

인지 무선 네트워크에서 보고 오류를 고려한 OR 규칙 기반의 협력 스펙트럼 센싱 기법

최로미*, 변윤식^o

Or-Rule Based Cooperative Spectrum Sensing Scheme Considering Reporting Error in Cognitive Radio Networks

Romi Choe*, Youn-Shik Byun^o

요 약

최근 주파수 자원의 중요성이 부각됨에 따라 이미 할당된 주파수 대역을 재사용하여 주파수 이용 효율을 향상시키는 인지 무선 기술(Cognitive Radio, CR)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. CR은 주파수 대역의 사용 현황에 따라 기회적으로 사용자가 주파수 대역을 이용하므로 이를 위한 정보를 얻는 센싱 단계가 성능에 중요한 영향을 미친다. 따라서 센싱 성능을 향상시키는 것은 CR에서의 중요 이슈가 되며 이를 위해 다수의 단말이 협력하여 1차 사용자의 스펙트럼 점유 여부를 검출하는 협력 스펙트럼 센싱이 고려되고 있다. 본 논문에서는 협력 스펙트럼 센싱 환경에서 각 사용자의 센싱 정보가 융합 센터(Fusion Center, FC)로 보고되는 채널의 오류 확률을 고려하는 OR 규칙 기반의 협력 스펙트럼 센싱 기법을 제안한다. 제안 기법은 보고 오류 확률을 통해 협력 센싱에 참여하는 사용자 수를 제한함으로써 기존 기법에서 나타나는 오경보 확률의 제한을 완화시킨다.

Key Words : Cognitive radio, Cooperative Spectrum sensing, Reporting error, OR rule

ABSTRACT

As frequency resource has taken on greater importance, Cognitive Radio(CR) technology has been considered as the solution to improve spectrum utilization by allowing a secondary user to utilize a licensed band when the primary user is absent. So spectrum sensing is significant part of CR for high performance. Recently, cooperative spectrum sensing that secondary users share each sensing results is proposed to improve spectrum sensing accuracy. In this paper, OR rule based cooperative spectrum sensing scheme using reporting error probability which occurs in user to fusion center(FC) channel The simulation results show that proposed scheme mitigates false alarm probability limitation which appears in existing cooperative spectrum sensing scheme by restricting the number of cooperating users using reporting error probability.

I. 서 론

최근 데이터 트래픽의 급증과 고속, 대용량 멀티미

디어 서비스의 증가에 따라 주파수 자원의 수요가 급증하고 있다. 하지만 현재의 주파수 분배 상황은 거의 모든 대역이 고정 할당되어 있어 한정된 주파수 자원

※ 이 논문은 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

• First Author : 인천대학교 전자공학과 통신신호처리 연구실, romichoe@incheon.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : 인천대학교 전자공학과 통신신호처리 연구실, byun@incheon.ac.kr, 종신회원

논문번호: KICS2013-08-364, 접수일자: 2013년 8월 28일, 심사일자: 2013년 10월 31일, 최종논문접수일자: 2013년 12월 24일

을 효율적으로 사용하는 방안이 주목받고 있다. 이를 위해 1999년 J. Mitola에 의해 인지 무선(Cognitive Radio, CR) 기술이 제안되었다^[1]. CR은 이미 할당된 주파수 대역의 이용 현황을 인지하여 기존 사용자 외에 주파수 대역을 할당받지 않은 사용자의 접속을 추가로 허용함으로써 주파수의 이용 효율을 향상시키는 기술이다. 이때 고정적인 주파수 대역을 할당받은 기존의 사용자를 1차 사용자(Primary User, PU), PU의 주파수 이용 현황에 따라 기회적으로 대역에 접속하는 사용자를 2차 사용자(Secondary User, SU)라 한다.

CR 시스템에서 SU는 PU의 주파수 대역 사용의 우선권과 성능을 보장해주기 위해 PU의 신호가 주파수 대역에 존재하는지를 정확하게 파악해야 하며 이러한 과정을 스펙트럼 센싱이라 한다. 만일 PU가 주파수 대역을 이용 중일 때 SU에서 이를 검출하지 못할 경우 PU는 SU의 신호로 인해 간섭을 받게 되며 PU가 활성상태가 아니지만 SU에서 PU의 신호가 존재한다고 잘못 판단할 경우 SU가 주파수 대역을 이용할 수 있음에도 이용하지 못하게 되어 이용 효율이 저하된다. 따라서 스펙트럼 센싱은 CR 시스템의 성능에 중요한 영향을 미친다.

