

비정규 잡음 환경에서 협력 무선인지 네트워크를 위한 순서 기반 스펙트럼 센싱 기법

조형원*, 이영포*, 윤석호°, 배석능**, 이광억**

An Order Statistic-Based Spectrum Sensing Scheme for Cooperative Cognitive Radio Networks in Non-Gaussian Noise Environments

Hyung-Weon Cho*, Youngpo Lee*, Seokho Yoon°, Suk-Neung Bae**, Kwang-Eog Lee**

요 약

본 논문에서는 비정규 충격성 잡음 환경에서 협력 무선인지 네트워크를 위한 순서 기반 스펙트럼 센싱 기법을 제안한다. 구체적으로는 잡음을 이변수 등방형 대칭 알파 안정 (bivariate isotropic symmetric α -stable) 분포를 따르는 것으로 모형화하고, 그에 알맞은 관측 샘플의 순서와 일반화된 우도비 검정 기반 협력 스펙트럼 센싱 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 비정규 잡음 환경에서 제안한 기법이 기존의 기법에 비해 더 좋은 스펙트럼 센싱 성능을 가짐을 보인다.

Key Words : cooperative spectrum sensing, non-Gaussian noise, order statistic, likelihood ratio test

ABSTRACT

In this paper, we propose a novel spectrum sensing scheme based on the order statistic for cooperative cognitive radio network in non-Gaussian noise environments. Specifically, we model the ambient noise as the bivariate isotropic symmetric α -stable random variable, and then, propose a cooperative spectrum sensing scheme based on the order of observations and the generalized likelihood ratio test. From numerical results, it is confirmed that the proposed scheme offers a substantial performance improvement over the conventional scheme in non-Gaussian noise environments.

I. 서 론

빠른 데이터 전송률에 대한 수요의 증가, 다양한 어플리케이션의 등장, 단말기 수의 폭발적인 증가 등으

로 인해 무선 통신에 있어 라디오 스펙트럼은 점점 희소성 있는 자원이 되어가고 있다^[1]. 그에 따라 스펙트럼 사용의 효율을 높이는 것에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 동적 스펙트럼 할당에 기반한 인지무

※ 본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2012R1A2A2A01045887), 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업(NIPA-2012-H0301-12-1005), 국방과학연구소 “국내의 주파수 관련 정책조사 및 적용 연구”과제의 일환으로 수행하였음.

• 주저자 : 삼성탈레스, hyungweon.cho@samsung.com, 정회원

° 교신저자 : 성균관대학교 정보통신대학, syoon@skku.edu, 종신회원

* 성균관대학교 정보통신대학, leeyp204@skku.edu, 정회원

** 국방과학연구소, bsnplus@add.re.kr, 정회원, kelee@add.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS2012-10-487, 접수일자 : 2012년 10월 9일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 12일

선 통신은 (cognitive radio: CR) 이러한 스펙트럼 부족 문제에 대한 해결책 중 하나로 크게 주목받고 있다^[2]. CR 시스템에서는 일차 사용자에게 (primary user: PU) 할당된 스펙트럼 대역에서, PU 신호가 존재하지 않을 때 CR이 PU에게 간섭을 주지 않으며 해당 스펙트럼 대역에서 통신하며, 이러한 CR의 효율적이고 유연한 운용을 위해서는 신뢰성 있는 스펙트럼 센싱 기술이 반드시 필요하다.

스펙트럼 센싱 기술들은 크게 동기 (coherent), 비동기 (non-coherent), 특징 (feature) 검파 방식으로 분류된다^[2,3]. 대부분의 경우 CR은 PU 신호의 전송 방식, 파일럿, 동기화 메시지 등에 대한 충분한 정보를 가지지 못하며, 그에 따라 PU 신호에 대한 정보를 필요로 하지 않는 비동기 센싱 기법들이 널리 이용되고 있다. 대표적으로는 에너지 검파가 전송 환경에 대한 최소의 정보만을 필요로 하면서 낮은 복잡도로 구현이 가능하기 때문에 스펙트럼 센싱 기술로 널리 이용되고 있다^[4].

반면, 페이딩 및 쉐도잉을 극복하기 위한 방식으로 협력 스펙트럼 센싱 (cooperative spectrum sensing: CSS) 기술이 등장하였다^[2,3]. CSS는 다수의 CR들 간의 스펙트럼 센싱 정보들을 (spectrum sensing information: SSI) 서로 공유하고 결합함으로써 공간적 다이버시티를 (diversity) 획득하여 페이딩 및 쉐도잉에 의한 효과를 보상한다. CR은 관심 스펙트럼 대역에 대해 PU 신호의 존재 여부를 판단한 것에 대한 정보인 SSI를 fusion center로 (FC) 전송하며, FC에서는 이들을 결합하여 PU 신호 존재 유무에 대한 최종 판단을 내린다. 지금까지 대부분의 CSS에 대한 연구에서는 잡음이 가우시안 (Gaussian) 분포를 따른다고 가정하고 진행되어 왔다. 그러나 실제 통신 환경에서는 이동 중인 차량, 전력선의 개폐 과도현상, 차량 점화, 해수면 반사파, 번개 등의 원인으로 인해 종종 충격성 비정규 잡음이 발생하며^[5], CR의 잡음 환경은 충격성 잡음 모형으로 모델링될 수 있다. 또한 CR 네트워크에서 각 CR마다 다른 잡음 환경을 겪을 수 있다.

