

# 협력 검출확률 하한 기반의 협력 센싱 파라미터 최적화

최재각<sup>°</sup>, 서명환<sup>\*</sup>, 음수빈<sup>\*\*</sup>, 최증원<sup>\*\*</sup>, 한철희<sup>\*</sup>

## Cooperative Sensing Parameter Optimization Based on the Infimum of Cooperative Detection Probability

Jae-Kark Choi<sup>°</sup>, Myunghwan Seo<sup>\*</sup>, Soobin Um<sup>\*\*</sup>, Jeung Won Choi<sup>\*\*</sup>, Chulhee Han<sup>\*</sup>

### 요 약

실제의 인지무선 네트워크에서는 동일한 주사용자 신호에 대해서도 부사용자들의 검출확률이 상이한 것이 일반적이다. 그러나 각 부사용자의 검출확률을 동일한 것으로 간주하는 기존의 방식은 주사용자 보호를 위한 검출확률 요구조건이 만족되지 않을 수 있다. 본 논문에서는 협력 검출확률 하한을 기반으로 하는 주사용자 보호 요구조건을 정의하고, 이에 기반한 협력센싱 파라미터 최적화 문제를 전개하였다. 또한 참여중인 부사용자의 수가 변화하는 환경에 대응하기 위해, 센싱 파라미터의 가변 범위에 따라 적응적 검출임계값과 고정적 검출임계값을 적용하는 방식을 제시하였다. 성능분석에서는 제시된 방안들이 검출확률로 정의되는 주사용자 보호 요구조건을 보장할 수 있으며, 부사용자 수가 변화하는 환경에서도 네트워크 처리량의 변화를 최소화할 수 있음을 보였다.

**Key Words** : sensing-throughput tradeoff, cooperative detection probability, cooperative sensing, sensing parameter, detection threshold

### ABSTRACT

In practical cognitive radio networks, secondary users at different locations may achieve different probability of detection in general. However, most conventional approaches consider the probability of detection of every secondary user as identical, and thus the protection of primary users would not be satisfied in terms of the probability of detection. In this paper, the infimum of the probability of cooperative detection is suggested as the requirement for protection of primary users and the sensing parameter optimization problem is reformulated based on it. In addition, the adaptive and fixed detection thresholds are provided to cope with the change in the number of secondary users during network operation. Through performance evaluation, we show that the proposed schemes not only guarantee the protection of primary users in terms of the cooperative detection probability, but also induce minimal change in network throughput even when the number of cooperative users varies.

### I. 서 론

인지무선(cognitive radio)은 기존에 할당된 주파수

대역이 사용되지 않고 있을 때 이를 기회적으로 사용함으로써 주파수 효율을 높이는 기술이다. 인지무선 네트워크는 주파수에 대한 독점적 사용권을 부여받지

<sup>°</sup> First and Corresponding Author : Communication·EW Team, Hanwha Systems, jaekark.choi@hanwha.com, 정회원

<sup>\*</sup> Communication·EW Team, Hanwha Systems, {myunghwan.seo, chulhee.han}@hanwha.com, 정회원

<sup>\*\*</sup> Agency for Defense Development, {sbum1989, jwchoi}@add.re.kr, 정회원

논문번호 : 202012-318-A-RN, Received December 18, 2020; Revised January 6, 2021; Accepted January 10, 2021

않은 부사용자들로 구성된 네트워크로서, 부사용자들은 센싱을 통해 검출한 유희대역을 활용하여 통신을 수행한다.

