

인지 무선 네트워크 내 분산 협력 대역 검출을 위한 문턱값 최적화 방법

김낙균*, 변윤식[○]

A Threshold Optimization Method for Decentralized Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks

Nak-Kyun Kim*, Youn-Shik Byun[○]

요 약

최근 다수의 후 순위 사용자(Secondary User)가 각각의 검출 결과를 융합 센터(Fusion Center)에 보고하여 대역 검출의 성능을 향상시키기 위한 협력 대역 검출 기법이 이루어지고 있다. 또한 선 순위 사용자(Primary User)에게 할당된 주파수 대역을 융합 센터가 공유하는 인지 무선(Cognitive Radio)기술이 개발되고 있다. 이 논문에서는 분산 협력 대역 검출 환경에서 후 순위 사용자의 검출 정보가 융합 센터로 보고되는 채널의 오류 확률을 고려한 기존 분산 협력 대역 검출 기법의 성능 저하를 보완하는 새로운 분산 협력 대역 검출 기법을 제안하였다. 또한 분산 협력 대역 검출 기법의 오류 확률을 최소화 하는 검출 문턱값의 최적화 방법을 수식의 유도를 통해 제안하였다. 최적의 검출 문턱값은 분산 협력 대역 검출의 성능을 최대화 하는 것을 확인하였다.

Key Words : cognitive radio, spectrum sensing, cooperative sensing, reporting error, optimal threshold

ABSTRACT

Lately, spectrum sensing performance has been improved by using cooperate spectrum sensing which each results of sensing of several secondary users are reported to the fusion center. Using Cognitive Radio, secondary user is able to share a bandwidth allocated to primary user. In this paper, we propose a new decentralized cooperative spectrum sensing scheme which compensates the performance degradation of existing decentralized cooperative spectrum sensing considering the error probability of the channel which sensed result of the secondary user is delivered to the fusion center in decentralized cooperative spectrum sensing. In addition, a sensing threshold optimization of minimizing the error probability of decentralized cooperative spectrum sensing is introduced by deriving the equation and the optimal sensing threshold has been confirmed to maximize the decentralized cooperative spectrum sensing performance.

I. 서 론

최근 급격하게 확장되고 있는 무선 통신 시장으로

인한 대용량, 고속 멀티미디어 서비스의 제공으로 주파수 대역의 수요가 날로 증가하고 있다. 그러나 사용할 수 있는 주파수 자원은 유한하고, 이미 대부분의

※ 이 논문은 인천대학교 2014년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

• First Author : Incheon National University Department of Electronic Engineering, csp2011@incheon.ac.kr, 학생회원

○ Corresponding Author : Incheon National University Department of Electronic Engineering, byun@incheon.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2014-07-268, Received July 15, 2014; Revised October 11, 2014; Accepted January 27, 2015

주파수 대역은 할당되어 있기 때문에 주파수 자원의 효율적인 사용의 중요성이 크게 부각되고 있다. 이러한 문제에 대해 1999년 J.Mitola는 할당되어 있는 주파수 대역을 효율적으로 공유하여 사용할 수 있는 인지 무선(Cognitive Radio)기술을 제시 하였다¹¹⁾. 인지 무선 기술은 특정 주파수 대역을 할당 받아 우선적으로 사용할 수 있는 권리가 있는 선 순위 사용자(Primary User) 외에 주파수 대역을 할당받지 않은 후 순위 사용자(Secondary User)의 대역 접속을 추가적으로 허용함으로써 해당 주파수 대역의 이용 효율을 향상시키는 기술이다¹¹⁾.

인지 무선 네트워크에서 후 순위 사용자는 선 순위 사용자의 할당 주파수 대역의 사용 우선권과 성능을 최대한 보장하기 위해 선 순위 사용자의 주파수 대역 점유 여부를 정확하게 파악해야 하며, 이를 대역 검출이라 한다. 만약 선 순위 사용자가 주파수 대역을 점유하고 있을 때 후 순위 사용자에서 주파수 대역을 시도하게 될 경우 선 순위 사용자는 후 순위 사용자의 신호로 인해 간섭을 받게 되어 성능 저하를 일으키게 되며, 반대로 선 순위 사용자가 주파수 대역을 점유하지 않고 있을 때 후 순위 사용자에서 선 순위 사용자의 신호를 검출하였다고 판단할 경우 후 순위 사용자가 주파수 대역의 사용 기회를 놓치게 되므로 이용효율이 저하된다. 이처럼 인지 무선 기술 네트워크에서의 대역 검출과정은 상당히 핵심적인 기술로서 인지 무선 기술 기술의 성능에 직접적인 영향을 미친다고 할 수 있다²⁻⁴⁾.

기존의 대역 검출 기법은 한명의 후 순위 사용자가 독립적으로 선 순위 사용자의 신호를 검출하고 이를 이용해 선 순위 사용자의 상태정보를 파악하여 자신의 통신 가능 여부를 판단한다. 하지만 이러한 단일 대역 검출 기법은 새도잉이나 감쇄 또는 특정 지형과 같은 장애물의 영향을 받는 경우 선 순위 사용자 신호의 검출에 문제가 생겨 인지 무선 기술 네트워크의 성능 저하의 직접적인 원인이 된다⁵⁾. 이러한 단일 대역 검출 기법의 단점을 보완하고자 다수의 후 순위 사용자의 검출 정보를 공유하여 선 순위 사용자의 주파수 대역 점유 여부를 결정하는 협력 대역 검출 기법이 연구되고 있다⁶⁻¹²⁾. 협력 대역 검출 기법에서는 후 순위 사용자들의 검출 정보를 융합 센터(Fusion Center)로 보고하여 융합 센터에서 선 순위 사용자의 주파수 대역 점유 여부를 최종 결정하게 된다. 이때 융합 센터에서의 데이터 융합은 N 에서 k 법칙에 의하여 이루어지는데 k 가 1인 경우를 논리합 법칙(OR-rule), k 가 N 인 경우를 논리곱 법칙(AND-rule)이라 하며 N 의 과