본 논문에서는 잡음이 충격성 성분을 가질 수 있으며, 각 CR마다 잡음 환경이 다른 경우에 대하여, 하나의 FC와 다수의 CR로 구성된 CR 네트워크에 알맞은 CSS 기법을 제안한다. CR 네트워크에서는 CR과 FC 간의 control 채널이 존재하며, 전송 트래픽의 부담을 줄이기 위해 SSI는 각 CR의 판단 결과를 이진 값으로 표현하는 것을 가정한다. 제안한 기법은 충격성 비정규 잡음에 대한 영향을 줄이기 위해 관측 샘플들에 순

서 기반 비선형 함수를 적용하고 이를 일반화된 우도비 검정에 (generalized likelihood ratio test: GLRT) 적용한 검정 통계량을 도출하여 CSS에 적용하며, 모의실험을 통해 기존의 기법에 비해 더 좋은 스펙트럼 센싱 성능을 보임을 확인한다. 또한, FC에서 SSI를 결합함에 있어 다양한 counting rule을 적용하고, 모의실험을 통해 제안한 기법에 적합한 counting rule을 고른다.

이후 이 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 CR 네트워크 시스템 모형을 소개하고, III장에서는 제안한 검파기 및 결합 기법들을 설명한다. IV장에서는 다양한 비정규 잡음 환경에서의 모의실험 결과를 보이며, 마지막으로 V장에서 이 논문의 결론을 내린다.

II. 시스템 모형

하나의 FC와 M 개의 CR 사용자로 이루어진 CR 네트워크를 고려하면, m 번째 ($m = 1, 2, \dots, M$) CR의 n 번째 기저대역 샘플 $y_m(n) = y_{m,I}(n) + jy_{m,Q}(n)$ 은 PU 신호가 없을 때 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_m(n) = w_m(n), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

여기서 아래첨자 I 와 Q 는 각각 복소수의 in-phase와 quadrature 성분을 나타내고, N 은 관측 샘플 개수이며, $w_m(n)$ 은 $w_{m,I}(n) + jw_{m,Q}(n)$ 으로 표현되는 복소 가산성 잡음으로 m 과 n 에 대해 독립이라고 가정한다. PU 신호가 존재하는 경우 $y_m(n)$ 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_m(n) = h_m s(n) + w_m(n), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

여기서 $s(n) = s_I(n) + js_Q(n)$ 은 PU로부터 송신된 복소 신호의 n 번째 샘플을 나타내고, $h_m = h_{m,I}(n) + jh_{m,Q}(n)$ 은 복소 채널 계수로서 $\{h_m\}_{m=1}^M$ 은 모두 동일한 분포를 가지고 서로 독립이며, 스펙트럼 센싱 구간 동안 그 값이 변하지 않는다고 가정한다.

비정규 잡음은 널리 알려진 이변수 등방형 대칭 알파 안정 (bivariate isotropic symmetric α -stable: BIS α S) 분포를 따르는 것으로 모형화한다. BIS α S 분포의 확률 밀도 함수는 (probability density function: PDF) 아래와 같이 나타낼 수 있다^[6,7].

$$f_{BI}(u_1, u_2) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\left\{-j(u_1 t_1 + u_2 t_2) - \gamma(t_1^2 + t_2^2)^{\frac{\alpha}{2}}\right\}} dt_1 dt_2, \quad (3)$$

여기서 α 는 ($0 < \alpha \leq 2$) 특성 지수로서 (characteristic exponent) 그 값이 작을수록 PDF 양 끝의 두께가 더 두꺼워져 충격성 잡음 성분의 영향이 크고, γ 는 dispersion으로서 그 값이 클수록 PDF가 더 넓게 퍼져있음을 나타낸다. BIS α S는 $\alpha = 1, 2$ 인 경우에 대해서만 PDF가 닫힌꼴로 정리되는 것으로 널리 알려져 있으며, $\alpha = 1$ 일 때는 (3)의 PDF를 아래와 같이 이변수 코시 (bivariate Cauchy) 분포로 나타낼 수 있다.

$$f_{BC}(u_1, u_2) = \frac{\gamma}{2\pi(u_1^2 + u_2^2 + \gamma^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

또한 $\alpha = 2$ 인 경우에는 (3)의 PDF를 아래와 같이 이변수 가우시안 분포로 나타낼 수 있으며,

$$f_{BG}(u_1, u_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{u_1^2 + u_2^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

여기서 $\sigma^2 = 2\gamma$ 으로서 분산을 나타낸다.

III. 제안한 협력 스펙트럼 센싱 기법

비동기 스펙트럼 센싱은 낮은 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) 환경에서는 잡음 분산에 대한 정보 없이는 샘플 관측 구간을 무한대로 높여도 센싱 성능을 더 향상시킬 수 없으며, 이러한 현상을 SNR wall이라 한다^[8]. CR 네트워크에 참여하는 CR의 개수를 늘려 협력적으로 센싱을 수행하면 SNR wall 현상을 극복할 수 있으며^[9], 본 논문에서는 SNR wall에 대한 극복 방안을 다루는 것이 아니므로 잡음의 분포가 알려져 있다고 가정한다. 만약 PU 신호의 변조 방식, 펄스 형태, 패킷 형식 등의 정보가 CR에게 알려져 있다면 정합 필터 검파가 최적의 성능을 가진다^[10]. 그러나 실제로는 PU 신호에 대한 정보를 CR이 알고 있기 어려우므로 정합필터 대신 m 번째 CR에 대한 $h_m s(n)$ 의 최대우도 추정치를 (maximum likelihood estimate: MLE) 이용하는 GLRT를 이용할 수 있다.