부사용자의 센싱 방법의 하나인 에너지 검출 방식(energy detection)은 주사용자 신호에 대한 사전 정보가 불필요하고 수신기 구조가 간단하기 때문에 기존 연구들에서 자주 인용되고 있다. 에너지 검출 방식은 주사용자가 존재할 때, 이를 검출로 판정하는 주사용자 검출확률과 주사용자가 존재하지 않을 때, 이를 검출로 판정하는 오경보확률로 그 성능을 평가하는데, 주사용자 검출확률이 높을수록 주사용자 보호성능이 우수하고, 오경보확률이 낮을수록 부사용자에 의한 주파수 재사용으로 주파수 사용 효율이 높아진다. 높은 수준의 주사용자 검출확률 달성을 목표로 하는 경우, 오경보확률 또한 높게 형성되며, 주사용자 검출확률 증가와 오경보확률 감소를 동시에 달성하고자 하는 경우, 센싱 기간이 증가하기 때문에, 일반적으로 주사용자 보호성능과 네트워크 처리량 간에는 tradeoff가 존재한다.

협력센싱(cooperative sensing)은 다수의 부사용자들의 센싱 결과를 활용하는 센싱 방식으로, 특히, 부사용자들이 공간적으로 분산되어 분포하는 환경에서 주사용자 신호 검출 시 음영지역을 극복하는 등 주사용자 검출 성능을 더욱 향상시킬 수 있다<sup>11</sup>. IEEE 802.22에서는 in-band 센싱 시 다수의 CPE(Consumer Premise Equipments)들에 의한 협력센싱을 fast-sensing 단계에서 적용하고 있는데<sup>12</sup>, 이는 협력센싱이 적용된 대표적 사례라 할 수 있으며, 이 밖에도 무선 센서 네트워크와 MANET(Mobile Ad-hoc Network)을 비롯한 다양한 분야에서 협력센싱은 신뢰성 있는 유희대역 확보 및 주사용자 검출 방안으로 광범위하게 활용될 수 있다.

협력센싱을 수행하는 시스템에 요구되는 센싱 성능이 주어지는 경우, 이를 달성하기 위한 센싱 기간과 검출 임계값 등의 센싱 파라미터 설계가 가능하다<sup>13</sup>. 기존의 협력센싱 연구들은 부사용자들 각각에서의 로컬 검출확률이 동일한 경우를 가정하는 경우가 일반적이다<sup>3-5</sup>. 그러나, 부사용자들이 공간적으로 산재되어 분포하는 실제의 환경에서는 각 부사용자 위치에서 주사용자 신호에 대한 수신세기의 차이가 발생하며, 이로 인해 동일한 주사용자 신호에 대해서도 검출확률이 상이할 가능성이 매우 높다. 이를 고려하여, 기존 연구에서는 각 부사용자의 평균 received primary SNR을 기준으로 최적의 검출임계값을 선택하는 최적화 방식<sup>6</sup>, 주사용자와 각 부사용자 간의 거

리정보를 기반으로 센싱 결과 융합 시 가중치를 적용하는 방안<sup>7</sup> 등을 제안하였다. 그러나 이들 방법들은 인지무선 사용자 혹은 주사용자가 이동하는 환경에서 SNR 값 및 주사용자와의 거리 정보가 수시로 변화하여 적용이 어려울 수 있다. 또한, 기존의 협력 센싱은 센싱에 참여하는 부사용자의 수가 고정된 상황을 다루는 경우가 대부분이다<sup>3-5</sup>. 이들 연구들에서 제안한 방식을 그대로 적용하는 경우, 현재 협력 센싱에 참여한 부사용자의 수에 따라 센싱 기간과 검출임계값을 그때마다 갱신하여 동적으로 조정하는 방법을 고려할 수 있으나, 이는 센싱 기간 조정에 대한 네트워크 차원의 공유 및 변경된 센싱 기간의 적용과 관련한 quiet period<sup>8</sup>의 동기화 보장이 전제되어야 한다.

본 논문에서는 초기에 결정된 센싱 기간의 변경이 보장되지 않는 시스템에서 부사용자들 간의 센싱 성능 차이를 고려하여 주사용자 검출 요구조건을 만족하도록 하는 협력 검출확률 하한(infimum) 조건 기반의 센싱 파라미터 최적화 방안을 전개한다. 또한, 협력 센싱에 참여하는 부사용자 수가 변화하는 환경에서 검출임계값을 적응적으로 변화시키거나 고정된 검출임계값을 사용하는 경우, 네트워크 처리량의 변화를 최소화하는 방안을 제시하였다.