반수이상의 후 순위 사용자가 선 순위 사용자의 신호를 검출했을 때 선 순위 사용자가 대역을 점유 중 이라고 판정하는 경우를 다수 법칙(Majority-rule)이라 한다. 또한 다수의 후 순위 사용자를 일정한 수의 집합으로 구분하여 1차 협력 대역 검출을 진행한 후 각 집합의 대표가 되는 집합 대표의 검출 정보만을 융합 센터로 보고하여 최종 선 순위 사용자의 대역 점유 여부를 판단하는 분산 협력 대역 검출 기법은 인지 무선 기술 네트워크의 모든 후 순위 사용자가 융합 센터로 검출 정보를 전송하지 않기 때문에 사용하는 전력의 소모를 낮출 수 있으며 융합 센터에서 보고 받은 검출 정보를 동시에 융합 처리하는 데이터의 통행량을 낮출 수 있다. 위와 같은 대역 검출 기법의 성능 분석 및 향상을 위해 검출 시간, 송신 전력, 검출에 협력하는 후 순위 사용자의 수 등의 매개변수를 통한 연구가 진행되었다^{13,16-18)}. 이와 같은 기존의 연구는 선 순위 사용자의 신호를 후 순위 사용자가 검출하는 검출 채널을 중심으로 이루어져 왔으며 후 순위 사용자의 검출 정보를 융합 센터로 보고하는 채널의 오류가 없다고 가정하였지만 실제 협력 대역 검출의 환경에서는 레일리 감쇄(Rayleigh fading)을 겪는 보고 채널의 오류가 존재한다. 따라서 보다 현실적인 모의실험 환경을 위하여 검출 채널과 보고 채널의 오류 확률을 고려해야 한다¹⁹⁾. 더 나아가 이 논문에서는 보고 오류로 인한 성능 제한을 완화 하며 기존 협력 대역 검출 기법의 전력 소모와 통행량 감소를 위한 분산 협력 대역 검출 기법을 제안하였다. 제안 기법은 각 오 경보 확률의 값에서 인지 무선 기술 네트워크 시스템이 가질 수 있는 대역 검출 성능의 효율성이 최대가 되는 참여 집합의 수를 지정하여 제한되는 대역 검출 기법의 성능을 완화 한다. 또한 각 검출 기법에서 최소의 오류 확률을 가지는 최적의 검출 문턱값을 수식 유도를 통해 도출하였다. 대역 검출 기법에서의 오류 확률 그래프는 정해진 검출 문턱값의 구간에서 불록한(convex) 형태를 이루게 되는데 이때의 최소값은 대역 검출의 최대의 성능을 가지게 된다.

이 논문의 II장에서는 인지 무선 기술네트워크에서 분산 협력 대역 검출의 시스템 모형에 대해 설명하고 III장에서는 분산 협력 대역 검출 성능분석과 보고 오류에 의한 성능제한의 완화 방법에 대해 설명한다. IV장에서는 제안하는 분산 협력 대역 검출 기법과 검출 성능을 최대화 하는 최적의 문턱값의 도출 방법에 대하여 설명하였다. V장에서는 모의실험을 통한 제안기법의 성능을 확인, 분석하고 마지막으로 VI장에서 이 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모형

이 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 1차 사용자와 N 명의 2차 사용자, n 개의 집합 그리고 융합 센터로 이루어진 인지 무선 네트워크 환경을 고려한다. 이때 후 순위 사용자는 검출 채널을 통해 선 순위 사용자의 주파수 대역 점유 여부를 판별하고 각 집합내에서 개별적인 검출 결과(local decision)를 공유하여 1차적인 협력 대역 검출을 진행한다. 그 후 집합의 대표가 되는 2원 소실 채널의 협력 대역 검출 결과를 융합 센터로 보낸다. 융합 센터에서는 각 검출 결과를 융합하여 최종 검출 결과(global decision)를 결정하며 이 결과에 따라 선 순위 사용자의 주파수 점유 여부를 파악하여 후 순위 사용자의 대역사용 가능 여부가 결정된다. 이때 선 순위 사용자에서 i 번 째 후 순위 사용자로의 검출 채널 이득을 h_i 라 하고 i 번 째 후 순위 사용자에서 융합 센터로의 보고 채널 이득을 h'_i 라고 한다. 이때 두 개의 채널 모두 레일리 감쇄를 겪는다고 가정한다. 검출 채널의 신호 대 잡음비는 $\gamma_i = \frac{E_p h_i^2}{N_0}$, 보고 채널의 신호 대 잡음비는 $\gamma'_i = \frac{E_s h_i'^2}{N_0}$ 로 나타낼 수 있다. 이때 E_p 와 E_s 는 선 순위 사용자와 후 순위 사용자의 신호 전력을 나타내며 N_0 는 잡음의 전력을 나타낸다. 선 순위 사용자 신호의 존재 여부에 따라 각 후 순위 사용자가 받게 되는 신호를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_i(t) = \begin{cases} h_i \cdot s(t) + n_i(t), & H_1 \\ n_i(t), & H_0 \end{cases} \quad (1)$$

여기에서 $x_i(t)$ 는 i 번 째 후 순위 사용자가 받은

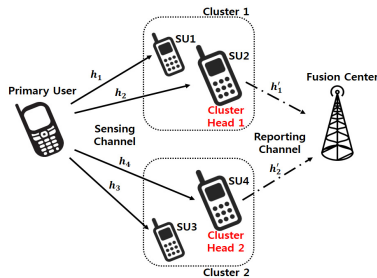


그림 1. 인지 무선 네트워크의 분산 협력 대역 센싱 시스템 모형
Fig. 1. Decentralized cooperative spectrum sensing model of cognitive radio network

신호, $s(t)$ 는 전송된 선 순위 사용자의 신호, 그리고 $n_i(t)$ 는 전력이 N_0 인 평균이 0인 가산성 백색 정규 잡음(AWGN)을 나타낸다. 또한 선 순위 사용자에서 신호를 전송하고 있을 경우에 후 순위 사용자에서 받은 신호의 상태를 H_1 , 선 순위 사용자에서 신호를 전송하지 않고 있을 경우에 후 순위 사용자에서 받은 신호의 상태를 H_0 라고 가정한다^{7,8)}.

결국 수신된 신호의 상태를 얼마나 정확하게 판별하느냐에 따라 대역 검출의 성능이 결정된다고 할 수 있다. 하지만 잡음이 섞인 채널을 통과한 신호를 수신한 후 순위 사용자에서의 대역 검출은 신호의 왜곡이 더해져 성능이 저하된다. 이렇게 대역 검출에서 신호를 제대로 판별하지 못하여 발생할 수 있는 오류 확률에는 미 검출 확률(probability of missed detection, P_m)과, 오 경보 확률(probability of false alarm, P_f)이 있다. 미 검출 확률은 실제로 선 순위 사용자의 통신이 진행되고 있을 때 후 순위 사용자에 수신된 신호의 전력이 설정된 검출 문턱값보다 작은 경우 선 순위 사용자의 현재 상태를 통신 중이 아니라고 판단할 확률이다. 또 다른 오류 확률인 오 경보 확률은 선 순위 사용자의 통신이 진행되고 있지 않을 때 후 순위 사용자에 수신된 신호의 전력이 설정된 검출 문턱값보다 큰 경우 선 순위 사용자의 현재 상태를 통신 중이라고 판단할 확률이다. 이 두 오류 확률을 통하여 대역 검출에서의 전체 오류 확률을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{e,total} \equiv P(H_1)P_m + P(H_0)P_f \quad (2)$$

여기에서 $P(H_1)$ 은 선 순위 사용자가 현재 신호를 전송 중일 확률, $P(H_0)$ 은 선 순위 사용자가 현재 신호를 전송하지 않고 있을 확률을 나타내며 $P(H_1) + P(H_0) = 1$ 을 만족시킨다.