전통적인 스펙트럼 센싱 방법은 단일 SU가 독립적으로 PU의 신호를 검출하고 이 정보를 이용해 자신의 상태를 결정한다. 하지만 이러한 단일 스펙트럼 센싱은 섀도잉이나 페이딩 또는 건물과 같은 장애물의 영향을 받으며 이 경우 SU에서 PU의 신호를 제대로 검출하지 못할 수 있어 성능 저하의 원인이 된다. 이러한 단일 스펙트럼 센싱의 단점을 보완하고자 다수의 사용자가 센싱 결과를 공유하는 협력 스펙트럼 센싱 기법이 연구되고 있다. 협력 스펙트럼 센싱에서는 각 SU들이 자신의 센싱 결과를 융합 센터(Fusion Center, FC)로 보내고 FC에서는 이를 종합하여 PU의 존재 여부를 결정한다. FC에서의 데이터 융합은 k-of-N 규칙에 의해 이루어진다. 전체 N개의 개별적인 센싱 결과 중 k개 이상의 결과가 PU의 신호를 검출한 경우 FC에서는 PU의 신호가 존재한다고 판정하는데 k가 1인 경우를 OR 규칙, k가 N인 경우를 AND 규칙이라 하며 과반수 이상의 SU가 PU의 신호를 검출했을 때 PU가 대역에 존재한다고 판정하는 경우 ($k = \lfloor \frac{N}{2} \rfloor$)를 majority 규칙이라 한다. 협력 스펙트럼 센싱의 성능 분석 및 향상을 위해 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN) 및 페이딩 환경에서의 성능 분석이 이루어졌으며^[2,3] 센싱 시간, 송신 전력, 협력 노드의 수 등의 파라미터를 통

해 센싱 성능을 향상시키는 연구가 진행되었다^[4-7]. 이와 같은 기존의 연구는 PU에서 SU로의 채널인 센싱 채널을 중심으로 이루어졌으며 SU에서 FC로 센싱 결과를 보고할 때는 오류가 없는 이상적인 채널을 가정하였다. 하지만 협력 스펙트럼 센싱의 경우 FC의 추가로 인한 시스템 모델의 변화가 발생하며 보다 현실적인 환경을 고려하기 위해서는 센싱 채널 외에 SU에서 FC로의 보고 채널의 SNR에 따른 보고 오류를 고려해야 한다. 이와 관련하여 [8]과 [9]에서는 보고 오류로 인해 센싱 성능이 제한되는 것을 보였다. 본 논문에서는 보고 채널의 보고 오류 확률로 인한 성능의 제한을 완화하기 위한 OR 규칙 기반의 협력 스펙트럼 센싱 기법을 제안한다. 제안기법은 시스템이 허용할 수 있는 오경보 확률과 보고 오류 확률의 임계값을 통해 협력 센싱에 참여할 SU를 제한한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에 적용한 시스템 모델에 대해 설명하고 III장에서는 협력 스펙트럼 센싱에서의 검출 확률(detection probability)과 오경보 확률(false alarm probability)에 대해 설명한다. IV장에서는 제안하는 보고 오류를 고려한 OR 규칙 기반의 협력 스펙트럼 센싱에 대해 설명하며 V장에서 모의실험을 통해 제안기법의 성능을 분석하고 마지막으로 VI장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 PU와 N명의 SU 그리고 FC로 이루어진 인지 무선 네트워크를 고려한다. 각 SU는 센싱 채널을 통해 PU 신호의 존재 여부를 판별하고 개별적인 센싱 결과(local decision)를 보고 채널을 통해 FC로 보낸다. FC에서는 개별 센

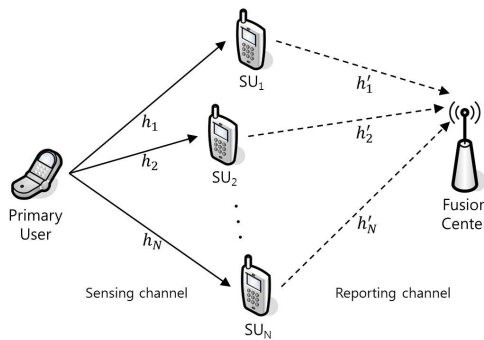


그림 1. 인지 무선 네트워크의 협력 스펙트럼 센싱 모델
Fig. 1. Cooperative spectrum sensing system model of cognitive radio network

싱 결과를 융합하여 최종 센싱 결과(global decision)를 결정하며 이 결과에 따라 각 SU들의 PU의 대역 접속 가능 여부가 결정된다. 이때 PU에서 SU_i로의 센싱 채널 이득을 h_i 라 하고 SU_i에서 FC로의 보고 채널 이득을 h'_i 이라 하며 두 채널 모두 레일리 페이딩을 따른다고 가정한다. 센싱 채널의 SNR은 $\gamma_i = \frac{E_p|h_i|^2}{N_0}$ 로 나타내며 보고 채널의 SNR은 $\gamma'_i = \frac{E_s|h'_i|^2}{N_0}$ 라 한다. 이때 E_p 와 E_s 는 PU와 SU에서의 신호 전력을 나타내며 N_0 는 잡음 전력을 나타낸다. PU의 신호가 존재하지 않는 가설을 H_0 , PU의 신호가 존재하는 가설을 H_1 이라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \begin{cases} w(t) & : H_0 \\ h_x(t) + w(t) & : H_1 \end{cases} \quad (1)$$

이때 $x(t)$ 는 PU의 송신 신호이며 $w(t)$ 는 평균이 0이고 전력이 N_0 인 AWGN을 나타낸다(i.e., $w(t) \sim \text{CN}(0, N_0)$).

