

# 해양 인지 무선 네트워크에서 협력적 센싱 기법의 성능 평가

남 유진\*, 이 운동\*, 이 성로\*\*, 정 민아\*\*\*, 소재우°

## Performance Evaluation of Cooperative Spectrum Sensing in Maritime Cognitive Radio Networks

Yujin Nam\*, Yundong Lee\*, Seong Ro Lee\*\*, Min-a Jeong\*\*\*, Jaewoo So°

### 요약

본 논문은 해양 인지 무선 네트워크에서 제한된 피드백을 가지는 협력적 센싱 알고리즘을 제안하고, 제안하는 알고리즘을 기반으로 협력적 센싱 알고리즘의 성능을 평가한다. 제안하는 협력적 센싱 기법은 선박들이 사용 가능한 피드백 양이 제한된 환경에서 차순위 선박들이 문턱값을 기반으로 퓨전 선박에 피드백 여부를 결정하고, 퓨전 선박은 수신한 신호를 기반으로 채널 사용 가능 여부를 판단한다. 제안하는 협력적 센싱 기법은 피드백 오버헤드 감소를 목적으로 한다. 해양 인지 무선 네트워크 환경에서 문턱값 기반 협력적 센싱 알고리즘을 사용할 때 센싱 기법의 성능을 검출 확률과 차순위 선박 수에 따른 피드백 선박 수의 측면에서 평가한다. 모의실험을 통하여 제안하는 협력적 센싱 기법은 검출 확률이 다소 감소하나, 피드백 양이 크게 감소하는 것을 확인하였다.

**Key Words** : Maritime Cognitive Radio Network, Cooperative Spectrum Sensing, Performance Evaluation

### ABSTRACT

This paper proposes a cooperative spectrum sensing algorithm in a maritime cognitive radio network and evaluates the performance of proposed algorithm. In the proposed algorithm, the secondary ships decide whether to transmit the feedback information or not on the basis of the threshold when the number of available feedback information of the ships is limited. The fusion ship detects whether the channel is available or not on the basis of the feedback information. This paper evaluates the proposed algorithm in terms of the detection probability and the number of secondary ships that are fed back in the maritime cognitive radio network. The simulation results show the proposed algorithm significantly reduces the feedback overhead even though the detection probability is somewhat declined.

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2014-H0401-1 4-1009). 그리고 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음(12-911-01-109 / LTE 신규 대역 개발을 위한 협력적 센싱 및 DB 기반 주파수 공유 기술 연구).

◆ First Author : Department of Electronic Engineering, Sogang University, [hydralisk@sogang.ac.kr](mailto:hydralisk@sogang.ac.kr), 학생회원

° Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Sogang University, [jwso@sogang.ac.kr](mailto:jwso@sogang.ac.kr), 종신회원

\* LIG 넥스원 통신연구센터, [yundong.lee@lignex1.com](mailto:yundong.lee@lignex1.com)

\*\* Mokpo National University Department of Information & Electronics Engineering, [srlee@mokpo.ac.kr](mailto:srlee@mokpo.ac.kr), 정회원

\*\*\* Mokpo National University Department of Computer Engineering, [majung@mokpo.ac.kr](mailto:majung@mokpo.ac.kr), 정회원

논문번호 : KICS2014-10-401, Received October 8, 2014; Revised November 17, 2014; Accepted November 17, 2014

## I. 서 론

해양 네트워크에서 인지 무선 기술은 차순위 선박이 스펙트럼 센싱을 통해 주파수 사용을 허가 받은 선순위 선박이 사용하지 않는 주파수 채널을 기회적으로 사용함으로써 제한된 주파수 자원의 사용 효율을 높이는 기술이다<sup>1)</sup>. 따라서 해양 인지 무선 네트워크에서 차순위 선박은 선순위 선박의 통신을 보호하기 위해 선순위 선박의 주파수 사용 유무를 빠르고 정확하게 검출하기 위한 스펙트럼 센싱 기법이 필요하다<sup>2)</sup>.

스펙트럼 센싱 기법은 한 대의 차순위 선박이 스펙트럼 센싱을 수행하여 선순위 선박의 존재를 검출하는 단일 선박 스펙트럼 센싱 기법이 있다. 하지만, 해양 인지 무선 네트워크에서 차순위 선박은 불확실한 무선 환경에 있으므로, 신호의 부정확성이 높아지고, 채널의 변화에 취약하다. 이를 극복하기 위한 방식으로 다수의 차순위 선박 간 협력을 통해서 선순위 선박의 존재를 검출하는 협력적 스펙트럼 센싱 기법이 제안되었다<sup>3,4)</sup>.

협력적 스펙트럼 센싱 기법은 다수의 차순위 선박이 센싱한 결과를 퓨전 선박으로 피드백하고, 퓨전 선박에서는 피드백 받은 정보들을 취합하여 최종적으로 채널 내 선순위 선박의 존재 유무를 판별하는 방식으로 무선 채널에서의 공간 다이버시티 이득을 얻고, 단일 선박 스펙트럼 센싱 기법이 가지는 검출 성능을 보다 개선하였다<sup>5)</sup>.