검출 채널에서 선 순위 사용자의 신호를 검출할 때는 수신된 신호의 에너지를 미리 설정해 놓은 검출 문턱값과 비교하는 에너지 검출 방식을 사용한다¹³⁾. 에너지 검출 기법은 선 순위 사용자신호의 사전 정보를 필요로 하지 않기 때문에 낮은 복잡도를 가지며, 구현하는데 용이하다. 하지만 채널을 통과하며 잡음이 섞인 신호의 크기를 측정하기 때문에 신호의 신호 대 잡음비가 낮은 경우 성능이 크게 저하될 수 있는 단점이 존재한다. 에너지 검출 기법은 i 번 째 후 순위 사용자에서 수신된 선 순위 사용자의 신호 $x_i(t)$ 를 대역폭

이 W 인 대역 통과 여파기에 통과시킨 후 표본화를 거친 신호를 제공하여 에너지를 구한다. 그 후 표본화 시간 T 에 관하여 적분을 한 후 설정된 문턱값 λ 과의 비교를 거쳐 최종판별을 하는 방법으로 이루어진다. 에너지 검출기의 출력 Y 는 다음과 같다^[14].

$$Y = \begin{cases} X_{2TW}^2(2\gamma_i), & H_1 \\ X_{2TW}^2, & H_0 \end{cases} \quad (3)$$

이때 Y 의 크기가 문턱값 λ 보다 크면 선 순위 사용자의 현재 상태를 H_1 이라고 판단하게 되며, Y 의 크기가 문턱값 λ 보다 작으면 선 순위 사용자의 현재 상태를 H_0 이라고 판단하게 된다. 레일리 감쇄를 겪는 채널에서 에너지 검출 방식을 통해 얻어지는 i 번 째 후 순위 사용자의 검출 확률과 미 검출 확률, 그리고 오 정보 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[11].

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

$$P_{m,i} = 1 - P_{d,i} \quad (5)$$

$$P_{f,i} = \frac{\Gamma(u, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(u)} \quad (6)$$

여기에서 $\bar{\gamma}_i$ 는 선 순위 사용자에서 i 번 째 후 순위 사용자로의 채널의 평균 신호 대 잡음비를 나타내며, h_i 가 레일리 감쇄를 따르므로 $\bar{\gamma}_i = E_P/N_0$ 이다. 또한 $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 는 불완전 감마 함수 이고 $\Gamma(\cdot)$ 는 완전 감마 함수를 나타낸다.

각 후 순위 사용자에서 검출한 정보는 선 순위 사용자의 주파수 대역 점유 여부에 따라 '0'과 '1'로 융합 센터에 보내지게 되는데 후 순위 사용자에서 선 순위 사용자의 신호를 검출 하였을 경우 후 순위 사용자의 검출 정보는 '1'이 되는 것이고, 반대의 경우는 '0'이 되는 것이다. 이때 하나의 비트로 표현되는 개별 검출 정보는 보고 채널을 통하여 융합 센터로 전송되며, 보고 채널은 2원 소실 채널(Binary erasure channel)과 2원 대칭 채널(Binary symmetric channel)과 같은 두 가지 경우의 채널 모형으로 나누어 생각할 수 있다. 2원 소실 채널이란 '0'과 '1' 두 개의 입

력이 들어가 소실 확률 p 로 인하여 '0', '1', e 세 개의 출력이 나오는 채널을 말한다. 여기에서 e는 소실 심볼을 나타낸다. 보통 채널은 완벽하지 않고 때때로 보내진 비트가 소실되는 경우가 생긴다. 이때 수신기에서는 소실 심볼 e를 전송받게 되고, 송신된 비트가 어떤 값을 나타내는지 알 수 없다. 반면 수신된 심볼 '0'과 '1'은 100%의 확률로 오류가 없이 전송 되었다고 판단한다. 또한 2원 대칭 채널이란 '0'과 '1'이 전송되는 도중 '0'이 '1'로, '1'이 '0'으로 착오되는 오류 확률이 같은 채널을 말한다. 다시 말하여 2진 부호를 전송하는 채널의 입출력 관계를 나타내는 확률이 대칭인 채널을 가리킨다^[15]. 현실적인 채널에서의 디지털 데이터는 부호화 될 것이고, 순환 중복 검사(cyclical redundancy check : CRC)가 붙을 것이므로 2원 소실 채널과 가깝다고 볼 수 있다. 하지만 이 논문에서는 모의실험의 복잡성을 줄이고 제안 기법의 성능확인을 위하여 2원 대칭 채널을 고려하여 연구를 진행하였다. 2원 대칭 채널을 고려한 보고채널은 레일리 감쇄 채널 h'_i 의 신호 대 잡음비의 크기에 따른 오류확률이 존재하게 된다. 이는 이진 위상 천이 방식(BPSK: Binary Phase Shift Keying)의 비트오류율로 표현 할 수 있다^[16].

$$P_{e,i}^{h'_i} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\bar{\gamma}'_i}) \quad (7)$$

또한 보고 채널은 각 채널에 따라 독립적인 보고 오류 확률을 갖게 된다. 따라서 보고채널의 평균 신호 대 잡음비 $\bar{\gamma}'_i$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{e,i} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}'_i}{1+\bar{\gamma}'_i}} \right) \quad (8)$$

III. 분산 협력 대역 검출 기법

인지 무선 기술 네트워크 내의 모든 후 순위 사용자가 동시에 융합 센터로 검출 정보를 보고하여 선 순위 사용자의 현재 주파수 대역 점유 여부를 최종 판단하게 되는 기존의 협력 대역 검출 기법은 단일 대역 검출 기법에 비하여 상당히 향상된 성능을 보인다. 하지만 망 내의 모든 후 순위 사용자가 동시에 검출 정보를 융합 센터로 전송하기 때문에 단위 시간당 사용되는 데이터 통행량이 인지 무선 기술 네트워크 내의 후 순위 사용자의 수에 비례하여 증가하게 된다. 이는