센싱 채널에서 PU의 신호를 검출할 때는 수신 신호의 에너지를 임계값과 비교하는 에너지 검출 방식을 사용한다. 에너지 검출 방식에서는 수신 신호가 대역폭이 W 인 대역 통과 필터를 거치게 되며 필터의 출력을 제공하고 T 구간에서 적분을 한 후 사전에 설정된 임계값 ϵ 과의 비교를 거친다. AWGN 채널에서 에너지 검출 방식에 의해 얻어지는 오경보 확률($P_f^{(i)}$)과 검출 확률($P_d^{(i)}$)은 다음과 같다^[10].

$$P_f^{(i)} = \frac{\Gamma(u, \frac{\epsilon}{2})}{\Gamma(u)} \quad (2)$$

$$P_d^{(i)} = Q_u(\sqrt{2\gamma_i}, \sqrt{\epsilon}) \quad (3)$$

이때 $u = WT$ 이고 $\Gamma(\cdot)$ 는 감마 함수, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 는 상단 불완전 감마 함수(upper incomplete gamma function) 그리고 $Q_u(\cdot, \cdot)$ 는 u 차 일반 Marcum-Q 함수(generalized Marcum-Q function)이다.

식 (2)와 (3)을 통해 오경보 확률은 채널의 특성에 독립적이지만 검출 확률은 센싱 채널의 SNR의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 따라서 레일리 페이딩에서의 검출 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[10].

$$P_{d, Ray}^{(i)} = e^{-\frac{\epsilon}{2}} \sum_{p=0}^{u-2} \frac{1}{p!} \left(\frac{\epsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{1+\bar{\gamma}_i}{\bar{\gamma}_i}\right)^{u-1} \times \left[e^{-\frac{\epsilon}{2(1+\bar{\gamma}_i)}} - e^{-\frac{\epsilon}{2}} \sum_{p=0}^{u-2} \frac{1}{p!} \left(\frac{\epsilon \bar{\gamma}_i}{2(1+\bar{\gamma}_i)}\right)^p \right] \quad (4)$$

이때 $\bar{\gamma}_i$ 는 PU에서 SU_i로의 채널의 평균 SNR을 나타내며 h_i 가 레일리 페이딩을 따르므로 $\bar{\gamma}_i = \frac{E_p}{N_0}$ 이다.

각 SU에서 센싱한 결과는 PU의 신호 검출 여부에 따라 '0'과 '1'로 나타낼 수 있다. SU가 PU의 신호를 검출한 경우 SU의 센싱 결과는 '1'이 되고 SU가 PU의 신호를 검출하지 못한 경우 센싱 결과는 '0'이 된다.

$$d_i = \begin{cases} 0, & \text{PU is idle} \\ 1, & \text{PU is active} \end{cases} \quad (5)$$

한 bit로 표현된 개별 센싱 결과는 보고 채널을 통해 FC로 보내지는데 이때 레일리 페이딩 채널 h'_i 의 SNR에 따른 오류 확률이 존재하며 이를 BPSK(Binary Phase Shift Keying)의 BER(Bit Error Rate)로 표현할 수 있다^[9]. 이를 이용하여 보고 채널의 평균 SNR $\bar{\gamma}'_i$ 에 따른 보고 오류 확률을 표현하면 다음과 같다^[11].

$$P_e^{(i)} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}'_i}{1+\bar{\gamma}'_i}} \right) \quad (6)$$

III. 보고 채널에 따른 k-of-N 규칙

III장에서는 FC에서의 k-of-N 규칙에 따른 검출 확률과 오경보 확률에 대해 설명한다. 특히 보고 오류 확률을 적용하지 않았을 때와 적용했을 때의 비교를 통해 협력 스펙트럼 센싱에서 보고 채널 고려의 필요성에 대해 설명한다.

3.1 보고 오류를 고려하지 않는 경우

k-of-N 규칙은 k개의 개별 센싱 결과가 '1'일 때 PU의 신호가 존재한다고 판단한다. 각 SU의 검출 확률과 오경보 확률은 자신의 센싱 채널에 따라 독립적인 값을 가지며, FC에서 가질 수 있는 개별 센싱 결과의 조합 $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]$ 가 주어졌을 때 FC에서의 검출 확률과 오경보 확률은 각 SU에서의 검출 확률과 오경보 확률을 이용하여 나타내면 다음과 같다^[12].

$$P_d(\mathbf{d}) = \prod_{i=1}^N (1 - P_d^{(i)})^{(1-d_i)} (P_d^{(i)})^{d_i} \quad (7)$$

$$P_f(\mathbf{d}) = \prod_{i=1}^N (1 - P_f^{(i)})^{(1-d_i)} (P_f^{(i)})^{d_i} \quad (8)$$

FU에서의 전체 검출 확률과 오경보 확률은 FC에서 PU의 신호가 존재한다고 판단할 수 있는 모든 개별 센싱의 조합에 대한 검출 확률과 오경보 확률을 더하여 구할 수 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_d = \sum_{\mathbf{d} \in \mathbf{D}^+} P_d(\mathbf{d}) \quad (9)$$

$$Q_f = \sum_{\mathbf{d} \in \mathbf{D}^+} P_f(\mathbf{d}) \quad (10)$$

이때 \mathbf{D}^+ 는 FC에서 PU의 신호가 존재한다고 판단할 수 있는 모든 개별 센싱의 조합의 집합이다. 모든 SU가 동일한 센싱 임계값 ϵ 과 평균 SNR을 갖는다고 가정할 때, 즉 모든 SU가 동일한 검출 확률 P_d 와 오경보 확률 P_f 를 가진다고 가정하면 $k=1$ 인 OR 규칙의 경우 FC에서의 전체 검출 확률과 오경보 확률은 다음과 같다.