협력적 스펙트럼 센싱 기법에서 센싱 정보를 취합하는 방식에 따라 하드 결합 방식과 소프트 결합 방식으로 구분할 수 있다<sup>6,7)</sup>. 하드 결합 방식에서 차순위 선박은 특정 문턱값 기준으로 스펙트럼 센싱 결과를 1비트로 표현하여 피드백한다<sup>8,9)</sup>. 반면, 소프트 결합 방식은 차순위 선박이 센싱한 에너지 레벨을 피드백하고, 퓨전 선박은 이를 기반으로 선순위 선박 존재 유무를 판단한다<sup>7)</sup>. 소프트 결합 방식에서 퓨전 선박은 Equal Gain Combining (EGC), Maximum Ratio Combining (MRC), Selection Combining (SC) 등의 방식으로 피드백 받은 센싱 정보를 취합한 후 최종적으로 선순위 선박의 존재 유무를 판별한다<sup>10-14)</sup>. 기존 연구에서 퓨전 선박에서 소프트 결합 방식의 EGC, MRC, SC 기반 취합 방식의 협력적 센싱 기법을 비교, 분석한 연구가 진행되었다<sup>15)</sup>. 소프트 결합 방식에서 신호 대 잡음비가 낮은 환경에서는 MRC, 신호 대 잡음비가 높은 환경에서는 EGC가 검출 성능이 뛰어나다. 또한, 소프트 결합 방식의 협력적 센싱 기법은

비교적 간단한 EGC 방식을 사용하여 센싱 정보를 취합하는 경우에도 하드 결합 방식에 비해 현저하게 검출 성능이 뛰어나다.

협력적 스펙트럼 센싱 기법 연구에서 검출 성능을 보다 향상시키기 위해 차순위 선박에 합산 가중치 부여 기법이 연구되었다. 각 차순위 선박의 개별적 검출 확률을 기반으로 스펙트럼 센싱 결과에 가중치를 부여하는 기법과 오경보 확률이 고정된 환경에서 검출 확률을 최대화하도록 최적 합산 가중치를 부여하는 기법이 연구되었다<sup>16-18)</sup>.

하지만, 소프트 결합 방식은 한 대의 차순위 선박이 피드백 하는 센싱 정보량이 매우 크고, 차순위 선박 수가 증가할 수록 피드백 하는 전체 정보량도 비례하여 증가하므로 전체 시스템의 채널 오버헤드가 크게 증가하는 문제점이 있다. 채널 오버헤드 감소를 위한 기법으로 다수 비트 양자화 방식의 협력적 스펙트럼 센싱 기법 등이 연구되었다<sup>19)</sup>.

하지만 선순위 선박과 퓨전 선박 사이의 데이터 전송 양과 퓨전 선박에서의 검출 성능은 트레이드 오프 관계가 발생하며, 피드백 정보량을 줄이기 위한 기존 연구는 피드백 정보량을 크게 감소시켰으나, 검출 성능 또한 크게 저하되는 문제점을 발생시켰다. 검출 성능이 크게 저하되는 문제를 해결하기 위해서, 검출 성능이 어느 수준 이상 보장되면서, 피드백 정보량을 크게 줄일 수 있는 새로운 협력적 센싱 기법의 연구가 요구된다.

따라서 본 논문은 소프트 결합 방식의 제한된 피드백을 가지는 협력적 센싱 기법을 제안한다. 제안하는 기법에서 차순위 선박이 특정 문턱값 이상의 크기로 선순위 선박의 신호 에너지를 센싱 하는 경우 퓨전 선박으로 센싱 정보를 피드백 한다. 또한 퓨전 선박에서는 검출 확률을 최대화하기 위한 합산 가중치를 계산하고 이를 반영한 피드백 합산 정보로 선순위 선박의 존재 유무를 판별한다. 성능 평가를 위해 피드백 정보량의 측면에서 문턱값에 따라 피드백 하는 선박 정보를 기존 협력적 센싱 기법과 비교 분석한다. 또한, 차순위 선박 수에 따른 검출 확률을 기존 협력적 센싱 기법과 비교 분석한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 시스템 모델에 대하여 설명한다. III장에서는 제안하는 협력적 스펙트럼 센싱 기법을 기술하고 IV장에서는 기존 기법과 제안하는 기법의 모의실험을 통해서 성능을 비교 및 분석한다. V장에서는 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 장에서는 해양 인지 무선 네트워크의 협력적 센싱 네트워크 모델에 대하여 기술 한다. 또한, 차순위 선박의 선순위 선박 신호 추정 모델과 퓨전 선박의 취합 기법에 대해서 설명하고, 마지막으로, 협력적 센싱 기법의 성능 척도에 대해서 설명한다.