본 논문의 2장에서는 기존 협력 센싱파라미터 최적화 관련 연구 및 제약사항을 기술하고, 3장에서는 협력 검출확률 하한 조건 기반의 협력 센싱파라미터 최적화 방안과 적응적 및 고정적 검출임계값 적용 방안을 제시하며, 4장에서는 제안된 방안의 성능을 분석하고, 끝으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 기존 협력 센싱 파라미터 최적화

### 2.1 시스템 모델

본 논문에서는 동일 주파수를 사용하는  $n$ 개의 부사용자들로 구성된 인지무선 네트워크를 고려한다. 모든 부사용자들은 시간적으로 동기화되어 센싱 기간 동안 개별적 로컬 센싱을 수행하며, 부사용자들 중 하나는 융합센터(fusion center)로서 나머지 부사용자들의 검출 결과 보고를 이용하여 OR-rule 기반 협력센싱(즉, 적어도 하나의 부사용자로부터 주사용자 검출 보고를 수신 시, 융합센터는 최종적으로 주사용자가 존재하는 것으로 판정)을 수행한다. 협력 센싱에 의해 주사용자가 존재하지 않는 것으로 판정되는 경우, 부사용자들은 다음 센싱 기간 전까지 데이터 전송을 수행할 수 있다.

인지무선 네트워크는 그림 1과 같이 매 기간  $T$  마

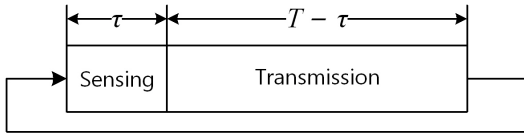


그림 1. 센싱-전송 프레임 구조  
Fig. 1. Sensing-transmission frame structure

다  $\tau$ 에 해당하는 센싱 기간을 갖는 프레임 구조로 운용된다.  $T$ 는 사전에 고정적으로 주어진 값이며,  $\tau$ 는 최적화를 통해 도출해야하는 설계 값으로서 부사용자 시스템에 적용 후 변경이 불가능한 것으로 간주한다. 센싱 기간  $\tau$ 는 주사용자 신호를 센싱하기 위해 배타적으로 할당된 시간으로서, 모든 부사용자들의 송신이 제한되는 quiet period이다.

부사용자의 센싱 방식은 주사용자 신호에 대한 사전 정보가 불필요하고 수신기 구조가 간단한 이점을 갖는 에너지 검출 방식을 고려한다. 에너지 검출 방식에 의한 검출 확률과 오경보 확률은 센싱 기간  $\tau$ 와 검출 임계값  $\delta$ 의 함수로 정의할 수 있는데, 잡음 샘플은 평균이 0이고 분산이  $\sigma_u^2$ 인 가우시안 분포를 따르고, 주사용자 신호 샘플은 잡음 샘플과 독립적으로 평균이 0이고 분산이  $\sigma_s^2$ 인 분포를 따른다고 가정할 때), 임의의 부사용자의 로컬 검출확률  $p_d(\tau, \delta)$ 와 로컬 오경보확률  $p_f(\tau, \delta)$ 는 다음과 같다<sup>31)</sup>.

$$p_d(\tau, \delta) = Q\left(\frac{\delta}{\sigma_u^2} - \gamma - 1\right) \sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma + 1}} \quad (1)$$

$$p_f(\tau, \delta) = Q\left(\frac{\delta}{\sigma_u^2} - 1\right) \sqrt{\tau f_s} \quad (2)$$

위에서  $f_s$ 는 샘플링율(sampling rate)을,  $Q(\cdot)$ 는 Q-function을 의미하며,  $\gamma(= \sigma_s^2/\sigma_u^2)$ 는 주사용자 신호에 대한 SNR을 나타낸다.