$$Q_d = 1 - (1 - P_d)^N \quad (11)$$

$$Q_f = 1 - (1 - P_f)^N \quad (12)$$

반면 AND 규칙의 경우 $k=N$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_d = (P_d)^N \quad (13)$$

$$Q_f = (P_f)^N \quad (14)$$

3.2 보고 오류를 고려하는 경우

보고 채널로 인한 보고 오류를 고려할 경우 SU에서의 개별 센싱 결과가 오류로 인해 반전되는 경우를 고려하여 검출 확률과 오경보 확률을 구해야 한다. FC에서 SU의 개별 센싱 결과를 '1'로 받는 경우는 두 가지가 있다. 먼저 SU에서 '1'을 보냈는데 그것이 오류가 발생하지 않고 그대로 전달된 경우, 두 번째로 SU

에서의 센싱 결과는 '0'이지만 보고 채널에서 오류가 발생하여 FC에서 '1'로 수신된 경우이다. 따라서 보고 오류를 고려한 OR 규칙에 따른 FC에서의 검출 확률 및 오경보 확률은 다음과 같다.

$$Q_d = 1 - [(1 - P_d)(1 - P_e) + P_d P_e]^N \quad (15)$$

$$Q_f = 1 - [(1 - P_f)(1 - P_e) + P_f P_e]^N \quad (16)$$

반면 AND 규칙에 따른 FC에서의 검출 확률 및 오경보 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_d = [P_d(1 - P_e) + (1 - P_d)P_e]^N \quad (17)$$

$$Q_f = [P_f(1 - P_e) + (1 - P_f)P_e]^N \quad (18)$$

그림 2는 이상에서 설명한 k-of-N 규칙과 보고 채널에 따른 ROC(Receiver Operating Characteristic) 곡선을 나타낸 그래프이다. 이때 전체 SU의 수는 5명이고($N=5$) $u=2$, 센싱 채널과 보고 채널의 평균 SNR은 5dB이다($\overline{\gamma}_i = \overline{\gamma}_r = 5dB$). 오류가 없는 이상적인 보고 채널의 경우 OR 규칙의 센싱 성능이 가장 우수한 것으로 나타났으며 AND 규칙의 경우는 단일 사용자 센싱 보다도 성능이 저하되는 것을 알 수 있다. 레일리 페이딩 보고 채널을 고려하는 경우 이상적인

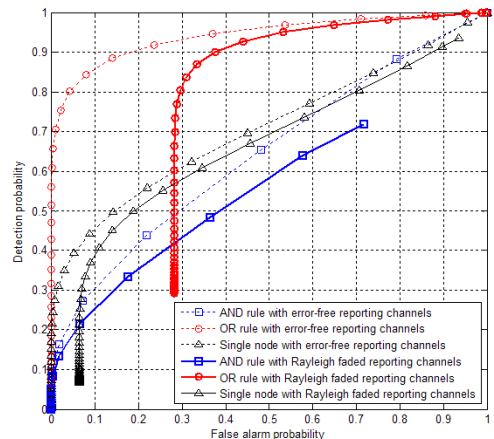


그림 2. 보고 채널에 따른 AND 규칙, OR 규칙, 단일 사용자 센싱의 ROC 곡선
Fig. 2. ROC curve for AND, OR rules and single node with reporting channel

무오류 환경에서는 고려되지 않았던 보고 오류 확률이 추가됨에 따라 단일 사용자 센싱과 OR 규칙, AND 규칙 모두 성능의 저하가 발생한다. OR 규칙의 경우 오경보 확률이 0으로 수렴하지 못하는 것을 알 수 있는데 이는 보고 오류로 인해 센싱 성능이 제한됨을 의미한다. 따라서 협력 스펙트럼 센싱에서 보고 채널의 오류 확률은 센싱의 성능에 영향을 주는 요소가 된다⁹⁾.

IV. 제안 기법

IV장에서는 레일리 페이딩 환경에서 보고 오류로 인한 성능의 제한을 완화하는 OR 규칙 기반의 협력 스펙트럼 센싱 기법을 제안한다. 앞에서 살펴본 바와 같이 OR 규칙의 ROC 곡선은 보고 오류를 고려하는 경우 오경보 확률이 0보다 큰 특정한 값에서 수렴하는 것을 나타낸다. 이를 오경보 확률의 임계값이라 하면 이는 식 (16)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{f,th} &= \lim_{P_f \rightarrow 0} Q_f \\ &= 1 - \left[(1 - P_f)(1 - P_e) + P_f P_e \right]^N \\ &= 1 - (1 - P_e)^N \\ &\approx NP_e \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)에서 보는 바와 같이 보고 오류가 존재하는 환경에서의 오경보 확률의 임계값은 센싱에 참여하는 전체 SU의 수와 보고 오류 확률로 나타낼 수 있다. 따라서 허용할 수 있는 최대 오경보 확률의 값을 설정한다면 이를 이용한 보고 오류 확률의 임계값은 다음과 같다.

$$P_{e,th} = \frac{Q_{f,th}}{N} \quad (20)$$

협력 스펙트럼 센싱은 독립적인 채널을 갖는 다수의 사용자의 센싱 결과를 융합하여 센싱의 정확도를 향상시키므로 많은 SU가 협력에 참여할수록 센싱 성능은 향상된다. 하지만 센싱에 참여하는 SU 수의 증가는 FC에서 부담하는 트래픽을 증가시키며 많은 SU들이 FC로 센싱 결과를 보내기 위한 시간이 길어져 전체 시간 슬롯에서 센싱에 소모하는 시간이 길어지고 이는 프레임 내에서 실제로 데이터를 전송할 수 있는 시간을 감소시킨다^{8,13)}. 만약 시스템 내의 전체 SU 중에서 일부 사용자를 선택하여 협력에 참여하도록