### 2.1 선박 네트워크 모델

본 논문은 해양 네트워크에서 차순위 선박이 에너지 검출 방식을 사용하여 하나의 채널을 센싱하여 선순위 선박의 신호를 검출하는 해양 인지 무선 네트워크를 고려한다. 그림 1은 해양 인지 무선 네트워크에서 다수의 차순위 선박이 스펙트럼 센싱 기법을 사용해서 선순위 선박의 존재 유무를 검출하는 협력적 센싱 기법의 시스템 모델을 보여준다.

총  $M$  대의 차순위 선박이 선순위 선박의 채널 별 신호를 스펙트럼 센싱하며, 스펙트럼 센싱 정보를 퓨전 선박으로 피드백 한다고 가정한다. 이 때, 각 차순위 선박은 스펙트럼 센싱을 수행하기 위해  $N$  개의 샘플을 사용하며, 센싱한 샘플의 정보를 퓨전 선박에 피드백 하는 소프트 결합 방식을 사용한다. 퓨전 선박에서는 차순위 선박들이 피드백 한 센싱 정보를 취합 알고리즘에 따라 최적의 가중치를 부여해 합산하며 최종적으로 채널 내 선순위 선박의 존재 유무를 판단한다.

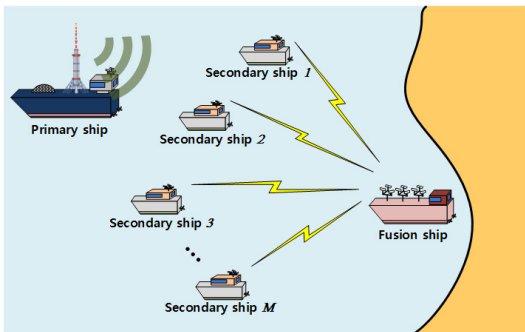


그림 1. 협력적 스펙트럼 센싱 시스템 모델  
Fig. 1. Cooperative spectrum sensing system model

### 2.2 협력적 스펙트럼 센싱 기법

#### 2.2.1 선순위 선박 신호 추정 기법

$M$  명의 차순위 선박 중,  $i$  번째 차순위 선박의 가설 테스트는 수식 (1)과 같다.

$$Y_i = \begin{cases} x_i(n) = v_i(n), & H_0 \\ x_i(n) = \sqrt{\alpha L_i} s_i(n) + v_i(n), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $Y_i$ 는  $i$  번째 차순위 선박이 관측한 에너지 크기이다.  $H_0$ 과  $H_1$ 은 선순위 선박이 존재하지 않는 경우와 선순위 선박이 존재하는 경우를 의미하며,  $x_i(n)$ 는  $i$  번째 차순위 선박의  $n$  번째 샘플 신호 크기이다.  $v_i(n)$ 은 평균이 0, 분산이  $\sigma^2$ 인 AWGN (Addictive White Gaussian Noise)이다.  $\alpha$ 는 선순위 선박의 송신 전력,  $L_i$ 은 해양 환경에서 경로 손실 계수이다. 또한,  $s_i(n)$ 은  $i$  번째 선순위 선박의  $n$  번째 신호 크기이며, 레일리 페이딩 채널 모델을 따른다고 가정한다. 그리고 서로 다른  $i$ 와  $n$ 에 관해서  $s_i(n)$ 은 서로 독립이라고 가정하였다. 본 논문에서는 모든 차순위 선박이  $N$ 개의 동일한 샘플을 사용하여 센싱한다고 가정하며, 선순위 선박과 차순위 선박 간 거리는 모두 동일하다고 가정한다.  $i$  번째 차순위 선박의 신호 크기 집합을 다음과 같이 정의한다.  $\mathbf{x}_i = [x_i(1) \ x_i(2) \ \dots \ x_i(N)]^T$ . 이 때,  $i$  번째 차순위 선박에 대한  $N$ 개 샘플의 평균 신호에너지는 수식 (2)와 같다.

$$u_i = \frac{1}{N} \mathbf{x}_i^H \mathbf{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (2)$$

여기서 선순위 선박의 송신 신호 총 에너지는 변하지 않으며, 따라서  $u_i$ 는 즉각적인 채널 이득의 크기이다. 만약, 차순위 선박의 센싱 결과, 선순위 선박 신호가 존재하지 않으면,  $Y_i$ 는  $N$  자유도를 가지는 집중 카이 스퀘어 분포를 따르고, 선순위 선박 신호가 존재하면,  $Y_i$ 는  $N$  자유도를 가지는 비집중 카이 스퀘어 분포를 따르며, 비중심성 파라미터  $\theta_i = Nu_i$ 를 가지며 수식 (3)과 같다.

$$Y_i \sim \begin{cases} \chi_N^2 & H_0 \\ \chi_N^2(\theta_i), & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

퓨전 선박에서 합산 가중치 계수를 고려한 차순위 선박들의 센싱 에너지 합은 수식 (4)와 같다.

$$Y = \sum_{i=1}^M w_i x_i \quad (4)$$

여기서  $w_i$ 는  $i$ 번째 차순위 선박의 합산 가중치 계수이다.