CR 네트워크에서 스펙트럼 센싱 문제는 아래와 같이 이진 가설 검정 문제로 정리할 수 있으며, 귀무가설

H_0 과 대립가설 H_1 을 아래와 같이 정의한다.

$$H_0 : \text{PU의 스펙트럼이 비어 있다.} \quad (6)$$

$$H_1 : \text{PU의 스펙트럼이 점유되어 있다.} \quad (7)$$

가설 H_c ($c \in 0, 1$) 아래 관측 벡터 \underline{y}_m 에 대한 결합 PDF를 f_{H_c} 라 하면, m 번째 CR에서 GLRT 검정 통계량 $T_{GL}(\underline{y}_m)$ 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{GL}(\underline{y}_m) = \ln \left\{ \frac{f_{H_1}(\underline{y}_m)}{f_{H_0}(\underline{y}_m)} \right\} = \sum_{n=1}^N \ln \left\{ \frac{f_m(y_m(n) - h_m \widehat{s}(n))}{f_m(y_m(n))} \right\}, \quad (8)$$

여기서 $\ln(\cdot)$ 과 $\widehat{\cdot}$ 는 각각 자연로그와 MLE를 나타내고, f_m 은 $n = 1, 2, \dots, N$ 에 대해 $w_{m,I}(n)$ 과 $w_{m,Q}(n)$ 의 결합 PDF를 나타낸다. (8)의 자연로그 내의 분자 성분을 코시 잡음 및 가우시안 잡음에 대하여 다시 쓰면 각각 아래의 (9), (10)과 같이 나타낼 수 있으며, 유도 과정에서는 (4)와 (5)의 수식과 $f_m(x) = f_{BI}(\text{Re}(x), \text{Im}(x))$, $\gamma = \gamma_m$ 의 관계가 이용되었다.

$$f_m(y_m(n) - h_m \widehat{s}(n)) = \frac{\gamma_m}{2\pi \left\{ |y_m(n) - h_m \widehat{s}(n)|^2 + \gamma_m^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}, \quad (9)$$

$$f_m(y_m(n) - h_m \widehat{s}(n)) = \frac{1}{2\pi\sigma_m^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_m^2} |y_m(n) - h_m \widehat{s}(n)|^2\right\}, \quad (10)$$

여기서 $\text{Re}(x)$ 와 $\text{Im}(x)$ 는 각각 x 의 실수와 허수 부분을 나타내고, γ_m 과 σ_m^2 은 각각 m 번째 CR에 대한 코시 분포의 dispersion과 가우시안 분포의 분산을 나타낸다. 따라서 (9)와 (10)으로부터 아래와 같이 코시 및 가우시안 잡음 환경에서 $h_m s(n)$ 에 대한 MLE를 쉽게 얻을 수 있다.

$$h_m \widehat{s}(n) = y_m(n). \quad (11)$$

신호처리 분야에서는 비정규 잡음의 충격성 성분에 대한 영향을 줄이기 위한 방법으로 순서 통계량이 널리

이용되어 왔다. 이는 충격성 잡음 환경에서 큰 진폭을 가지는 관측 샘플은 신호 성분 보다는 잡음 성분에 의해 유래되는 경향이 있기 때문이며, 순서 통계량에 기반한 비선형 기법을 통해 작은 진폭을 가지는 관측 샘플들을 선별해 이용하는 접근 방식은 일반적으로 비정규 충격성 잡음 환경에서 모든 관측 샘플들을 이용하는 방식에 비해 더 좋은 성능을 보인다.

본 논문에서는 먼저 m 번째 CR의 관측 벡터 \underline{y}_m 에 대한 순서 통계량¹¹⁻¹³ $\{y_{m(1)}, y_{m(2)}, \dots, y_{m(N)}\}$ 을 생성하며, 여기서 순서 통계량들은 $|y_{m(1)}| \leq |y_{m(2)}| \leq \dots \leq |y_{m(N)}|$ 의 관계를 가진다. 이때, 크기가 작은 순서로 J_m 개의 관측 샘플들을 선택하고, 선택적 관측 샘플에 기반한 GLRT (GLRT based on selected observations: GSO) 검정 통계량을 아래와 같이 제안한다.

$$T_{GSO}(\underline{y}_m, J_m) = \sum_{l=1}^{J_m} \ln \left\{ \frac{f_m(\underline{y}_{m(l)} - \widehat{h}_m s(l))}{f_m(\underline{y}_{m(l)})} \right\} \quad (12)$$

여기서 J_m 은 m 번째 CR에서 선택되는 관측 샘플의 개수이고,

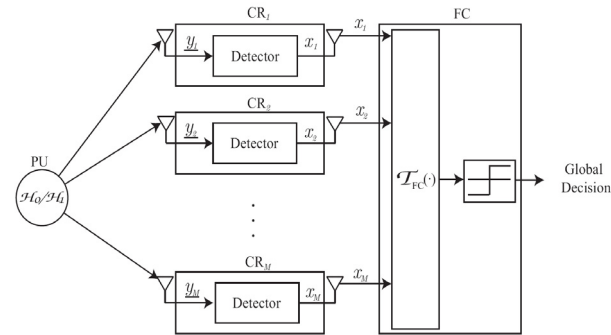


그림 1. CCRN에서 CSS 구조
Fig. 1. A schematic representation of the CSS in the CCRN.