한다면 FC에서는 적은 정보의 수신으로 신뢰할 수 있는 전체 센싱 결과를 얻을 수 있으며, 특히 어떤 조건을 통해 신뢰도가 높은 개별 센싱 결과를 선별할 수 있다면 일부 신뢰성이 떨어지는 개별 센싱 결과가 전체 센싱 결과에 영향을 미치는 것을 방지할 수 있다. 센싱에 참여할 사용자의 수와 참여 여부를 결정할 조건을 설정하기 위해 협력에 참여하는 SU에 따른 센싱 효율을 다음과 같이 정의한다^{14,15)}.

$$\begin{aligned} E(K) &= (1 - \alpha) \left(1 - \frac{K}{N} \right) + \alpha Q_d \\ &= (1 - \alpha) \left(1 - \frac{K}{N} \right) \\ &\quad + \alpha \left[1 - \left((1 - \bar{P}_d)(1 - \bar{P}_e) + \bar{P}_d \bar{P}_e \right)^K \right] \end{aligned} \quad (21)$$

이때 K 는 전체 N 명의 SU 중 협력에 참여하는 SU의 수를 나타내며 α 는 센싱에 참여하는 SU의 수와 검출 확률에 부여하는 가중치에 해당하며 그 범위는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 이다. 식 (21)의 첫 번째 항은 K 에 반비례하는 항으로 센싱에 참여하는 사용자가 증가할수록 FC에서의 트래픽 부하가 증가하는 것을 나타내며 두 번째 항은 보고 오류를 고려한 OR 규칙의 검출 확률로 K 에 비례한다. 이때 \bar{P}_d 와 \bar{P}_e 는 각각 전체 N 명의 SU의 평균 검출 확률과 보고 오류 확률을 나타낸다. 따라서 가중치 α 를 통해 협력에 참여하는 SU 수와 센싱 성능에 각각 비중을 부여하고 이들의 합은 항상 1이 된다. 식 (21)는 모든 α 구간에서 concave 형태를 가지므로 항상 센싱 효율을 최대로 하는 K 를 가진다. 따라서 센싱 효율을 최대로 하는 협력 센싱 참여 SU의 수 K 와 K 명의 SU를 선별하는 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\max_{K \in \mathbb{I}} (1 - \alpha) \left(1 - \frac{K}{N} \right) + \alpha (1 - \beta^K) \quad (22)$$

$$P_{e,th} = \frac{Q_{f,th}}{K} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \min_S \sum_{j \in S} P_e^{(j)} \\ \text{s.t. } P_e^{(j)} \leq P_{e,th} \\ |S| \leq K \end{aligned} \quad (24)$$

이때 $\beta = 1 - \left[(1 - \bar{P}_d)(1 - \bar{P}_e) + \bar{P}_d \bar{P}_e \right]^K$ 이고 j 는 SU

의 인덱스를 나타내며 S 는 보고 오류 조건을 만족하여 선택된 SU의 집합이다.

V. 모의실험 결과

본 절에서는 모의실험을 통하여 제안된 OR 규칙 기반의 협력 스펙트럼 센싱 기법의 성능을 살펴본다. 제안 기법의 비교 대상인 기존의 OR 규칙과 AND 규칙은 시스템 내의 SU N 명 전체의 개별 센싱 결과를 이용하는 협력 스펙트럼 센싱 기법이다. 허용 가능한 오경보 확률의 임계값은 0.1이고 전체 SU의 수는 10명, 센싱 채널과 보고 채널의 평균 SNR은 모두 5dB이다. 이상의 파라미터를 정리하면 표 1과 같다.

그림 3은 제안하는 OR 규칙 기반의 협력 스펙트럼 센싱 기법과 기존의 OR 규칙과 AND 규칙, 그리고 단일 사용자 센싱의 ROC 곡선을 나타낸 그래프이다. 제안 기법의 오경보 확률은 기존의 AND 규칙과 단일 사용자 센싱보다 향상된 성능을 보이며, 기존의 OR 규칙이 보고 오류가 존재하는 환경에서 오경보 확률이 0.48이하로 내려가지 못했던 것에 반해 제안 기법의 경우 오경보 확률이 0에 근사한 값에서 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 OR 규칙은 FC에서 시스템 내의 모든 사용자의 개별 센싱 결과를 융합하므로 낮은 보고 오류로 인해 신뢰성이 떨어지는 개별 센싱 결과가 전체 센싱 결과에 영향을 미치기 때문이다. 반면 제안 기법의 경우 보고 오류 임계값 조건을 만족하는 K 명의 SU만의 센싱 결과를 통해 전체 센싱 결과를 결정하므로 오경보 확률의 수렴값을 낮출 수 있다. 이때 수렴하는 값은 오경보 확률 임계값인 0.1 보다 작는데 이것은 제안하는 기법이 식 (24)에 따라 보고 오류 임계값 조건을 만족하는 SU_i 중에서 $P_e^{(i)}$ 가