곧 융합 센터에서 동시에 처리해야 하는 데이터의 연산량이 증가하는 것이며, 각 후 순위 사용자에서 융합 센터로 보내는 신호의 전력 또한 증가하게 된다. 이는 주파수 대역의 부족과 직결 되므로 인지 무선 기술을 사용하게 된 취지와 어긋난다. 이에 기존의 협력 대역 검출 기법에서 생기는 불리함을 최소화시키기 위하여 분산 협력 대역 검출 기법이 제안되었다¹⁹⁾. 분산 협력 대역 검출 기법은 전체 인지 무선 기술 네트워크 내의 후 순위 사용자를 n 개의 집합으로 구분하여 각 집합 내의 후 순위 사용자 사이의 협력 대역 검출을 우선 진행한 뒤 집합의 대표가 되는 집합 대표만이 융합 센터로 검출 정보를 전송하기 때문에 기존의 협력 대역 검출 기법을 사용할 때와 비교하여 융합 센터에서 동시에 처리해야 하는 검출 정보의 연산량은 N/n 으로 감소하게 된다. 또한 집합 대표를 제외한 각 후 순위 사용자는 융합 센터로 직접적인 검출 정보를 전송하지 않으므로 단말기 내의 사용 전력 또한 감소하게 된다. 각 집합과 융합 센터에서 진행 되는 검출 융합 기법은 각각 논리합, 논리곱, 다수 법칙 이므로 분산 협력 대역 검출에서 진행되는 검출 융합 기법은 9가지가 되며 이 논문에서는 대표적으로 논리합-논리곱 법칙, 논리곱-논리합 법칙, 논리합-다수 법칙의 성능을 비교하였다. 또한 현실적인 환경의 반영을 위해 검출 채널만이 아닌 보고 채널에서의 오류 확률도 고려하였다. 이때 모든 후 순위 사용자가 동일한 검출 문턱값 λ 과 검출 채널, 보고 채널의 평균 신호 대 잡음비를 갖는다고 가정할 때, 즉 모든 후 순위 사용자가 같은 검출 확률 P_d 와 오 경보 확률 P_f 를 가진다면 앞서 언급한 대표적인 세 가지 법칙의 검출 확률 및 오 경보 확률은 다음과 같다¹⁸⁾.

※논리합-논리곱 법칙

$$Q_{d,o} = 1 - [(1 - P_d)(1 - P_e) + P_d P_e]^{N/n} \quad (9)$$

$$Q_d = [(Q_{d,o})(1 - P_e) + (1 - Q_{d,o})P_e]^n$$

$$Q_{f,o} = 1 - [(1 - P_f)(1 - P_e) + P_f P_e]^{N/n} \quad (10)$$

$$Q_f = [(Q_{f,o})(1 - P_e) + (1 - Q_{f,o})P_e]^n$$

$$Q_m = 1 - Q_d \quad (11)$$

※논리곱-논리합 법칙

$$Q_{d,A} = [P_d(1 - P_e) + (1 - P_d)P_e]^{N/n} \quad (12)$$

$$Q_d = 1 - [(1 - Q_{d,A})(1 - P_e) + Q_{d,A}P_e]^n$$

$$Q_{f,A} = [P_f(1 - P_e) + (1 - P_f)P_e]^{N/n} \quad (13)$$

$$Q_f = 1 - [(1 - Q_{f,A})(1 - P_e) + Q_{f,A}P_e]^n$$

$$Q_m = 1 - Q_d \quad (14)$$

※논리합-다수 법칙

$$Q_d = \sum_{k=\lceil n/2 \rceil}^n [(Q_{d,o}(1 - P_e))^k ((1 - Q_{d,o})P_e)^{n-k}] \quad (15)$$

$$Q_f = \sum_{k=\lceil n/2 \rceil}^n [(Q_{f,o}(1 - P_e))^k ((1 - Q_{f,o})P_e)^{n-k}] \quad (16)$$

$$Q_m = 1 - Q_d \quad (17)$$

그림 2는 앞서 설명한 세 가지 법칙의 검출 문턱값에 따른 수신기 동작 특성(ROC: Receiver Operating Characteristic) 곡선을 나타낸 그래프이다. 이때 전체 후 순위 사용자의 수는 24명이고($N=24$) 집합의 수는 8 ($n=8$), 시간-대역폭 곱 u 의 값은 2이다. 검출 채널과 보고 채널의 평균 신호 대 잡음비는 7dB이다 ($\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_i = 7dB$). 레일리 감쇄 환경을 고려한 현실적인 보고 오류 확률의 영향으로 각 검출 기법의 성능 저하가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 논리곱-논리합 법칙의 경우 오 경보 확률이 0으로 수렴하지 못하고, 논리합-논리곱 법칙과 논리합-다수 법칙의 경우 검출 확률이 1로 수렴하지 못하는 것을 알 수 있는데 이는 보고 채널의 오류 확률이 분산 협력 대역 검출의 성능에 직접적인 영향을 미친다는 사실을 반증한다. 따라서 이 논문에서는 레일리 감쇄 환경에서 보고 오류로

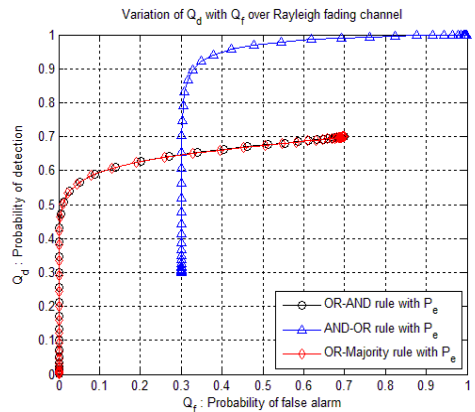


그림 2. 보고 오류 확률을 고려한 논리합-논리곱, 논리곱-논리합, 논리합-다수 법칙의 수신기 동작 특성 곡선
Fig. 2. ROC curves for OR-AND, AND-OR, OR-Majority rules with reporting error

인한 성능의 제한을 완화하는 분산 협력 대역 검출 기법을 사용하였다¹⁵⁾. 앞에서 살펴본 바와 같이 논리곱-논리합 법칙의 성능 곡선은 오 경보 확률이 0 보다 큰 값에서 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 식 (13)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{f,th} = \lim_{P_e \rightarrow 0} Q_f = 1 - (1 - P_e - P_e^{N/n} + P_e^{(N+n)/n} + P_e^{(N+n)/n})^n \quad (18)$$

이때 P_e 의 값이 충분히 작고 전체 후 순위 사용자 수 N 은 전체 집합의 수 n 보다 항상 큰 값을 지니므로 식 (18)에서 $-P_e^{N/n} + P_e^{(N+n)/n} + P_e^{(N+n)/n} \approx 0$ 으로 가정할 수 있다. 따라서 식 (18)은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$Q_{f,th} = \lim_{P_e \rightarrow 0} Q_f \approx 1 - (1 - P_e)^n \approx 1 - (1 - nP_e) = nP_e \quad (19)$$