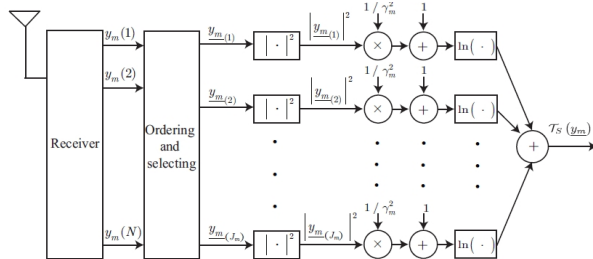


그림 2. 코시 잡음 환경에서 m 번째 CR의 검파기 블록도
Fig. 2. A block diagram of the detector for the m th CR under Cauchy noise circumstance.

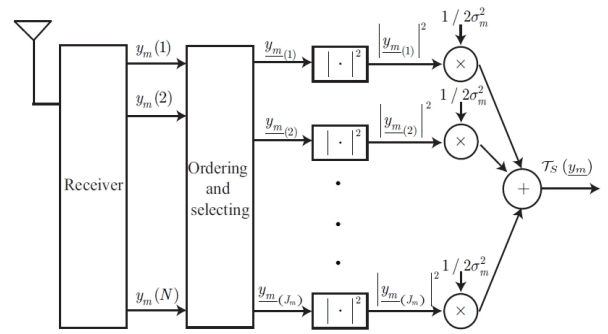


그림 3. 가우시안 잡음 환경에서 m 번째 CR의 검파기 블록도
Fig. 3. A block diagram of the detector for the m th CR under Gaussian noise circumstance.

$y_m(\bar{n}) = y_{m(l)}$ 을 만족하는 정수 \bar{n} 에 대해서 $\widehat{h}_m s(l) = h_m s(\bar{n})$ 이다. (8)-(12)에 따라 코시 및 가우시안 잡음 환경에서 아래와 같이 검정 통계량을 정의할 수 있다.

$$G_C(\underline{y}_m, k) = \sum_{l=1}^k \ln \left\{ 1 + \frac{|y_{m(l)}|^2}{\gamma_m^2} \right\} \quad (13)$$

$$G_G(\underline{y}_m, k) = \frac{1}{2\sigma_m^2} \sum_{l=1}^k |y_{m(l)}|^2 \quad (14)$$

여기서 $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ 이다. 또한 코시 잡음 환경에서 $T_{GL}(\underline{y}_m) = G_C(\underline{y}_m, N)$ 이고, $T_{GSO}(\underline{y}_m) = G_C(\underline{y}_m, J_m)$ 인 관계를 가지고, 가우시안 잡음 환경에서 $T_{GL}(\underline{y}_m) = G_G(\underline{y}_m, N)$ 이고, $T_{GSO}(\underline{y}_m) = G_G(\underline{y}_m, J_m)$ 인 관계를 가진다. GSO 검파를 통해 m 번째 CR의 이진 SSI값 x_m 을 아래와 같이 얻고 FC로 전송한다.

$$x_m = \begin{cases} 1, & \text{if } T_{GSO}(\underline{y}_m, J_m) \geq \lambda_m \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

여기서 $x_m = 0$ 은 스펙트럼이 비어있다는 것을 나타내고, $x_m = 1$ 은 스펙트럼이 점유되어 있음을 나타내며, λ_m 은 m 번째 CR에서 오경보 확률에 따른 문턱값을 나타낸다.

FC에서 M 개 SSI들의 집합 $\underline{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ 을 이용하여 FC의 검정 통계량 $T_{FC}(\underline{x})$ 를 생성한다. 생성 과정은 그림 1에서 나타내었으며, 코시 및 가우시안 잡음 환경에서의 검파기 구조를 각각 그림 2와 3에

서 나타내었다. 정리의 간편함을 위해 CR로부터 FC로 전송되는 SSI들은 오류 없이 전송된다고 가정하며, [2], [14]와 같이 counting rule을 통해 가설 검정을 수행한다. 구체적으로는 \underline{x} 내의 1의 개수를 세고, 이를 FC의 문턱값과 비교하며, 본 논문에서는 세 종류의 counting rule을 고려한다. 검정 통계량 $T_{FC}(\underline{x})$ 는 $T_{FC}(\underline{x}) = \sum_{m=1}^M x_m$ 로 구하고, 이를 통해 FC에서 아래와 같이 최종 결정을 내린다.

$$\begin{aligned}
 & H_1 \\
 T_{FC}(\underline{x}) & \underset{<}{\overset{\geq}{\geq}} \lambda_{FC} \\
 & H_0
 \end{aligned} \tag{16}$$

(16)의 문턱값 λ_{FC} 는 counting rule에 따라 다르며, or rule (OR), majority rule (MJ), and rule (AND) 각각에 대해서 1, $\lceil M/2 \rceil$, M 의 값을 가진다^[2,15]. 여기서 $\lceil x \rceil$ 는 x 보다 크거나 같은 가장 작은 정수를 나타낸다.

IV. 모의실험 결과

본 장에서는 $\alpha = 1, 1.5, 2$ 이고 $\gamma = 1$ 인 BIS α S 잡음 환경에서 GSO 검파기를 적용한 CSS 기법의 receiver operation characteristic (ROC) 성능을 분석한다. 채널 환경으로는 Rayleigh 페이딩 채널을 고려하였으며, 복소 채널 이득 $\{h_m\}_{m=1}^M$ 은 각 심볼 시간마다 변하며, $E[|h_m|^2] = 1$ 이라고 가정한다. 또한

신호 전력 $P_s = \sum_{n=1}^N |s(n)|^2$ 은 10이며, $s(1) = s(2) = \dots = s(N)$ 이고, $s_I(n) = s_Q(n)$ 이라 가정한다.