### 2.2.2 퓨전 선박의 취합 기법

퓨전 선박에서는 차순위 선박이 센싱한 에너지 크기를 기반으로 선순위 선박 존재 유무를 판단한다. 퓨전 선박에서 피드백 받은 센싱 정보를 취합하는 방식에는 EGC, MRC의 취합 기법을 사용한다.

#### (1) EGC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법

EGC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법에서 퓨전 선박이 차순위 선박들로부터 피드백 받은 센싱 정보를 취합 시, 각 차순위 선박에 모두 같은 가중치를 부여한다. EGC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법의 퓨전 선박에서 센싱 정보의 합은 수식 (5)와 같다<sup>[13]</sup>.

$$Y^{EGC} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (5)$$

여기서  $M$ 은 차순위 선박의 수이고,  $x_i$ 는  $i$ 번째 차순위 선박이 센싱한 신호의 평균 에너지 크기이다.

#### (2) MRC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법

MRC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법은 퓨전 선박에서 각 차순위 선박이 피드백 한 센싱 정보의 가중치 합이 검출 확률을 최대화하도록 가중치를 부여한다. MRC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법의 퓨전 선박에서 센싱 정보 합은 수식 (6)과 같다<sup>[20]</sup>.

$$Y^{MRC} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M w_i^* x_i \quad (6)$$

여기서  $w_i^*$ 는  $i$ 번째 차순위 선박에 부여하는 최적 합산 가중치이며, 수식 (7)로 결정한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^* &= \operatorname{argmax}_{\mathbf{w}} P_d(\mathbf{w} | \mathbf{x}) \\ \text{s.t. } & 0 \leq w_i \leq 1, \quad \forall w_i \in \mathbf{w} \\ & w_1^2 + \dots + w_M^2 = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{w} = [w_1 w_2 \dots w_M]$ 는 각 차순위 선박에 부여된 합산 가중치를 나타낸다.

### 2.2.3 협력적 센싱 알고리즘의 성능 척도

소프트 결합 방식의 협력적 스펙트럼 센싱 기법에

서 센싱 성능은 선순위 선박이 존재할 때 ( $H_1$ ), 선순위 선박이 존재한다고 판단하는 검출 확률 ( $P_d$ )과 선순위 선박이 존재하지 않을 때 ( $H_0$ ), 존재한다고 판단하는 오경보 확률( $P_{fa}$ ) 두 종류로 평가한다. 검출 확률과 오경보 확률은 각각 수식 (8)과 (9)와 같다<sup>[17]</sup>.

$$P_{fa} = \Pr(Y > \lambda_{th} | H_0) = Q \left( \frac{\lambda_{th} - N \sum_{i=1}^M \beta_i}{\sqrt{2N \sum_{i=1}^M \beta_i^2}} \right) \quad (8)$$

$$P_d = \Pr(Y > \lambda_{th} | H_1) = Q \left( \frac{\lambda_{th} - N \sum_{i=1}^M \beta_i (1 + x_i)}{\sqrt{2N \sum_{i=1}^M \beta_i^2 (1 + 2x_i)}} \right) \quad (9)$$

여기서  $Y$ 는 퓨전 선박에서 수신한 스펙트럼 센싱 정보에 합산 가중치를 고려한 에너지 총합,  $\lambda_{th}$ 는 센싱 판단을 위한 검출 문턱값을 의미하며,  $Q(x)$ 와  $\beta_i$ 는 각각 수식 (10)과 수식 (11)과 같다.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (10)$$

$$\beta_i = \frac{w_i}{\sqrt{\sum_{k=1}^M w_k^2}} \quad (11)$$

그리고  $P_{fa}$ 가 고정된 환경에서, 식 (8)과 식 (9)를 결합하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[21]</sup>.

$$P_d = Q \left( \frac{Q^{-1}(P_{fa}) \sqrt{\sum_{i=1}^M w_i^2} - \sqrt{\frac{N}{2}} \sum_{i=1}^M w_i x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^M w_i^2 (1 + 2x_i)}} \right) \quad (12)$$

## III. 제한된 피드백 기반 협력적 센싱 기법

협력적 스펙트럼 센싱 기법의 피드백 오버헤드를 줄이기 위한 방법으로 문턱값 기반 피드백 방식이 적용된 협력적 스펙트럼 센싱 기법을 제안하고, 제안하는 기법의 평균 검출 확률을 수식적으로 도출한다. 제안하는 문턱값 기반 제한된 피드백을 가지는 협력적

스펙트럼 센싱 기법이 적용된 네트워크 모델은 그림 2에 나타났다.

$M$  대의 차순위 선박들은 각각 에너지 검출 방식으로 선순위 선박 신호를 스펙트럼 센싱하고, 센싱한 신호의 평균 에너지를 계산한다. 그리고 이 평균 에너지를 정해진 특정 문턱값과 비교하여 문턱값 이상일 경우 퓨전 선박으로 피드백 하고, 문턱값을 넘지 않을 경우, 피드백 하지 않는다. 퓨전 선박에서는 EGC 또는 MRC 취합 기법을 통해 신호 에너지를 합산하고 검출 문턱값과 비교하여 최종적으로 선순위 선박의 존재 여부를 결정한다.