표 1. 모의실험 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
The number of primary user	1
The number of secondary user N	10
False alarm threshold $Q_{f,th}$	0.1
$u = WT$	2
Sensing channel SNR $\bar{\gamma}_i$	5dB
Reporting channel SNR $\bar{\gamma}_i^r$	5dB
Channel model	Rayleigh fading
Noise parameter	AWGN ($CN(0, N_0)$)

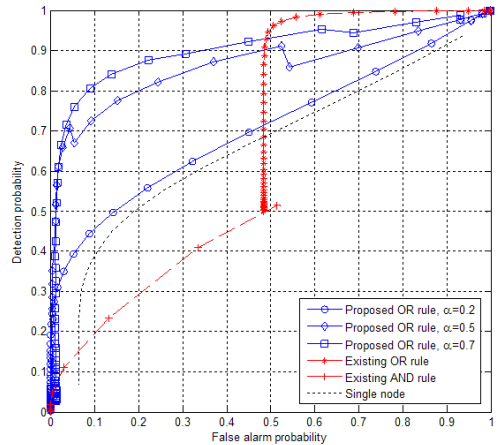


그림 3. 보고 오류를 고려한 제안 기법과 기존 협력 스펙트럼 센싱의 ROC 곡선
Fig. 3. ROC curves for proposed scheme and existing cooperative spectrum sensing with reporting channel

작은 K 명의 사용자를 선택하기 때문이다. 만약 보고 오류 확률이 정확히 $P_{e,th}$ 인 사용자 K 명을 협력에 참여시킨다면 이때의 오경보 확률은 $Q_{f,th}$ 가 된다.

그림 4는 센싱 채널의 평균 SNR이 1dB이고 보고 채널의 평균 SNR은 5dB인 비대칭 채널에서의 제안 기법과 기존 협력 스펙트럼 센싱 기법 및 단일 스펙트럼 센싱의 ROC 곡선을 나타낸 그래프이다. 센싱 채널과 보고 채널이 비대칭인 경우 역시 기존의 OR 규칙에서 전체 오경보 확률의 제한 현상이 나타나며 그 수렴값은 0.48로 동일하다. 따라서 전체 오경보 확률의 제한 현상은 보고 채널의 평균 SNR을 받는 것을

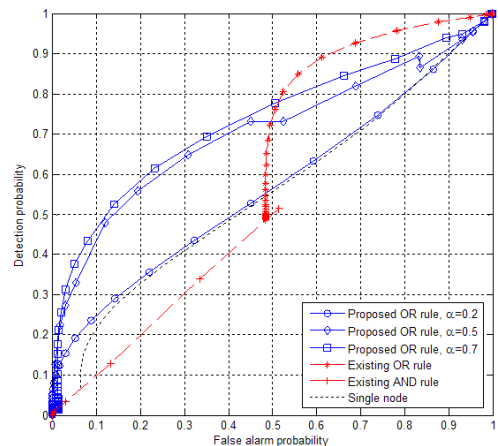


그림 4. 비대칭 채널을 고려한 제안 기법과 기존 협력 스펙트럼 센싱의 ROC 곡선
Fig. 4. ROC curves for proposed scheme and existing cooperative spectrum sensing with asymmetric channel

알 수 있다. 그림 4에서는 제안 기법과 기존 기법의 ROC 곡선이 그림 3에 비해 전체적으로 오른쪽 하단으로 내려간 것을 알 수 있는데 이는 센싱 채널의 평균 SNR이 저하됨에 따라 각 SU의 검출 확률이 감소했기 때문이다. 하지만 제안 기법의 전체 오경보 확률의 수렴값은 그림 3과 마찬가지로 0에 근사하므로 제안 기법은 센싱 채널이 보고 채널에 비해 상대적으로 열악한 비대칭 채널 환경에서도 전체 오경보 확률의 제한 현상을 완화하는 것을 확인할 수 있다.

제안 기법의 ROC 곡선은 가중치 α 에 따라 성능의 차이를 보인다. 그림 3과 4에서 제안 기법은 α 가 0.7일 때 가장 높은 성능을 나타내는데 이는 α 가 클수록 높은 검출 확률을 얻는 것에 가중치를 두기 때문이다. 또한 제안 기법의 ROC 곡선은 오경보 확률이 변화함에 따라 꺾이는 부분이 발생하는데 이를 설명하는 그래프가 그림 5와 6이다.

그림 5와 6은 각각 가중치 α 가 0.7일 때와 0.5일 때 개별 SU의 오경보 확률에 따른 협력 스펙트럼 센싱 참여 SU의 수 K 를 나타낸 그래프이다. 그림 5와 6 모두 오경보 확률이 증가함에 따라 협력 스펙트럼 센싱에 참여하는 SU의 수가 감소하는 것을 나타낸다. 오경보 확률이 증가한다는 것은 식 (2)의 에너지 검출의 센싱 임계값 ϵ 의 감소를 의미하고 이로 인해 개별 SU의 검출 확률 또한 증가하게 되며 이는 적은 사용자라도 높은 전체 검출 확률을 얻을 수 있음을 뜻한다. 즉 센싱 임계값이 변화함에 따라 식 (22)의 β 값이 변하고 이에 따라 센싱 효율을 최대로 하는 K 값이