CSS 기법의 성능 분석에 앞서, GSO 검파기에 대한 J_m 값을 먼저 정한다. $M=1$ 으로 가정하고, $J_m = J$ ($J \in \{0.2N, 0.4N, \dots, N\}$)으로 표기하며 $G_C(\underline{y}_m, J)$ 와 $G_G(\underline{y}_m, J)$ 를 적용한 GSO 검파기를 각각 $GSO_C(J)$ 와 $GSO_G(J)$ 로 나타내었다. 이론적으로는 J_m 이 무한대의 값을 가질 수 있으나, 실용성을 위해 위와 같은 5개의 값을 고려하였다. 그림 4-6는 각각 $\alpha = 1, 1.5, 2$ 인 경우에 대하여 여러 J 와 N 값에 따른 ROC 성능을 나타내며, 여기서 P_F 와 P_M 은 각각 오경보 확률과 미검출 확률을 나타낸다. 그림들로부터

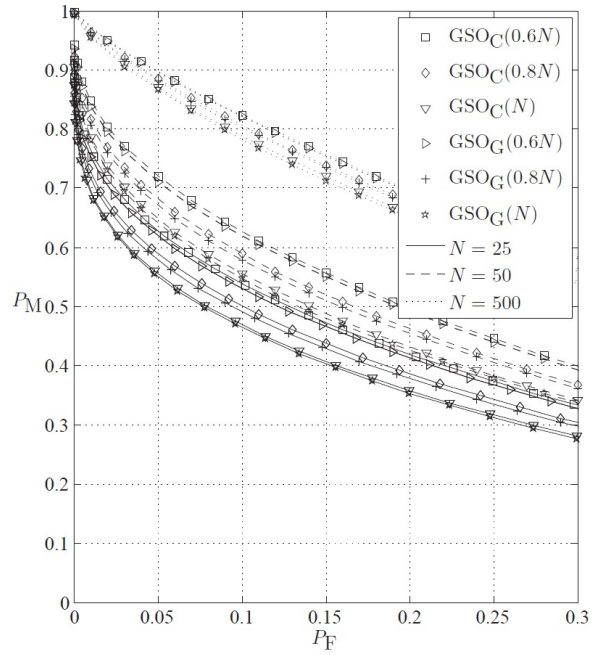


그림 4. $\alpha=2$ 인 BIS α S 잡음 환경에서 다양한 J 와 N 값에 따른 GSO 검파기들의 ROC 성능
Fig. 4. The ROCs of GSO detectors for various values of J and N in BIS α S noise with $\alpha=2$.

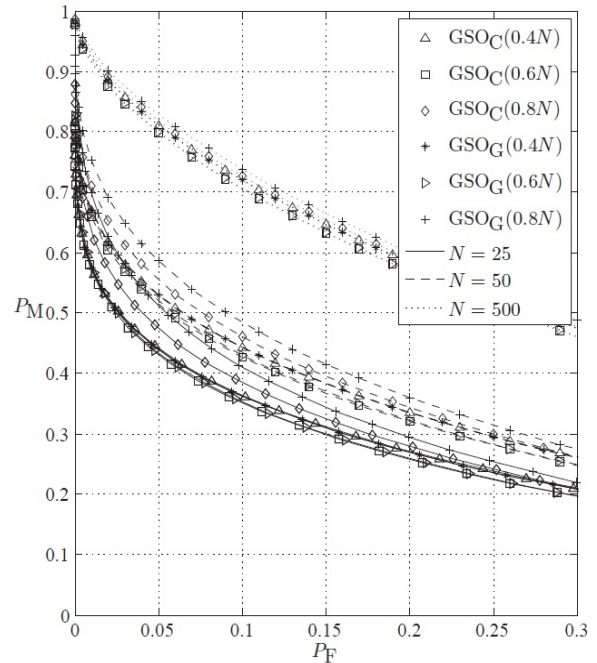


그림 5. $\alpha=1.5$ 인 BIS α S 잡음 환경에서 다양한 J 와 N 값에 따른 GSO 검파기들의 ROC 성능
Fig. 5. The ROCs of GSO detectors for various values of J and N in BIS α S noise with $\alpha=1.5$.

N 값이 작을수록 GSO의 성능이 좋아지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 N 값이 작아질수록 관측 샘플 당 신호 전력 P_s/N 값이 크기 때문이다. 또한 그림 4로부터가

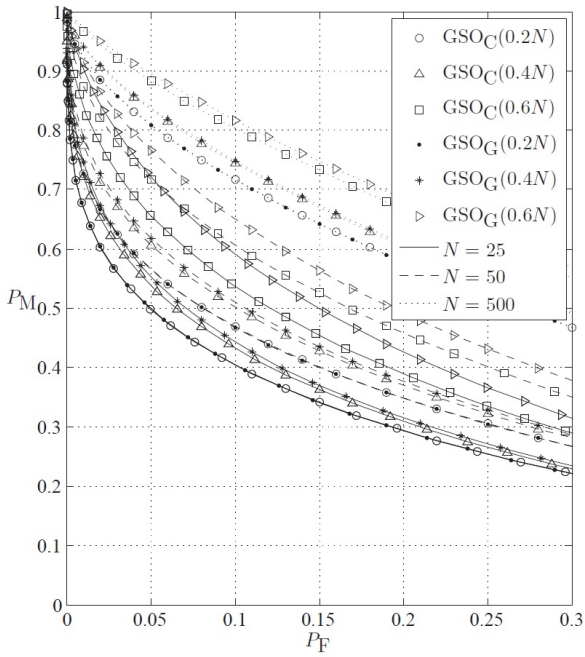


그림 6. $\alpha=1$ 인 BIS α S 잡음 환경에서 다양한 J 와 N 값에 따른 GSO 검파기들의 ROC 성능
 Fig. 6. The ROCs of GSO detectors for various values of J and N in BIS α S noise with $\alpha=1$.

