quad (17)$$

이 때 γ_m 성분은 오검출 확률 P_F 에 따르며, 식 (16)의 검출 확률이 최대화되었을 때 최적화된 가중치 성분을 가지게 되고 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{m=1}^M \alpha_m^2 = 1, 0 < \alpha_m < 1. \quad (18)$$

반면 CR 시스템에서 각 CR 기기에 수신된 면허 사용자의 에너지는 일반적으로 매우 낮다 [9]. 즉, m 번째 CR기기의 순시 SNR이 $\gamma_m \ll 1$ 으로 나타난다. 그러므로 식 (17)에서 $\sqrt{\sum_{m=1}^M \alpha_m^2 (1 + 2\gamma_m)} \approx 1$ 로 나타난다. 따라서 식 (17)은 식 (19)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$P_D \approx Q \left(Q^{-1}(P_F) - \sqrt{\frac{L}{2}} \sum_{m=1}^M \alpha_m \gamma_m \right) \quad (19)$$

식 (18)을 식 (17)에 적용하여 최적화된 가중치 성분을 나타내면 식 (20)과 같다.

$$\alpha_m^* = \frac{\gamma_m}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \gamma_m^2}}, \quad 1 \leq m \leq M \quad (20)$$

식 (20)는 최대비 결합의 가중치와 같은 값으로서 $\sum_{m=1}^M w_m^2 = 1$ 로 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_{MRC_m} = \alpha_m^*, \quad 1 \leq m \leq M \quad (21)$$

동일이득 결합법에서의 가중치는 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다.

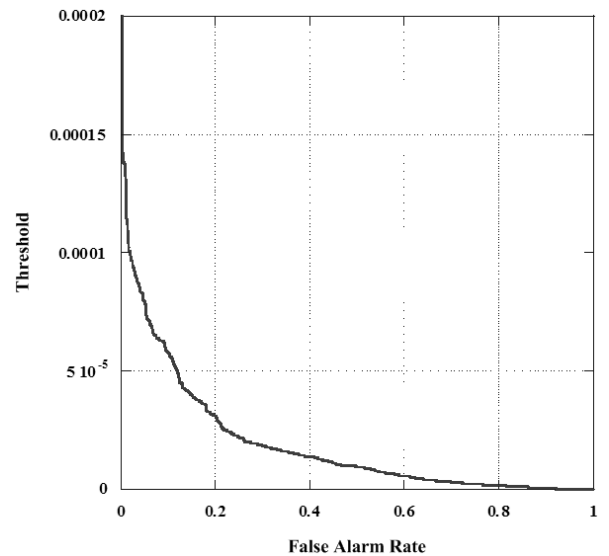
$$w_{EGC_m} = \frac{1}{\sqrt{L}}, 1 \leq m \leq M \quad (22)$$

IV. 실험 결과

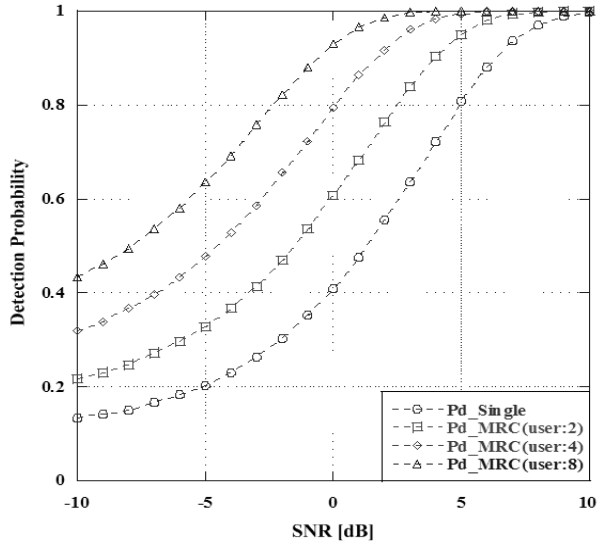
이번 장에서는 모의실험을 통하여 연판정 방식을 적용한 분산형 센싱의 성능을 나타내고, 경판정 방식을 적용했을 때의 성능과 비교하였다. 모의실험을 위한 시스템 모델은 II장에서 설명한바와 같이 단일 면허 사용자와 M 개의 CR기기 그리고 융합센터로 이루어져있다.