또한 논리합-논리곱 법칙과 논리합-다수 법칙의 성능 곡선은 검출 확률이 1보다 작은 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 식 (9)와 식 (15)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{d,th} = \lim_{P_e \rightarrow 1} Q_d = (1 - P_e - P_e^{N/n} + P_e^{(N+n)/n} + P_e^{(N+n)/n})^n \quad (20)$$

식 (20) 또한 식 (18)과 마찬가지로 근사화가 가능하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{d,th} = \lim_{P_e \rightarrow 1} Q_d \approx (1 - P_e)^n \approx 1 - nP_e \quad (21)$$

식 (19)와 식 (21)에서 보는 바와 같이 보고 채널의 오류 확률을 고려한 환경에서의 오 경보 확률과 검출 확률의 문턱값은 검출에 참여하는 집합 대표의 수와 보고 오류 확률로 나타낼 수 있다. 그렇기 때문에 현재 고려한 환경에서 허용할 수 있는 최대 오 경보 확률의 값과 검출 확률의 값을 식 (19)와 식 (21)을 통하여 얻을 수 있다.

$$P_{e,th} = \frac{Q_{f,th}}{n} \quad (22)$$

$$P_{e,th} = \frac{1 - Q_{d,th}}{n} \quad (23)$$

협력 대역 검출 기법은 독립적인 채널을 갖는 다수의 후 순위 사용자의 검출 결과를 융합하여 최종 검출 결과를 내리기 때문에 검출에 참여하는 후 순위 사용자의 수가 증가할수록 성능은 향상된다. 하지만 이는 융합 센터에 걸리는 통행량의 증가와 직결되기 때문에 전체 배정 시간에서 검출에 소모하는 시간이 길어지고 데이터를 전송할 수 있는 시간을 감소시킨다¹³⁾. 이는 분산 협력 대역 검출에서도 마찬가지로의 모습을 보인다. 기존의 협력 대역 검출 기법을 사용할 때와 비교해보면 전체적인 성능의 향상을 가져오지만 그림 2에서 보는 바와 같이 성능의 제한은 여전히 남아있다. 만약 어떤 조건을 통해 신뢰도가 높은 검출 결과를 선별할 수 있다면 전체 n 명의 집합 대표 중에서 일부를 선택해 협력에 참여 시켜 융합 센터에서는 보다 적은 정보의 수신으로 신뢰할 수 있는 전체 검출 결과를 얻을 수 있으며 일부 신뢰성이 떨어지는 검출 결과로 인한 전체 검출 결과의 신뢰도 저하를 방지할 수 있을 것이다. 검출에 참여할 집합 대표의 수와 참여 여부를 결정할 조건을 설정하기 위한 집합 대표 수에 따른 검출 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다¹⁸⁾.

$$E(k) = (1 - \alpha) \left(1 - \frac{k}{n} \right) + \alpha Q_d \quad (24)$$

이때 k 는 전체 n 명의 집합 대표중 협력 검출에 참여하는 집합 대표의 수를 나타내며 α 는 검출에 참여하는 집합 대표의 수와 검출 확률에 부여하는 가중치에 해당하며 그 범위는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 이다. 식 (19)의 첫 번째 항은 k 에 반비례 하는 항으로 검출에 참여하는 집합 대표의 수가 증가할수록 융합 센터에서의 통행량 부하가 증가하는 것을 나타낸다. 두 번째 항은 각 검출 기법의 검출 확률로 k 에 비례한다. 또한 식 (19)의 가중치 α 를 통하여 협력에 참여하는 집합 대표의 수와 검출 성능에 각각 비중을 부여하고 이들의 합은 항상 1이 되며 모든 α 구간에서 오목한(concave) 형태를 가지므로 항상 검출 효율을 최대로 하는 k 값을 가지게 된다. 따라서 검출 효율을 최대로 하는 참여 집합 대표의 수 k 와 이를 선별하는 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\max_{k \in n} (1 - \alpha) \left(1 - \frac{k}{n} \right) + \alpha Q_d \quad (25)$$

$$i \in S, P_{e,i} \leq \begin{cases} \frac{Q_{f,th}}{n} & (\text{논리곱-논리합 법칙}) \\ \frac{1 - Q_{d,th}}{n} & (\text{논리합-논리곱 법칙, 논리합-다수 법칙}) \end{cases} \quad (26)$$

이때 i 는 집합 대표의 지표를 나타내며 S 는 보고 오류 조건을 만족시켜 선별된 집합 대표의 집합으로 집합의 크기는 k 를 넘을 수 없다($|S| \leq k$).

IV. 최적의 검출 문턱값 도출

대역 검출 기법의 성능을 극대화시키기 위해서는 전체 오류 확률의 크기가 최소화 되어야 한다는 점을 앞서 언급하였다. 분산 협력 대역 검출에서의 미 검출 확률 Q_m 과 오 경보 확률 Q_f 는 검출 문턱값, 검출 채널과 보고 채널의 평균 신호 대 잡음비의 크기, 시간-대역폭 곱의 크기에 따라 값이 변하는 것을 확인할 수 있다¹⁸⁾. 앞서 언급한 분산 협력 대역 검출은 일정한 평균 신호 대 잡음비의 크기와 시간-대역폭 곱의 크기를 가진다고 가정하였기 때문에 전체 오류 확률은 공통적으로 검출 문턱값만을 변수로 가지게 된다. 따라서 분산 협력 대역 검출에서 최적의 성능을 가지는 검출 문턱값은 전체 오류 확률을 가장 작게 만드는 값이라고 할 수 있다. 식 (2)로 표현되는 단일 대역 검출 기법에서의 전체 오류 확률 식은 분산 협력 대역 검출에서 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$P_{e,total} = P(H_1)Q_m + P(H_0)Q_f \quad (27)$$

식 (27)과 같이 표현되는 전체 오류 확률은 검출 문턱값 λ 를 변수로 가지는 불룩한 형태의 함수이다. 따라서 정해진 구간에서 전체 오류 확률 $P_{e,total}$ 을 검출 문턱값 λ 에 대하여 미분한 값이 0인 지점을 최적의 문턱값 $\hat{\lambda}$ 로 설정할 수 있다¹⁹⁾.

$$\left. \frac{\partial P_{e,total}}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=\hat{\lambda}} = 0 \quad (28)$$

$$\left. \frac{\partial^2 P_{e,total}}{\partial \lambda^2} \right|_{\lambda=\hat{\lambda}} > 0 \quad (29)$$