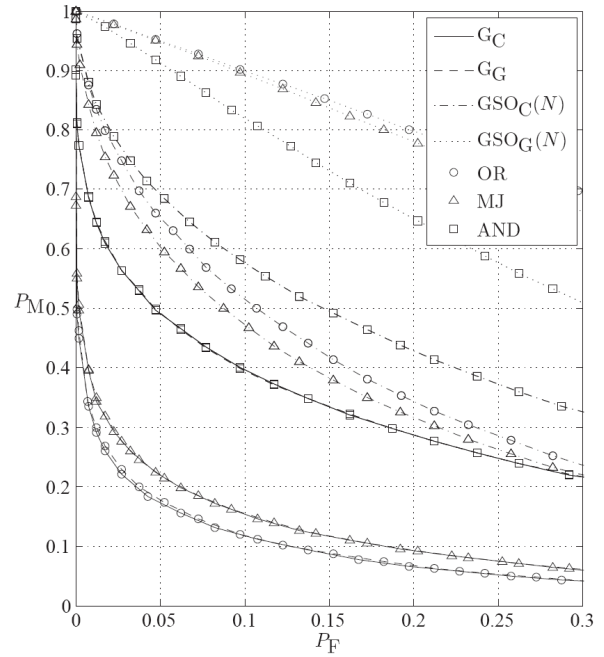


그림 8. 잡음 환경 2에서 counting rule에 따른 G_C , G_G , $GSO_C(N)$, $GSO_G(N)$ 기반 CSS 기법의 ROC 성능
 Fig. 8. The ROCs of CSS schemes based on G_C , G_G , $GSO_C(N)$, and $GSO_G(N)$ with three counting rules in noise environment 2.

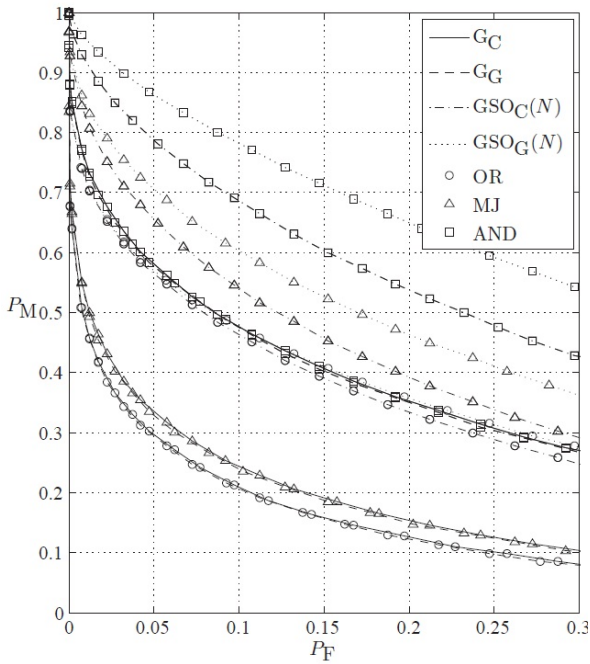


그림 7. 잡음 환경 1에서 counting rule에 따른 G_C , G_G , $GSO_C(N)$, $GSO_G(N)$ 기반 CSS 기법의 ROC 성능
 Fig. 7. The ROCs of CSS schemes based on G_C , G_G , $GSO_C(N)$, and $GSO_G(N)$ with three counting rules in noise environment 1.

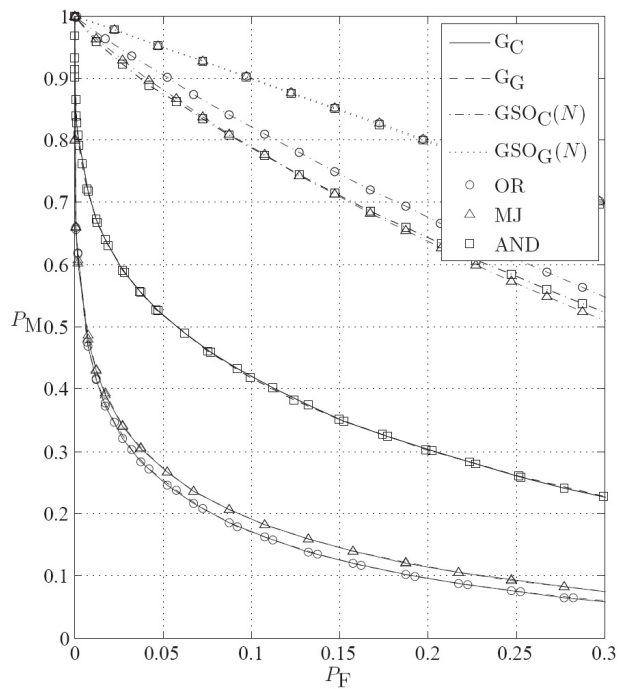


그림 9. 잡음 환경 3에서 counting rule에 따른 G_C , G_G , $GSO_C(N)$, $GSO_G(N)$ 기반 CSS 기법의 ROC 성능
 Fig. 9. The ROCs of CSS schemes based on G_C , G_G , $GSO_C(N)$, and $GSO_G(N)$ with three counting rules in noise environment 3.