그림 2는 각 CR기기의 가중치를 적용하여 에너지 값을 융합한 값과 비교되는 임계값을 나타낸 값으로 본 논문에서는 False alarm rate에 따라 임계값을 정하였다.

그림 3은 최대비 결합을 적용하였을 때의 CR기기의 수에 따라 검출확률을 나타내었다. 최대비 결합을 판정방식으로 적용하였을 때 검출확률로서 CR기기의 수가 늘어날수록 검출 확률의 성능도 높아지는 것을 알 수 있다. 또한 단일 센싱에 비해 분산형 센싱의 성능이 검출확률이 80%일 때를 기준으로 최대 약 7.5dB의 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

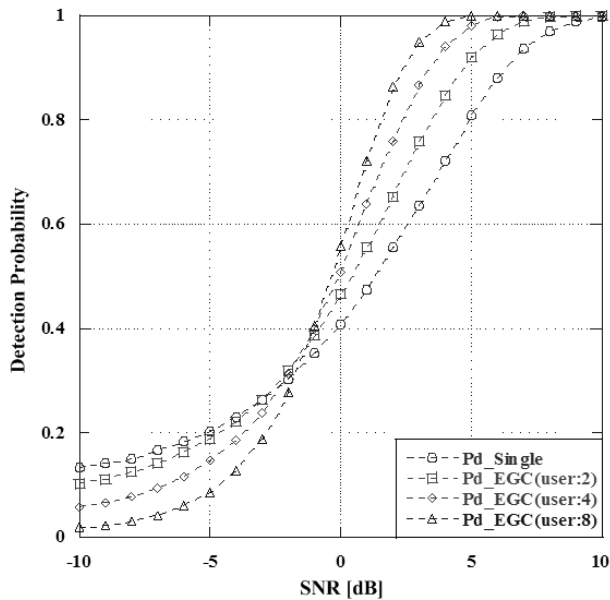


<그림 2> 오검출 확률에 따른 임계값

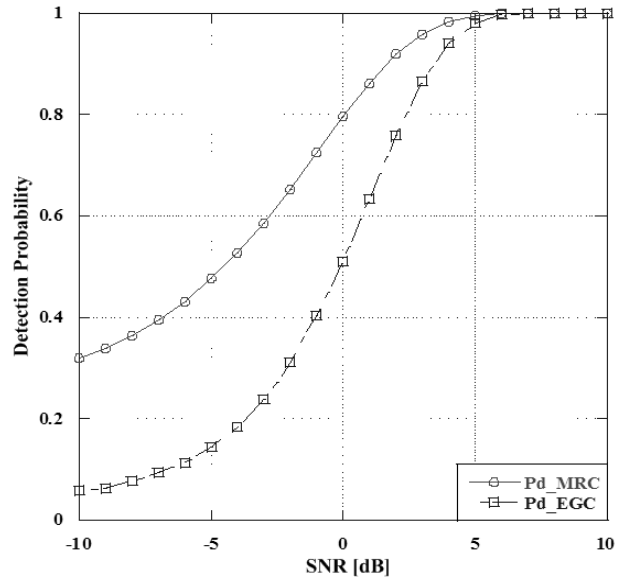


<그림 3> 최대비 결합을 적용하였을 때의 CR기기의 수에 따라 검출확률

그림 4는 동일이득 결합을 적용하였을 때의 CR기기의 수에 따라 검출확률을 나타내었다. 동일이득 결합을 판정방식으로 적용하였을 때 검출확률로서 SNR이 약 -2dB 부터 CR기기의 수가 늘어날수록 검출확률의 성능도 높아지는 것을 알 수 있다. 또한 단일 센싱에 비해 분산형 센싱의 성능이 검출확률이 80%일 때를 기준으로 최대 약 4dB의 성능이 향상되었음을 알 수 있다. SNR이 낮을 때 CR 기기의 수가 많을수록 검출확률이 낮은 현상은 단일센싱에 비하여 보다 정확한 센싱을 수행하면서 나타나는 현상으로 경관정 방식의 판정방식중에서 Majority 판정방식을 적용하여 스펙트럼 센싱을 수행할때도 이와 같은 현상이 나타난다.