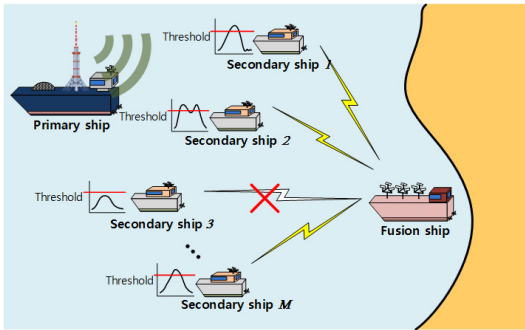


그림 2. 문턱값 기반 협력적 스펙트럼 센싱 시스템 모델  
Fig. 2. Cooperative spectrum sensing system model on the basis of the threshold

### 3.1 문턱값 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법

제안하는 문턱값 기반 협력적 센싱 기법은 스펙트럼 센싱한 평균 신호 크기가 문턱값( $u_{th}$ )을 넘는 차순위 선박만 퓨전 선박으로 피드백 하도록 한다. 이 때, 총  $M$  대의 차순위 선박 중 스펙트럼 센싱한 평균 신호 크기가 문턱값을 넘는 차순위 선박이 하나도 존재하지 않는 경우 퓨전 선박으로 피드백 되는 센싱 정보가 하나도 없으므로, 퓨전 선박에서는 센싱 정보를 합하여서 선순위 선박의 존재 여부판단이 불가능하다. 이를 방지하기 위해서 차순위 선박이 센싱한 신호 크기가 문턱값을 넘지 못하더라도 특정 확률( $p_{feedback}$ )로 차순위 선박이 퓨전 선박에게 피드백 하도록 한다.

제안하는 문턱값 기반 피드백 방식 협력적 스펙트럼 센싱 기법은 EGC 방식과 MRC 방식 두 종류로 제안하며, 알고리즘의 의사코드는 표 1과 같다.

### 3.2 제안 기법의 평균 검출 확률

제안하는 문턱값 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법에서 총  $M$  대의 차순위 선박 중,  $m$  대의 선박이 문턱값 이상의 센싱 평균 신호 크기를 가지고 피드백 하는

표 1. 제안하는 협력적 스펙트럼 센싱 기법의 의사코드  
Table 1. Pseudocode for proposed cooperative spectrum sensing scheme

Algorithm 1. A proposed Algorithm on the basis of the feedback threshold:

```

1: INPUT
2: The number of secondary ships;  $M$ 
3: The number of sampling of secondary ships;  $N$ 
4: The reference false alarm probability;  $P_{fa}$ 
5: The signal power of primary ship detected by the secondary ships;  $\mathbf{x} = [x_1 x_2 \dots x_M]$ 

6: INITIALIZE
7: The existence state of primary ship;  $H = H_0$ 
8: The threshold for feedback;  $u_{th}$ 
9: The threshold for state decision of primary ship;  $\lambda_{th}$ 
10: The list of feedback ship;  $\mathbf{S} = [ ]$ 

11: FEEDBACK SHIP DECISION
12: for  $i=1$  to  $M$ 
13:   if  $x_i > u_{th}$ 
14:      $\mathbf{S} = [\mathbf{S} \ x_i]$ 
15:   elseif  $rand() < p_{feedback}$ 
16:      $\mathbf{S} = [\mathbf{S} \ x_i]$ 
17:   end
18: end

19: PRIMARY SHIP STATE DECISION
20: if EGC &  $Y^{EGC} > \lambda_{th}$ 
21:    $H = H_1$ 
24 elseif MRC &  $Y^{MRC} > \lambda_{th}$ 
22:    $H = H_1$ 
23: end

24: return  $H$ 
    
```

경우, 퓨전 선박에서 평균 검출확률  $E[P_d^{th}]$ 는 수식 (13)과 같다.

$$E[P_d^{th}] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M P_{D_m} \cdot \Pr(P(S)=m) \quad (13)$$

식 (13)에서  $P_{D_m}$ 은  $m$ 명의 차순위 선박들의 평균 검출 확률로써, 수식 (14)와 같다.

$$P_{D_m} = \int_0^\infty \int_0^\infty \dots \int_0^\infty P_d(\mathbf{w}^* | \mathbf{x}) \cdot p(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (14)$$

그리고 식 (13)에서  $P(S)$ 는 문턱값 이상인 차순위

선박 수이고,  $\Pr(P(S)=m)$ 는 문턱값 이상인 차순위 선박 수가  $m$ 명일 확률이며, 수식 (15)와 같다.

$$\Pr(P(S)=m) = \binom{M}{m} (1 - P_x(u_{th}))^m (P_x(u_{th}))^{M-m} \quad (15)$$