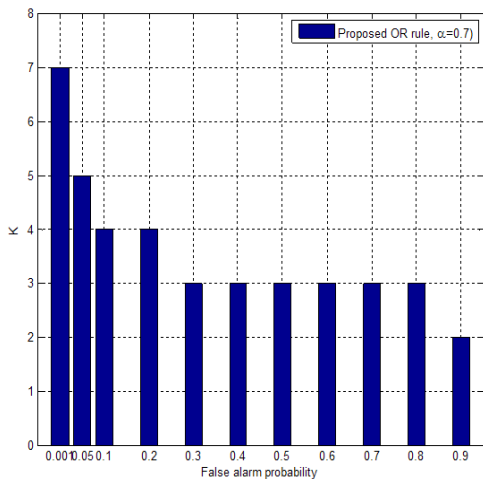


그림 5. 오경보 확률에 따른 제안 기법의 협력 스펙트럼 센싱 참여 SU 수 ($\alpha=0.7$)
 Fig. 5. The number of cooperating SU versus false alarm probability ($\alpha=0.7$)

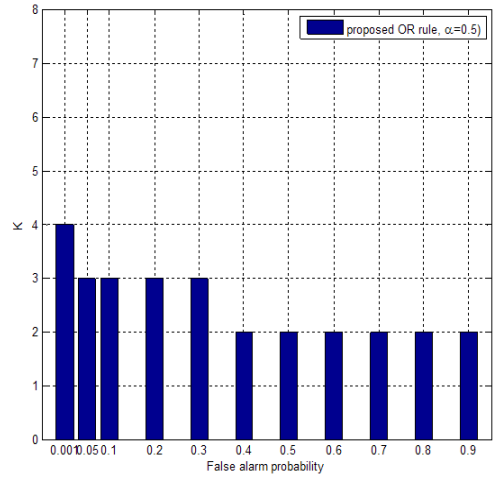


그림 6. 오경보 확률에 따른 제안 기법의 협력 스펙트럼 센싱 참여 SU 수 ($\alpha=0.5$)
 Fig. 6. The number of cooperating SU versus false alarm probability ($\alpha=0.5$)

변하게 되어 그림 3과 4에서와 같이 ROC 곡선이 꺾이는 현상이 발생한다. 따라서 제안 기법은 개별 SU의 센싱 성능의 변화를 반영하여 협력 스펙트럼 센싱에 참여할 사용자 수를 정하는 것을 알 수 있다. 반면 α 가 0.2인 경우 적은 사용자를 센싱에 참여하는 것에 많은 가중치를 두므로 모든 구간에서 K 가 1이 되어 ROC 곡선이 꺾이는 현상이 발생하지 않는다.

가중치 α 가 0.7인 그림 5의 경우 가중치가 0.5인 그림 6의 경우 보다 더 많은 수의 SU가 협력 스펙트럼 센싱에 참여함을 나타낸다. 이는 가중치 α 가 클수록 많은 사용자를 협력 스펙트럼 센싱에 참여시키더라도 높은 검출 확률을 얻는 것에 중점을 두어 센싱 효율을 최대로 하는 K 를 찾고, 반대로 α 가 작으면 적은 사용자를 이용하여 전체 센싱 결과를 내리는 것에 중점을 두기 때문이다.

그림 7은 N 이 15일 때 보고 채널의 평균 SNR의 변화에 따른 제안 기법의 협력 스펙트럼 센싱 참여 SU의 수 K 를 나타낸 그래프이다. 보고 채널의 평균 SNR이 증가함에 따라 협력 스펙트럼 센싱 참여 SU의 수는 감소하는데 이는 평균 SNR이 증가함에 따라 보고 오류 확률이 감소하고 따라서 적은 수의 SU로도 높은 센싱 성능을 얻을 수 있기 때문이다. 또한 각 SNR에서 가중치 α 가 클수록 큰 K 값을 가지는데 이는 α 가 커짐에 따라 센싱 성능에 더 큰 비중을 두고 센싱 효율을 구하기 때문이다. 따라서 그림 5, 6, 7을 통해 제안 기법은 항상 고정된 수의 개별 센싱 결과를 이용하는 기존 기법과 달리 각 SU의 개별 센싱 성능

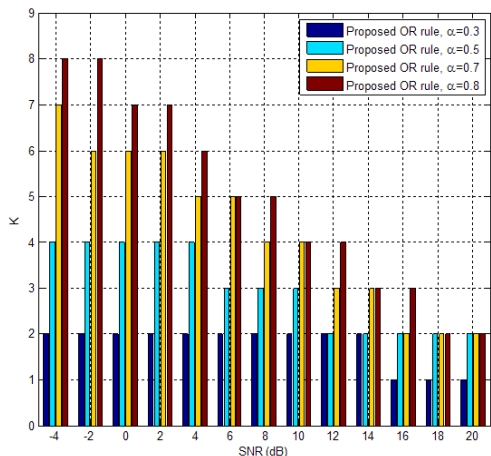


그림 7. 보고 채널의 평균 SNR에 따른 제안 기법의 협력 스펙트럼 센싱 참여 SU 수
 Fig. 7. The number of cooperating SU verse average SNR of reporting channel