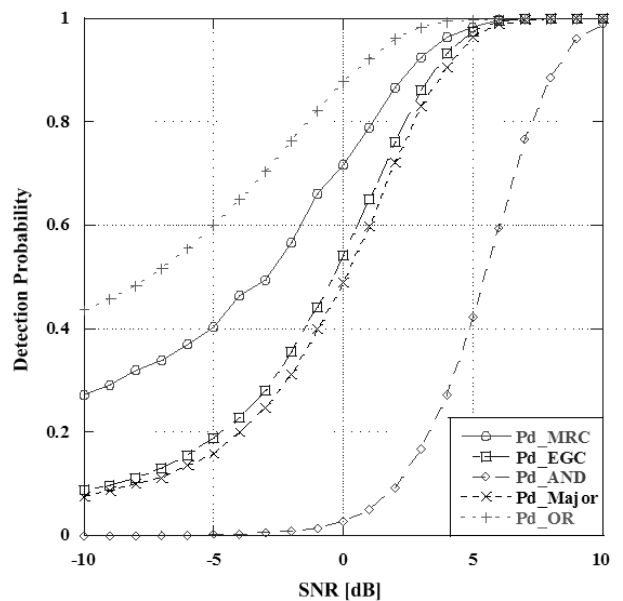
<그림 4> 동일이득 결합을 적용하였을 때의 CR기기의 수에 따라 검출확률



<그림 5> 최대비결합과 동일이득 결합의 검출확률 비교

그림 5는 최대비 결합과 동일이득 결합을 적용한 분산형 스펙트럼 센싱의 검출확률 성능비교를 나타낸 것으로 최대비 결합을 적용하였을 때의 검출확률이 30%일 때 최대 약 8dB 정도의 성능이 개선됨을 알 수 있다.

그림 6에서는 연판정 방식과 경판정 방식의 검출확률을 비교하여 나타내었다. 최대비 결합과 동일이득 결합은 경판정방식의 Majority방식과 AND방식에 비하여 검출확률이 높게 나타난다. OR방식의 검출확률이 제일 높게 나타나지만 이 결과는 여러 개의 CR기기 중에서 하나의 CR기기라도 면허사용자가 있다고 판단하면 최종판정을 면허사용자가 존재한다고 판정하는 폭넓은 판정을 내리기 때문이다. 이러한 OR방식의 예리검출확률이 높게 나타나기 때문에 스펙트럼 센싱의 성능향상이라고 보기는 어렵다.



<그림 6> 연판정방식과 경판정방식의 검출확률 비교

V. 결론

본 논문에서는 연관정 방식을 적용한 분산형 스펙트럼 센싱의 성능을 알아보기 위해 단일 센싱인 경우와 각 연관정 방식의 CR기기의 수를 변화시켜 검출확률을 비교하여 실험하였다. 실험결과 최대비 결합 및 동일이득 결합을 적용한 분산형 스펙트럼 센싱은 단일 센싱에 비하여 높은 스펙트럼 센싱 성능을 나타내었다. 또한 CR기기의 수가 많아질수록 검출확률이 더욱 높아짐을 알 수 있었다.

또한 연관정방식을 적용한 분산형 스펙트럼 센싱과 경관정 방식을 적용한 분산형 스펙트럼 센싱과의 성능을 비교, 분석하여 나타난 모의실험의 결과 연관정 방식이 경관정 방식에 비하여 검출확률이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 연관정 방식이 경관정 방식에 비하여 시스템의 복잡도가 높아지고 검출시간은 길어지지만 경관정 방식에 비하여 스펙트럼 센싱의 성능이 우수하여 면허 사용자의 정확한 검출이 가능하게 되므로 스펙트럼 센싱의 초점을 면허사용자의 정확한 검출인지 또는 복잡도가 낮고 비교적 짧은 시간에 검출할 수 있는 센싱인지를 결정하여 어떤 판정방식을 채택하여 본 논문의 실험결과를 참고하여 분산형 스펙트럼 센싱에 적용할지 결정할 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

1. KT 경제경영연구소, "2010 방송통신시장 전망보고서", Dec. 2009.
2. FCC, "Spectrum policy task force," *Rep. ET Docket no. 02-135*, Nov. 2002.
3. 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.
4. J. Y. Kim. *Cognitive Radio Communications*, Gyobo Publishers, Seoul, Korea, 2008.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. G. Ganesan, Y. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," in *Proc. of IEEE DySPAN 2005*, pp. 137-143, Nov. 2005.
9. 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.
10. 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.
11. H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," *Proc. of IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-531, Apr. 1967.
12. J. Ma and Y. Li, "Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 11, pp. 4502-4507, Nov. 2008.