결과적으로, 문턱값 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법의 평균 검출 확률은 식 (16)과 같다.

$$E[P_d^{th}] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M P_{D_m} \cdot \Pr(P(S)=m) \\ = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ \left( \int_0^\infty \int_0^\infty \dots \int_0^\infty P_d(\mathbf{w}^* | \mathbf{x}) p(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \right) \times \binom{M}{m} (1 - P_x(u_{th}))^m (P_x(u_{th}))^{M-m} \right\}. \quad (16)$$

#### IV. 모의실험 결과

기존 협력적 스펙트럼 센싱 기법과 제안하는 제한된 피드백 환경 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법의 성능을 비교 및 분석하기 위해 구성한 모의 실험 환경에 대해 설명하고, 기존 기법과 제안하는 기법에 따른 성능 결과와 분석을 기술한다.

우선 모의실험 수행을 위해 사용된 파라미터 값을 정리하고, 모의실험 수행 시나리오에 대해서 설명한다. 성능 분석에서는 기존 기법을 사용하는 경우와 제안하는 기법을 사용하는 경우를 피드백 오버헤드 측면에서 피드백 하는 선박 수로 비교 및 분석하고, 검출 성능 측면에서 평균 검출 확률 결과로 비교 및 분석한다.

##### 4.1 모의실험 환경

차순위 선박  $M$  이 1대에서 15대 사이인 경우에 대해 모의실험을 수행하였고, 차순위 선박의 센싱 샘플 수  $N$  은 50으로 고정하였다.  $m$  번째 차순위 선박이 센싱한 선순위 선박의 신호 크기  $x_m$  은 레일리 분포로 발생시켰다. 센싱 신호의 평균 크기는 -15 dB, 오경보 확률  $P_{fa}$  는 5%로 고정하였다. 센싱 판단을 위한

표 2. 모의실험 파라미터  
Table 2. Simulation parameters

Parameters	Value
The number of sensing sample	50
Distribution of sensing signal	rayleigh
Mean of sensing signal	-15 dB
Reference of false alarm	5 %
Frame length	2000 frames

문턱값  $\lambda_{th}$  와 피드백 결정 문턱값  $u_{th}$  는 동일한 값으로 하며, -5dB, -10dB, -15dB인 경우에 대해서 모의실험을 수행하였다. 총 모의실험 시간은 2000 프레임 동안 수행하였다. 모의실험을 위해서 설정한 파라미터 값은 표 2와 같다.

##### 4.2 성능 평가 및 분석

그림 3은 제안하는 기법에서 문턱값에 따른 피드백 차순위 선박 수 결과이다. 차순위 선박 수가 10 대일 때, 피드백 결정 문턱값이 각 -15dB, -10dB, -5dB로 증가하면, 피드백 하는 차순위 선박 수가 각 3.68대, 2.03대, 0.81대로써 각 63.19%, 79.66%, 91.87% 씩 감소한다. 이는 문턱값이 증가하면 문턱값을 넘는 선박 수의 확률이 감소하기 때문이다. 또한 피드백 결정 문턱값이 -10dB일 때, 차순위 선박수가 각 5대, 10 대, 15대로 증가하면 피드백 하는 차순위 선박 수가 각 1.05대, 2.03대, 3.02대로써 기존 기법 대비 각 79.03%, 79.66%, 79.87% 씩 오버헤드가 감소한다.

그림 4는 EGC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법에서 문턱값에 따른 검출 확률 결과이다. 차순위 선박 수가 10 대일 때, 피드백 결정 문턱값이 각 -15dB, -10dB, -5dB로 증가하면, 검출 확률은 각 90.03%, 78.97%, 44.06%로써 검출 확률이 각 -1.12%, 11.24%, 50.56% 씩 감소한다. 이는 문턱값이 증가하면 문턱값을 넘는 선박 수의 확률이 감소해서 선순위 선박 존재 여부 결정을 위한 정보량이 감소하기 때문이다. 또한 피드백 결정 문턱값이 -10dB일 때, 차순위 선박수가 각 5대, 10 대, 15대로 증가하면, 검출 확률은 각 56.09%, 78.97%, 89.98%로써 기존 기법 대비 각 18.84%, 11.24%, 5.23% 씩 검출 확률이 감소

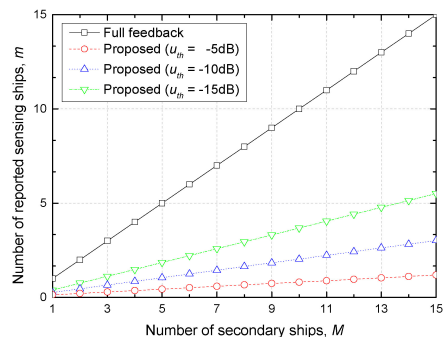


그림 3. 차순위 선박 수에 따른 피드백 차순위 선박 수  
Fig. 3. The number of reported sensing ships according to the number of secondary ships