과 센싱 환경에 따라서 협력 스펙트럼 센싱에 참여할 SU의 수를 정한다는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 CR 네트워크에서 각 SU의 센싱 환경을 고려하는 OR 규칙 기반의 협력 스펙트럼 센싱 기법을 제안하였다. 제안 기법은 다수의 SU의 개별 센싱 결과를 융합하여 전체 센싱 결과를 정하는 협력 스펙트럼 센싱 환경에서 개별 센싱 결과가 FC로 보고 되는 보고 채널의 보고 오류 확률에 따라 센싱 성능이 제한되는 것을 완화하고자 하였으며 이를 위해 센싱에 참여하는 SU의 수와 센싱의 성능을 나타내는 항으로 구성된 센싱 효율을 정의하고, 센싱 효율과 오경보 확률의 임계값을 통해 보고 오류 확률의 임계값 조건을 설정하여 조건을 만족하는 사용자만이 센싱에 참여하도록 하였다. 모의실험 결과 제안 기법의 보고 오류 확률 임계값 조건이 높은 보고 오류 확률로 인해 신뢰도가 떨어지는 개별 센싱 결과를 배제시킴으로써 기존 기법에서 나타났던 오경보 확률의 제한이 완화되는 것을 확인하였다.

또한 제안 기법에서는 센싱 효율을 구성하는 요소에 가중치를 부여하도록 하여 설정된 가중치에 따라 센싱 효율을 최대화 하는 협력 센싱 참여 사용자 수를 구한다. 특히 기존의 협력 스펙트럼 센싱 기법은 항상 고정된 수의 사용자가 협력 센싱에 참여하였던 것에 반해 제안 기법은 센싱 채널과 보고 채널의 SNR에 따라 센싱 효율을 최대화 하는 사용자 수를 구하므로

각 SU의 센싱 환경을 고려할 수 있다.

이상의 결과를 통해 본 논문에서 고려한 보고 오류 확률은 협력 스펙트럼 센싱의 성능에 영향을 미치는 중요한 요소임을 알 수 있으며 향후 다양한 협력 스펙트럼 센싱의 파라미터들과 함께 보고 오류를 고려한 스펙트럼 센싱 기법에 대한 연구가 필요할 것이다.

References

- [1] J. Mitola III, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in *Proc. of IEEE workshop in Mobile Multimedia Commun.*, Nov. 1999.
- [2] S. P. Herath and N. Rajatheva, "Analysis of equal gain combining in energy detection for cognitive radio over nakagami channels," in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (Glovecom)*, New Orleans, LA, Nov. 2008.
- [3] S. Atapattu, C. Tellambura, and J. Jiang, "Performance of an energy detector over channels with both multipath fading and shadowing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 12, pp. 3662-3670, Dec. 2010.
- [4] O. Shin and Y. Shin, "An improved combining of hard decisions for cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems," *J. KICS*, vol. 34, no. 2 pp. 132-138, Feb. 2009.
- [5] H. Huang, Z. Zhang, P. Cheng, and P. Qiu, "Opportunistic spectrum access in cognitive radio system employing cooperative spectrum sensing," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC)*, Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [6] S. Xie, Y. Liu, Y. Zhang, and R. Yu, "A parallel cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 8, Oct. 2010.
- [7] E. C. Y. Peh, Y.-C. Liang, Y. L. Guan, and Y. Zeng, "Power Control in Cognitive Radios under Cooperative and Non-Cooperative Spectrum Sensing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 12, pp. 4238-4248, Dec. 2011.
- [8] W. Zhang and K. B. Letaief, "Cooperative spectrum sensing with transmit and relay

diversity in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 12, pp. 4761-4766, Dec. 2008.

- [9] S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang, “Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 4, pp. 1232-1241, Apr. 2011.
- [10] F. F. Diaghham, M. S. Alouini, and M. K. Simon, “On the energy detection of unknown signals over fading channels,” in *Proc. IEEE Int’l Conf. Commun.(ICC)*, pp. 3575-3579, May 2003.
- [11] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1983.
- [12] E. C. Y. Peh, Y.-C. Liang, Y. L. Guan, and Y. Zeng, “Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with weighted decision fusion schemes,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 12, pp. 3838-3847, Dec. 2010.
- [13] W. Zhang, R. K. Mallik, and K. B. Letaief, “Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 12, pp. 5761-5766, Dec. 2009.
- [14] J. Song, J. Xue, Z. Feng, P. Zhang, and Z. Liu, “Optimal cooperative spectrum sensing strategies in cognitive radio networks,” in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.(VTC)*, Taipei, Taiwan, May 2010.
- [15] X. Hao, M. H. Cheung, V. W. S. Wong, and V. C. M. Leung, “A coalition formation game for energy-efficient cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with multiple channels,” in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf.(GlobeCom)*, Houston, TX, Dec. 2011.

최 로 미 (Romi Choe)



2012년 2월 인천대학교 전자공학과 졸업
 2012년 3월~현재 인천대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> Cognitive radio, 디지털 통신 및 신호 처리

변 윤 식 (Youn-Shik Byun)



1978년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업
 1981년 2월 연세대학교 전자공학과 석사
 1985년 2월 연세대학교 전자공학과 박사
 1990년 8월~1991년 7월 미국 Stanford대학 전자공학과 객원 교수

2004년 9월~2005년 8월 고려대학교 전파통신 공학과 객원 교수
 2006년 7월~2008년 2월 인천대학교 공과대학장
 2008년 3월~2008년 7월 인천대학교 교무처장
 2010년 8월~2011년 12월 인천대학교 대학원장
 1987년 3월~현재 인천대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> 디지털 통신 및 신호 처리