우시안 잡음 환경에서는 J 값이 커질수록 ROC 성능이 더 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 5과 6으로부터 각각 $J=0.6N$ 과 $J=0.2N$ 을 적용한 GSO 검파기의 성능이 다른 경우보다 좋은 ROC 성능을 가짐을 알 수 있다. 즉, 잡음의 충격성이 강해질수록 작은 J 값을 가지는 경우의 성능이 더 좋게 나타난다. 표기의 편의를 위해 각각 $\alpha=1, 1.5, 2$ 에 대하여 $GSO_C(N), GSO_C(0.6N), GSO_C(0.2N)$ 을 G_C 로 표기하고, $GSO_G(N), GSO_G(0.6N), GSO_G(0.2N)$ 를

표 1. 잡음 환경 별 BISaS 분포의 α 값 설정
Table 1. The specifications (values of α) of noise environment

잡음 환경	첫 번째 CR	두 번째 CR	세 번째 CR	네 번째 CR
잡음 환경 1	2	2	1	1
잡음 환경 2	1.5	1.5	1.5	1.5
잡음 환경 3	1	1	1	1

G_G 로 표기하며, 이를 적용한 CSS의 성능을 GLRT 검파기인 $GSO_C(N), GSO_G(N)$ 를 적용한 CSS의 성능과 비교한다.

CSS의 성능을 비교하기 위하여 $M=4, N=50$ 으로 가정하였고, 문턱값 $\{\lambda_m\}_{m=1}^4$ 는 4개의 CR 모두 오경보 확률에 맞추어 동일한 값으로 설정하였다. 또한 성능 비교를 위하여 표 1과 같은 잡음 환경을 고려하였다. 잡음 환경 1에서 3으로 갈수록 더 많은 충격성 잡음 성분을 가지는 환경을 의미한다. 그림 7-9는 각각 잡음 환경 1, 잡음 환경 2, 잡음 환경 3에서 GSO 검파기와 GLRT 검파기의 ROC 성능을 나타낸다. 그림들로부터 G_C, G_G 를 적용한 CSS 기법이 GLRT인 $GSO_C(N), GSO_G(N)$ 를 적용한 CSS 기법에 비해 우수한 ROC 성능을 보임을 알 수 있다. 또한 더 많은 충격성 잡음 성분을 가지는 환경일수록 (즉, 잡음 환경 1에서 잡음 환경 3으로 갈수록) 제안한 기법과 기존 기법들과의 성능 차이가 더 커짐을 확인할 수 있다. 이러한 성능의 경향은 충격성 잡음 성분들이 많은 경우 매우 큰 진폭을 가지는 관측 샘플은 신호 대비 잡음의 크기가 매우 큰 잡음 성분으로 볼 수 있으며, 그에 따라 작은 진폭을 가지는 관측 샘플들을 이용하여 신호를 검파하는 제안한 기법이 충격성 잡음에 의한 큰 진폭을 가지는 관측 샘플들까지 이용하는 기존의 기법에 비해 더 좋은 검파 성능을 가진다는 것으

로 설명될 수 있다.

또한 G_C, G_G 를 적용하였을 때, OR, MJ, AND 세 종류의 counting rule 중 OR rule을 적용한 경우의 성능이 가장 우수하고 AND rule을 적용한 경우의 성능이 가장 나쁘게 나타남을 확인하였다. OR rule의 경우 CCRN을 구성하는 CR 중 하나라도 PU 신호를 검파하면 FC는 PU 신호가 존재한다고 판단하므로 개별 CR 중 일부가 PU 신호가 존재하는 것을 검파하지 못하더라도 FC에서는 PU 신호가 존재한다고 판단할 수 있어 미검출 확률이 낮으나, AND rule의 경우에는 모든 CR이 PU 신호가 존재한다고 판단해야만 FC에서 PU 신호를 검파할 수 있으므로 미검출 확률이 높다. 이러한 특성으로 인해 PU 신호에게 간섭을 미치지 않는 것이 매우 중요한 시스템에서는 AND rule을 적용하는 것이 적합하고, SU의 전송률을 높이는 것이 중요한 시스템에서는 OR rule을 통해 스펙트럼 센싱을 수행하는 것이 적합함을 알 수 있다.

널리 사용되는 비정규 잡음 모형으로는 대칭 알파 안정 분포 모형 이외에 가우시안 혼합 (Gaussian mixture) 잡음 모형이 있으며^[16], 그 PDF는 각기 다른 분산을 가지는 여러 가우시안 확률 변수의 PDF들이 가중치 합이 된 형태로 나타난다. 이러한 가우시안 혼합 잡음 모형 역시 비정규 잡음의 충격성 성분을 잘 묘사하며, 제안한 기법은 기존의 기법에 비해 비정규 충격성 잡음을 잘 극복할 수 있으므로 가우시안 혼합 잡음 환경에서도 충격성 잡음 성분이 많을수록 기존의 기법에 비해 더 좋은 성능을 보일 것으로 기대된다.

V. 결 론

본 논문에서는 충격성 비정규 잡음 환경에서 협력 CR을 위한 스펙트럼 센싱 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 협력 스펙트럼 센싱 방식은 관측 샘플의 순서 통계량 중 일부만을 선별하고, 이를 GLRT에 적용하여 검정 통계량을 생성한다. FC에서는 각 CR의 SSI를 수집하여 counting rule을 통해 최종 판단을 내린다. 모의실험 결과로부터 비정규 잡음 환경에서 제안한 기법이 기존의 기법에 비해 더 좋은 스펙트럼 센싱 성능을 보임을 확인하였으며, 잡음의 충격성 성분이 강할수록 검파기에서 이용하는 순서 통계량의 개수가 더 작을 때 스펙트럼 센싱 성능이 향상된다는 것을 확인하였다.