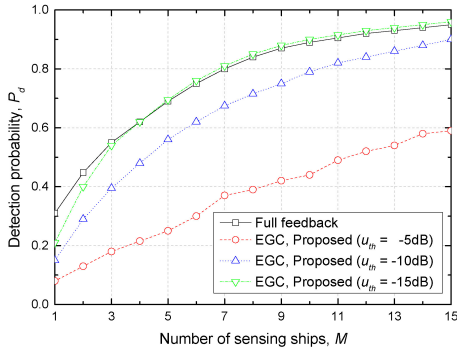


그림 4. EGC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법에서 차순위 선박 수에 따른 검출 확률  
 Fig. 4. The detection probability of cooperative spectrum sensing on the basis of the EGC according to the secondary ships

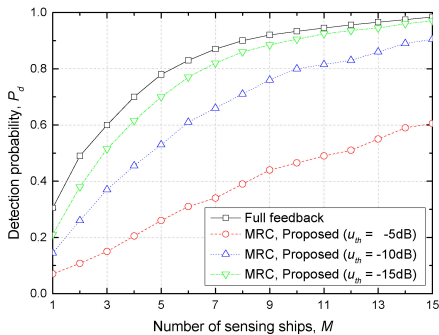


그림 5. MRC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법에서 차순위 선박 수에 따른 검출 확률  
 Fig. 5. The detection probability of cooperative spectrum sensing on the basis of the MRC according to the secondary ships

한다. 결과적으로, 차순위 선박 수가 증가하면 검출 확률 성능 하락 폭이 감소한다.

그림 5는 MRC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법에서 문턱값에 따른 검출 확률 결과이다. EGC 기반 협력적 스펙트럼 센싱 기법과 동일한 이유로, 차순위 선박 수가 10 대일 때, 피드백 결정 문턱값이 각 -15dB, -10dB, -5dB로 증가하면, 검출 확률은 각 90.51%, 80.00%, 46.54%로써 검출 확률이 각 3.00%, 14.26%, 50.16% 씩 감소한다. 또한 피드백 결정 문턱값이 -10dB일 때, 차순위 선박수가 각 5대, 10 대, 15대로 증가하면, 검출 확률은 각 53.09%, 80.00%, 89.56%로써 기존 기법 대비 각 32.05%, 14.26%, 8.03% 씩 검출 확률이 감소한다. MRC 기법이 최적의 합산 기중치를 사용하므로, 제안하는 기법을 사용하는 경우 검출 확률 성능 하락 폭이 다소 증가했다.

## V. 결론

본 논문에서는 해양 인지 무선 네트워크에서 협력적 스펙트럼 센싱 기법에서 시스템 채널 오버헤드를 감소시키기 위한 연구를 수행하였다. 특히, 문턱값 기반의 제한된 피드백을 가지는 협력적 스펙트럼 센싱 기법을 제안하고 평균 검출 확률을 도출하였다. 모의 실험을 통하여 기존 기법과 제안하는 기법의 피드백 하는 차순위 선박 수와 평균 검출 확률을 문턱값의 변화에 따라 비교 및 분석하였다. 제안하는 협력적 스펙트럼 센싱 기법의 검출 확률은 소폭 감소한 반면, 피드백 하는 차순위 선박 수는 대폭 감소하였다. 특히, 차순위 선박 수가 증가 할수록, 기존 기법과 제안하는 기법의 검출 성능차이는 감소하는 반면 피드백 정보량 차이는 증가하였다. 따라서 차순위 선박 수가 충분히 많을 때, 제안하는 협력적 스펙트럼 센싱 기법을 사용하면 검출 성능의 저하를 최소화 하면서 채널 오버헤드 증가 문제를 해결할 수 있다.

## References

- [1] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [2] H. Cho, Y. Lee, S. Yun, S. Bae, and K. Lee, "An order statistic-based spectrum sensing scheme for cooperative cognitive radio networks in non-gaussian noise environments," *J. KICS*, vol. 37, no. 11, pp. 943-951, Nov. 2012.
- [3] R. A. Roshid, N. M. Aripin, N. Faisal, S. H. S. Ariffin, and S. K. S. Yusof, "Integration of cooperative sensing and transmission," *IEEE Trans. Veh. Technol. Mag.*, vol. 5, no. 3, pp. 46-53, Sept. 2010.
- [4] G. Ganesan and Y. Li, "Agility improvement through cooperative diversity in cognitive radio," in *Proc. Global Telecommun.*, vol. 5, pp. 2505-2509, Nov. 2005.
- [5] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," in *Proc. IEEE Int. Symp. New Frontiers DySPAN*, pp. 131-136, Nov. 2005.