다시 말해서 식 (28)는 전체 오류 확률 $P_{e,total}$ 의 접선의 기울기가 0인 부분을 찾는 과정이고, 식 (29)는 식 (28)에서 구한 문턱값 $\hat{\lambda}$ 가 불룩한 형태를 이루는 구간 안에 있는지를 확인하는 과정이다. 위의 두 식을 모두 만족시키는 값은 정해진 구간에서 가장 작은 전체 오류 확률 $P_{e,total}$ 을 가진다. 이를 통해 인지 무선 기술의 검출 환경에서 파일럿 신호를 통하여 검출 채널의 특성과 선 순위 사용자 신호의 신호 대 잡음비를

측정하여 각 검출 기법의 오류 확률을 최저로 낮추는 최적의 문턱값을 찾을 수 있다¹⁹⁾. 또한 식 (28)은 식 (27)에 대입하여 정리하면 Q_m 과 Q_f 의 미분형태로 나타낼 수 있고 이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial P_{e,total}}{\partial \lambda} = P(H_1) \frac{\partial Q_m}{\partial \lambda} + P(H_0) \frac{\partial Q_f}{\partial \lambda} = 0 \quad (30)$$

$$Q_{m,f} = \sum_{j=k}^n \binom{n}{j} Q_{m,f1}^j (1 - Q_{m,f1})^{n-j} \quad (31)$$

$$Q_{m,f1} = \sum_{i=k}^{N/n} \binom{N/n}{i} P_{m,f}^i (1 - P_{m,f})^{N/n-i} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{m,f}}{\partial \lambda} &= \frac{\partial Q_{m,f1}}{\partial \lambda} \sum_{j=k}^n \binom{n}{j} Q_{m,f1}^{j-1} (1 - Q_{m,f1})^{n-j} \\ &\quad \times \left[j - (n-j) \frac{Q_{m,f1}}{1 - Q_{m,f1}} \right] \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{m,f1}}{\partial \lambda} &= \frac{\partial P_{m,f}}{\partial \lambda} \sum_{i=k}^{N/n} \binom{N/n}{i} P_{m,f}^{i-1} (1 - P_{m,f})^{N/n-i} \\ &\quad \times \left[i - (N/n - i) \frac{P_{m,f}}{1 - P_{m,f}} \right] \end{aligned} \quad (34)$$

일반적인 분산 협력 대역 검출 기법에서의 미 검출 확률, Q_m 과 오 경보 확률, Q_f 은 구하는 과정이 동일하기 때문에 이를 하나의 문자 $Q_{m,f}$, $Q_{m,f1}$, $P_{m,f}$ 로 표현하였다. 이때 $Q_{m,f1}$ 은 집합 내에서 이루어지는 1차적인 협력 대역 검출 확률을 나타내며, 특정 대역 검출 환경으로부터 주어진 각각의 변수와 대역 검출 성능 식이 주어진다면 식 (31)부터 식 (34)까지의 과정을 통하여 주어진 환경에 적합한 최적의 검출 문턱값을 구할 수 있다.

그리하여 찾아낸 최적의 검출 문턱값을 사용하여 검출을 진행 하게 된다면, 정해진 특정 환경에서의 최적의 성능을 가지는 대역 검출 기법을 찾아내어 사용할 수 있고 이는 곧 전체 인지 무선 기술 네트워크의 성능을 극대화 할 수 있다. 일정한 선 순위 사용자 신호의 신호 대 잡음비 γ 가 고정된 환경이라면 각 대역 검출 기법의 검출 문턱값 λ 에 따른 검출 성능은 확인한 차이를 보이기 때문에 최적의 문턱값 $\hat{\lambda}$ 를 찾아내는 과정은 인지 무선 기술 성능과 직결 된다고 볼 수 있다. 즉 분산 협력 대역 검출에서 위의 방법을 통해 각 검출 기법에 따른 최적의 문턱값을 구함으로써 검출 성능을 극대화 시킬 수 있다.

V. 모의실험 결과

이 절에서는 모의실험을 통하여 새롭게 제안된 분산 협력 대역 검출 기법의 성능과 각 검출 기법의 성능을 최대화 하는 최적의 검출 문턱값 도출 방법을 살펴본다. 모의실험 결과와의 비교 대상인 기존의 분산 협력 대역 검출 기법은 전체 집합 대표가 검출에 참여했을 때의 검출 결과를 이용하였다. 이때 시스템 내의 전체 후 순위 사용자는 N 명, 집합의 수는 8개, 허용 가능한 검출 확률과 오 경보 확률의 문턱값은 0.7과 0.3이고 검출 채널과 보고 채널의 평균 신호 대 잡음비는 7dB로 설정하였고, 이상의 매개변수를 정리 하면 표 1과 같다.

그림 3은 제안하는 분산 협력 대역 검출 기법의 대표적인 세 가지 법칙의 가중치 α 에 따른 수신기 동작 특성 곡선을 나타낸 그래프이다. 세 가지 기법 모두 기존의 검출 기법보다 향상된 성능을 보이며 논리곱-논리합 법칙의 경우 오 경보 확률이 0.3 이하로 내려 가지 못했던 것에 반해 제안 기법에서는 0에 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 보고 오류의 영향으로 비슷한 성능을 보이며 검출 확률이 0.7이상으로 올라가지 못했던 논리합-논리곱 법칙 과 논리합-다수 법칙은 제안 기법에서 모두 1에 수렴하는 것을 알 수 있다. 오 경보 확률 또는 검출 확률의 제한이 생기는 이유는 기존의 협력 대역 검출에서의 융합 센터가 시스템 내의 모든 집합 대표의 검출 결과를 융합하므로 보고 오류가 높은 집합 대표의 검출 결과는 전체 검출 결과의 신뢰성을 저하시키기 때문인데 제안 기법의 경우 식

표 1. 모의실험 매개변수
Table 1. Simulation parameters

| Parameter | Value |
|--|--------------------------|
| The number of primary user | 1 |
| The number of secondary user | 24 |
| The number of cluster | 8 |
| Detection threshold $Q_{d,th}$ | 0.7 |
| False alarm threshold $Q_{f,th}$ | 0.3 |
| $u = WT$ | 2 |
| Sensing weight α | 0.5, 0.7 |
| Sensing channel SNR $\bar{\gamma}_i$ | 7dB |
| Reporting channel SNR $\bar{\gamma}_i^r$ | 7dB |
| Channel model | Rayleigh fading |
| Noise parameter | AWGN ($CN(0, N_0)$) |

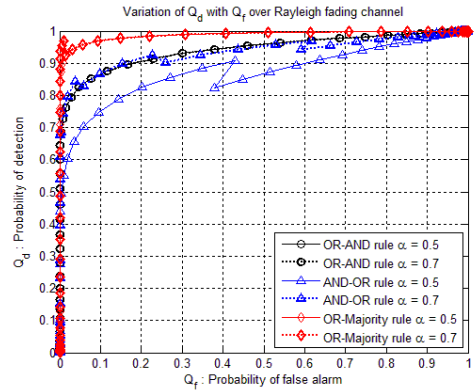


그림 3. 보고 오류를 고려한 분산 협력 대역 검출의 수신기 동작 특성 곡선
Fig. 3. ROC curve for decentralized cooperative spectrum sensing with reporting error

(20)과 식 (21)을 통하여 구할 수 있는 보고 오류 문턱값 조건을 만족시키는 k 명의 집합 대표의 검출 결과만을 통하여 전체 검출 결과를 결정하므로 제한되는 성능을 완화할 수 있다.