References

- [1] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Comm.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [2] T. Yücek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Comm. Surveys, Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, First Quarter 2009.
- [3] J. Lunden, V. Koivunen, A. Huttunen, and H. V. Poor, "Collaborative cyclostationary spectrum sensing for cognitive radio systems," *IEEE Tr. Signal Process.*, vol. 57, no. 11, pp. 4182-4195, Nov. 2009.
- [4] F. F. Digham, M. S. Alouini, and M. K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," *IEEE Tr. Comm.*, vol. 55, no. 1, pp. 21-24, Jan. 2007.
- [5] G. A. Tsihrintzis and C. L. Nikias, "Incoherent receivers in alpha-stable impulsive noise," *IEEE Tr. Signal Process.*, vol. 43, no. 9, pp. 2225-2229, Sep. 1995.
- [6] C. L. Nikias and M. Shao, *Signal Processing with Alpha-Stable Distributions and Applications*, 1st Ed. Wiley, 1995.
- [7] J. Park, C. Yu, and S. Yoon, "OFDM Frequency Offset Estimation Schemes Robust to the Non-Gaussian Noise(비정규 잡음에 강인한 OFDM 주파수 오프셋 추정 기법)," *J. Korea Inform. Commun. Society*, vol. 37A, no. 5, pp. 298-304, May 2012.
- [8] R. Tandra and A. Sahai, "SNR walls for signal detection," *IEEE J. Select. Topics Signal Process.*, vol. 2, no. 1, pp. 4-17, Feb. 2008.
- [9] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing," *J. Comm.*, vol. 2, no. 2, pp. 71-82, Mar. 2007.
- [10] B. Wang and K. J. R. Liu, "Advances in cognitive radio network: A survey," *IEEE J. Select. Topics Signal Process.*, vol. 5, no. 1, pp. 5-23, Feb. 2011.
- [11] J. Hajek, Z. Sidak, and P. K. Sen, *Theory of Rank Tests*, 2nd Ed. Academic, 1999.
- [12] H. A. David and H. N. Nagaraja, *Order Statistics*, 3rd Ed. Wiley, 2003.
- [13] I. Song, K. S. Kim, S. R. Park, and C. H. Park, *Principles of Random Processes*, 1st Ed. Kyobo, 2009.
- [14] P. K. Varshney, *Distributed Detection and Data Fusion*, 1st Ed. Springer-Verlag, 1996.
- [15] S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang, "Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Tr. Wireless Comm.*, vol. 10, no. 4, pp. 1232-1241, Apr. 2011.
- [16] J. Friedmann, E. Fishler, and H. Messer, "General asymptotic analysis of the generalized likelihood ratio test for a Gaussian point source under statistical or spatial mismodeling," *IEEE Tr. Signal Process.*, vol. 50, no. 11, pp. 2617-2631, Nov. 2002.

조 형 원 (Hyung-Weon Cho)



1992년 2월 광운대학교 전자
공재료학과 공학사
1994년 2월 광운대학교 전자
공재료학과 공학석사
2012년 2월 연세대학교 전기
전자공학과 공학박사
1997년 7월~현재 삼성탈레스

수석연구원

<관심분야> Military Communications, 통신 시스템
및 네트워크 설계 및 최적화

이 영 포 (Youngpo Lee)



2008년 2월 성균관대학교 정보
통신공학부 공학사
2010년 2월 성균관대학교 휴대
폰학과 공학석사
2010년 3월~현재 성균관대학
교 휴대폰학과 박사 과정
2008년 11월 한국통신학회 하

계종합학술발표회 우수논문상 수상

2009년 12월 IEEE Seoul Section Student Paper
Contest 대상 수상

2011년 4월 CTRQ 국제학술대회 Best Paper
Award 수상

2011년 12월 아이디스 전자신문 대학(원)생 과학
기술&IT 논문공모 대제전 최우수상 수상

<관심분야> 통신 이론, 이동통신, 통계학적 신호처리

윤 석 호 (Seokho Yoon)



1997년 2월 한국과학기술원 전
자전산학과 공학사 (최우등)
1999년 2월 한국과학기술원 전
자전산학과 공학석사
2002년 2월 한국과학기술원 전
자전산학과 공학박사
2002년 3월~2002년 6월 MIT

박사후 연구원

2002년 7월~2003년 2월 Harvard University 박사후
연구원

2003년 3월~현재 성균관대학교 정보통신대학 전자
전기공학부 전임강사, 조교수, 부교수

2007년 IEEE 준석학회원

2009년 한국통신학회 LG 학술상 수상

2011년 교육과학기술부 우수연구 인증패 수상

2012년 한국통신학회 우수논문상 수상

<관심분야> 통신 이론, 이동통신, 통계학적 신호처리

배 석 능 (Suk-Neung Bae)



2006년 2월 충남대학교 전자
전파정보통신 전공 공학사

2008년 2월 과학기술연합대학
원대학교 대전전자통신기술
공학석사

2008년 3월~현재 과학기술연
합대학원대학교 대전전자통

신기술 공학박사

<관심분야> Software Radio, Cognitive Radio, 대
전자전통신

이 광 역 (Kwang-Eog Lee)



1988년 2월 경북대학교 전자
공학과 학사

1990년 2월 경북대학교 대학
원 전자공학과 석사

1990년 3월~현재: 국방과학
연구소 책임연구원

<관심분야> 위성통신, 전술통신, 인지형/지능형 무
전기