- [6] F. Suratman and A. Zoubir, "Collaborative spectrum sensing in cognitive radio using hard decision combining with quality information," in *Proc. IEEE Statistical Sig. Process. Workshop (SSP)*, pp. 377-380, Jun. 2011.
- [7] W. Han, J. Li, Z. Li, J. Si, and Y. Zhang, "Efficient soft decision fusion rule in cooperative spectrum sensing," *IEEE Trans. Sig. Process.*, vol. 61, no. 8, pp. 1931-1943, Apr. 2013.
- [8] D. Oh, H. Lee, and Y. Lee, "Linear hard decision combining for cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 1-5, Sept. 2010.
- [9] R. Choi and Y. Byeon, "Or-rule based cooperative spectrum sensing scheme considering reporting error in cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 29, no. 1, pp. 19-27, Jan. 2010.
- [10] M. Derakhshani and T. Le-Ngoc, "Aggregate interference and capacity-outage analysis in a cognitive radio network," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 196-207, Jan. 2012.
- [11] K. Choi, E. Hossain, and D. Kim, "Cooperative spectrum sensing under a random geometric primary user network model," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 6, pp. 1932-1944, Jun. 2010.
- [12] O. Biggelaar, J. Dricot, P. Doncker, and F. Horlin, "New combination scheme for cooperative spectrum sensing under imperfect control channels," in *Proc. IEEE Int. Symp. Pers., Indoor and Mob. Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 968-973, Sept. 2012.
- [13] S. Althunibat, S. Narayanan, M. Renzo, and F. Granelli, "On the energy consumption of the decision-fusion rules in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE Int. Workshop on Comput. Aided Modeling and Design of Commun. Links and Netw. (CAMAD)*, pp. 125-129, Sept. 2012.
- [14] G. Li, A. Cano, and S. Zhu, "High-diversity cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE Globecom*, pp. 1-5, Dec. 2010.
- [15] Q. Qin, Z. Zhimin, and G. Caili, "A study of data fusion and decision algorithms based on cooperative spectrum sensing," in *Proc. Int. Conf. Fuzzy Syst. and Knowledge Discovery*, pp. 76-80, Aug. 2009.
- [16] S. Lee and J. Kim, "Optimal hard decision for cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems," *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.*, vol. 22, no. 4, pp. 416-422, Apr. 2011.
- [17] J. Ma and Y. Li, "Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio network," in *Proc. IEEE Globecom*, pp. 3139-3143, Nov. 2007.
- [18] N. Kim, "A cooperative spectrum sensing and dynamic spectrum decision methods for heterogeneous cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 7, pp. 560-568, Jul. 2012.
- [19] P. Kaligineedi and V. Bhargava, "Sensor allocation and quantization schemes for multi-band cognitive radio cooperative sensing system," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 1, Jan. 2011.
- [20] P. Kaligineedi and V. Bhargava, "Distributed detection of primary signals in fading channels for cognitive radio networks," in *Proc. IEEE Globecom*, pp. 1-5, Nov. 2008.
- [21] N. Han and H. Li, "Cooperative spectrum sensing with location information," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 7, pp. 3015-3024, Sept. 2012.

남 유 진 (Yujin Nam)



2009년 2월: 서강대학교 전자공학과 학사

2012년 2월: 서강대학교 전자공학과 석사

2012년 3월~현재: 서강대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> 공간다중분할시스템, 다중안테나시스템, 차량통신, 인지무선통신



**이 윤 동 (Yundong Lee)**



2012년 2월 : 서강대학교 전자공학과 학사  
2014년 2월 : 서강대학교 전자공학과 석사  
2014년 1월~현재 : LIG 넥스원 통신연구센터 연구원  
<관심분야> 인지무선통신, 무선자원관리

**이 성 로 (Seong Ro Lee)**



1987년 2월 : 고려대학교 전자공학과 공학사  
1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사  
1996년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사  
1997년 9월~현재 : 목포대학교 공과대학 정보전자공학과 교수  
<관심분야> 디지털통신시스템, 이동 및 위성통신시스템, USN/텔레미틱스응용분야, 임베디드시스템

**정 민 아 (Min-a Jeong)**



1992년 2월 : 전남대학교 이학사  
1994년 2월 : 전남대학교 이학석사  
2002년 2월 : 전남대학교 이학박사  
2002년 4월~2003년 2월 : 광주과학기술원정보통신공학과 Post-Doc  
2003년 4월~2005년 2월 : 전남대학교 전자통신기술연구소 Post-Doc  
2011년 9월~2013년 2월 : Cleveland Clinic Research  
2005년 3월~현재 : 목포대학교 컴퓨터공학과 부교수  
<관심분야> 데이터베이스/데이터마이닝, 생체인식시스템, 무선통신응용분야, 임베디드시스템

**소 재 우 (Jaewoo So)**



1997년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사  
1999년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사  
2002년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사  
2001년~2005년 : 아이피원, 책임연구원 / 수석연구원  
2005년~2007년 : 삼성전자, 책임연구원  
2007년~2008년 : Stanford University, 전기공학과 박사후연구원  
2008년~현재 : 서강대학교 전자공학과 부교수  
<관심분야> 무선자원관리, 소형셀/멀티셀, 다중안테나시스템, 인지무선통신, 방송통신융합