이때 식 (24)를 만족시키는 집합 대표중에서 보고 오류 확률 $P_{e,i}$ 가 낮은 순서대로 k 명의 집합 대표를 선택하지 않고 보고 오류 확률이 정확히 $P_{e,th}$ 인 집합 대표 k 명을 협력 검출에 참여 시킨다면 이때의 오 경보 확률 및 검출 확률은 $Q_{f,th}$ 이나 $Q_{d,th}$ 가 된다.

제안 기법의 수신기 동작 특성 곡선은 가중치 α 에 따라 성능의 차이를 보인다. 그림 3에서 제안 기법은 α 가 0.7일 때 가장 좋은 성능을 나타내는데 이는 α 가 크면 클수록 더 높은 검출 확률을 얻는 것에 비중을 두기 때문이다. 만약 α 의 크기가 작다면 더 적은 수의 집합 대표를 이용하여 전체 검출 결과를 내리는 것에 중점을 두기 때문에 비교적 성능은 제한되지만, α 의 값이 커질수록 융합 센터의 결리는 통행량의 증가로 융합하는 검출 정보의 양이 많아져 데이터 전송 시간을 감소시킨다. 또한 제안 기법의 수신기 동작 특성 곡선은 오 경보 확률이 변화함에 따라 꺾이는 부분이 발생하는데 이를 설명하기 위해서는 기본적인 협력 대역 검출 기법의 성질을 먼저 파악해야 한다. 일반적으로 협력 대역 검출은 검출에 참여하는 사용자의 수가 증가할수록 더 좋은 성능을 보인다. 즉 검출에 참여하는 사용자의 수가 많을수록 일정 크기의 오 경보 확률 대비 검출 확률의 크기가 빠르게 증가한다는 것이다. 또한 같은 검출 문턱값 λ 를 기준으로 더 많은 수의 사용자가 협력하는 검출일수록 오 경보 확률과 검출 확률이 더 높은 특성을 가진다. 따라서 제안 기

법인 식 (24)-(26)의 보고 오류 조건을 통해 선별된 k 명의 사용자들은 낮은 오 경보 확률과 검출 확률을 가지는 구간에서 성능을 빠르게 증가시키기 위해 상대적으로 많은 수가 필요하다. 또한 오 경보 확률 및 검출 확률이 증가할수록 식 (24)를 통한 보고 오류 조건을 만족시키는 사용자 수 k 가 감소하기 때문에 상대적으로 성능이 낮아져 그래프 상에서 수신기 동작 특성 곡선의 꺾이는 현상이 발생한다.

그림 4는 그림 3의 분산 협력 대역 검출 기법의 성능을 검출 문턱값에 따른 오류 확률로 나타낸 그래프이다. 앞서 언급한 바와 같이 전체 오류 확률 그래프는 일정 구간에서 불룩한 형태를 가지며 식 (28)과 식 (29)을 통하여 알 수 있듯이 구간 내의 최솟값이 전체 오류 확률의 최솟값이 되며 그때의 문턱값 $\hat{\lambda}$ 는 각 분산 협력 대역 검출 기법의 성능을 최대화 하는 최적의 문턱값이 된다.

표 2에서 확인 할 수 있듯이 전체적으로 검출 가중치 α 의 값이 클수록 오류 확률은 감소하는 것을 알

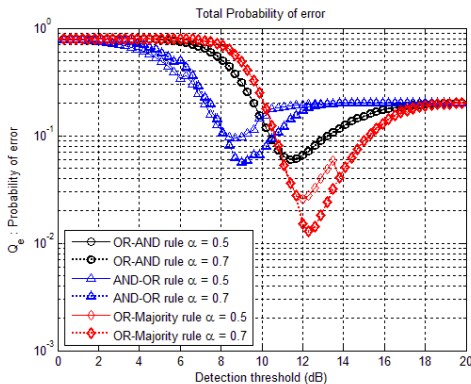


그림 4. 검출 문턱값에 따른 분산 협력 대역 검출의 전체 오류 확률
Fig. 4. Total error probability of decentralized cooperative spectrum sensing based on sensing threshold

표 2. 제안하는 검출 기법들의 성능 비교
Table 2. Performance comparison of proposed sensing scheme

| | | $\alpha = 0.5$ | $\alpha = 0.7$ |
|------------------|-----------------|----------------|----------------|
| OR-AND rule | $P_{e,total}$ | 0.0599 | 0.0599 |
| | $\hat{\lambda}$ | 11.4dB | 11.4dB |
| AND-OR rule | $P_{e,total}$ | 0.0945 | 0.0559 |
| | $\hat{\lambda}$ | 8.7dB | 9dB |
| OR-Majority rule | $P_{e,total}$ | 0.0255 | 0.0128 |
| | $\hat{\lambda}$ | 12dB | 12.3dB |

수 있다. 또한 각 대역 검출 기법의 최소 오류 확률과 최적의 문턱값을 알 수 있는데 인지 무선 기술 네트워크 환경에서 문턱값이 고정 되어 있다면 각 문턱값에서 최소 오류 확률을 가지는 분산 협력 대역 검출 기법을 선택하여 진행한다면 전체 대역 검출 확률의 성능은 그만큼 증가할 것이다.

VI. 결 론

이 논문에서는 인지 무선 기술 네트워크의 분산 협력 대역 검출 기법에서 각 집합 대표의 검출 환경을 고려하여 보고 오류가 낮은 k 명의 집합 대표를 참여시키는 분산 협력 대역 검출 기법을 제안하였다. 이는 1차적으로 집합 내에서의 협력 대역 검출을 진행하여 집합내의 검출 정보를 가지고 있는 집합 대표의 검출 정보를 융합하여 전체 검출 결과를 결정하는 분산 협력 대역 검출 환경에서 융합 센터로 보고하는 보고 채널의 오류 확률로 인한 성능의 제한을 완화하는 결과를 가져왔다. 여기에서는 융합 센터로 검출 결과를 전송하는 집합 대표의 수와 검출 확률 Q_d 로 이루어진 검출 효율식을 통한 검출 확률과 오 경보 확률의 문턱값을 설정하여 조건을 만족시키는 집합 대표만을 협력 검출에 참여시켜 신뢰도를 증가시킴으로 기존의 보고 오류 확률을 고려한 분산 협력 대역 검출 기법에서 발생하는 성능의 제한이 완화 되는 것을 확인하였다. 또한 검출 효율을 구성하는 요소 중 하나인 검출 가중치를 부여하도록 하여 사전에 설정된 가중치에 따라 검출 효율을 최대화 하는 협력 검출에 참여 집합 대표 수를 구하였다.

완화된 성능을 가지게 된 분산 협력 대역 검출 기법은 정해진 환경에서 가장 좋은 성능을 보이는 최적의 검출 문턱값이 있는데 이를 이용하여 검출 문턱값이 고정된 환경에서의 최적의 성능을 보이는 분산 협력 대역 검출 기법을 선택하여 사용할 수 있다. 또한 이 방법은 전송받은 집합 대표의 검출 정보가 담긴 신호의 신호 대 잡음비와 시간-대역폭 곱의 값만으로도 해당 검출 기법의 미 검출 확률과 오 경보 확률을 계산해 내어 전체 오류 확률의 값이 가장 작아지는 최적의 문턱값 $\hat{\lambda}$ 를 사전에 도출해낼 수 있다는 장점이 있으며 도출된 $\hat{\lambda}$ 의 값으로 대역 검출을 진행할 경우 그렇지 않은 경우보다 더 나은 성능을 기대할 수 있다. 또한 각 문턱값에 따라 최적의 성능을 가지는 융합 기법이 다르기 때문에 사전에 설정된 검출 문턱값을 가지고 있는 경우에도 유리할 것이다. 이상의 결과를 통

해 보고 오류는 분산 협력 대역 검출 기법의 성능에서 중요한 영향을 끼치는 요소임을 알 수 있었으며 제안 기법을 이용한 검출 기법의 성능 제한 완화를 통해 소비 데이터 통행량 감소와 저 전력 고효율 전송 방식 지향의 현대 무선 통신 시장에서의 적용에 큰 경쟁력을 가질 것으로 예상되며 향후 대역 검출 기법에서 사용되는 다양한 매개변수를 고려하는 새로운 대역 검출 기법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

References

- [1] J. Mitola, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in *Proc. IEEE Workshop on Mob. Multimedia Commun.*, pp. 3-10, San Diego, CA, Nov. 1999.
- [2] Y. Liang, Y. Zeng, E. C. Y. Peh, and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, Apr. 2008.
- [3] E. Biglieri, A. J. Goldsmith, L. J. Greenstein, N. B. Mandayam, and H. V. Poor, *Principles of Cognitive Radio*, Cambridge University Press, 2013.
- [4] A. M. Wyglinski, M. Nekovee, and Y. T. Hou, *Cognitive Radio Communications and Networks : Principles and Practice*, Academic Press, 2010.
- [5] R. Choe and Y. Byun, "User selection scheme for the performance improvement of the secondary system in cognitive radio systems using underlay mode," *J. KICS*, vol. 38A, no. 03, pp. 249-257, Mar. 2013.
- [6] H. Huang, Z. Zhang, P. Cheng, and P. Qui, "Opportunistic spectrum access in cognitive radio system employing cooperative spectrum sensing," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 1-5, Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [7] S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang, "Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 4, pp. 1232-1241, Apr. 2011.
- [8] S. Maleki, S. P. Chepuri, and G. Leus, "Energy and throughput efficient strategies for cooperative spectrum sensing in cognitive radios," in *Proc. IEEE Signal Processing Advances in Wirel. Commun.*, pp. 71-75, San Francisco, CA, Jun. 2011.
- [9] G. Ganesan and Y. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, part II: Multiuser networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 6, no. 6, pp. 2214-2222, Jun. 2007.
- [10] E. C. Y. Peh, Y. Liang, Y. L. Guan, and Y. Zeng, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with weighted decision fusion scheme," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 12, pp. 3838-3847, Dec. 2010.
- [11] K. Letaief and W. Zhang, "Cooperative communications for cognitive radio networks," in *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 878-893, May 2009.
- [12] N. Kim, "A cooperative spectrum sensing and dynamic spectrum decision methods for heterogeneous cognitive radio network," *J. KICS*, vol. 37A, no. 07, pp. 560-568, Jul. 2012.
- [13] W. Zhang, R. K. Mallik, and K. B. Letaief, "Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, no. 12, pp. 5761-5766, Dec. 2011.
- [14] S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang, *Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio*, Springer, 2014.
- [15] P. Elias, "Coding for two noisy channels," in *Proc. 3rd London Symp. Inf. Theory*, pp. 61-76, London, UK, 1955.
- [16] R. Choe and Y. Byun, "Or-rule based cooperative spectrum sensing scheme considering reporting error in cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 39A, no. 01, pp. 19-27, Jan. 2014.
- [17] N. Kim and Y. Byun, "The new decentralized cooperative spectrum sensing scheme in cognitive radio network systems," *The 24th Joint Conf. Commun. Inf.*, vol. 1, pp. 27, Yeosu, Korea, Apr. 2014.
- [18] N. Kim, J. Kim, and Y. Byun, "The new

decentralized cooperative spectrum sensing scheme to mitigate limited performance in cognitive radio networks,” *KICS Joint Conf. Summer*, vol. 1, no. 10D-3, pp. 44, Jeju Island, Korea, Jun. 2014.

- [19] N. Kim and Y. Byun, “The deducing optimal sensing threshold for decentralized cooperative spectrum sensing scheme in cognitive radio network systems,” *2013 Korea Signal Process. Conf.*, vol. 26, no. 1, pp. 97-101, Daejeon, Korea, Oct. 2013.

김 낙 균 (Nak-Kyun Kim)



2011년 2월 : 인천대학교 전자
공학과 졸업
2011년 3월~현재 : 인천대학교
전자 공학과 석사과정
<관심분야> Cognitive Radio,
디지털 통신 및 신호 처리

변 윤 식 (Youn-Shik Byun)



1978년 2월 : 연세대학교 전기
공학과 졸업
1981년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 석사
1985년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 박사
1990년 8월~1991년 7월 : 미국
Stanford대학 전자공학과 객원 교수
2004년 9월~2005년 : 8월 고려대학교 전파통신 공학
과 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