### 2.2 기존의 협력 센싱 파라미터 최적화

인지무선 네트워크에서 부사용자의 센싱 성능은 검출확률과 오경보확률을 기반으로 평가된다. 검출확률

이 높을수록 부사용자의 전송에서 비롯되는 간섭이 줄어들게 되어 주사용자를 보다 적극적으로 보호할 수 있지만, 그러기 위해서는 보다 긴 센싱 기간  $\tau$ 가 요구되는 것이 일반적이며, 그에 따라 데이터 전송 기간  $(T - \tau)$ 의 감소로 네트워크 처리량이 감소하는 tradeoff 관계가 성립된다. 기존의 연구들 중에는 협력 센싱 시 각 부사용자의 채널별 센싱 정확도와 피드백 채널의 상태를 고려하여, 센싱 결과 보고에 의한 오버헤드를 추가로 고려한 tradeoff를 연구하는 경우도 있으나<sup>9,10)</sup>, 본 논문에서는 간결한 전개를 위해 이를 고려하지 않는다. 인지무선 네트워크의 요구사항은 일반적으로 검출확률과 오경보확률을 기준으로 정의되는데, 본 논문에서는 주사용자 보호를 위한 요구 검출확률  $\bar{Q}_d$ 를 최소한 만족시키는 범위 내에서, 네트워크 처리량을 극대화하는 센싱 파라미터 최적화 문제를 다룬다<sup>3,4)</sup>.

요구 검출확률은 검출을 목표로 하는 주사용자 신호에 대한 SNR을 기준으로 정의되며, 이는 수식 (1)의  $\gamma$ 에 적용된다. 따라서, 본 논문의 센싱 파라미터 최적화 문제는  $T$ 가 주어진 환경에서, 검출 목표인 SNR  $\bar{\gamma}$ 로 수신되는 주사용자 신호를 적어도 요구 검출확률  $\bar{Q}_d$  이상의 확률로 검출하는 것을 제약조건으로 하고 있다. 이러한 맥락에서  $n$ 개의 부사용자에 의한 협력 센싱을 고려한 최적화 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & \max_{\tau, \delta} R(\tau, \delta), \\ & \text{s.t.}, \quad Q_d(\tau, \delta) \geq \bar{Q}_d, \\ & \text{where } R(\tau, \delta) = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) (1 - Q_f(\tau, \delta)). \end{aligned} \quad (3)$$

$R(\tau, \delta)$ 는 주사용자 신호가 존재하지 않는 경우 달성 가능한 정규화 처리량(normalized throughput)을,  $Q_d(\tau, \delta)$ 와  $Q_f(\tau, \delta)$ 는 각각 센싱 기간  $\tau$ 와 검출임계값  $\delta$ 에 의한 협력센싱 시 검출확률과 오경보확률을 의미한다. 주사용자가 존재하지 않는 잡음 환경에서  $i$ 번째 부사용자의 로컬 오경보확률을  $p_{f,i}(\tau, \delta)$ 라 할 때, 모든 부사용자들은 동일한 로컬 오경보확률  $p_f(\tau, \delta)$ 를 가지므로, OR-rule 기반의 협력 오경보확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_f(\tau, \delta) &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{f,i}(\tau, \delta)) \\ &= 1 - (1 - p_f(\tau, \delta))^n \end{aligned} \quad (4)$$

1) 본 논문에서는 [3]과 동일하게, 잡음 샘플은 i.i.d. (independent and identically distributed) 조건의 랜덤변수로서 CSCG(circularly symmetric complex Gaussian)를 가정하고, 주사용자 신호 샘플은 잡음 샘플과 독립적으로 i.i.d. 조건의 랜덤변수로서 complex-valued PSK(Phase Shift Keying) 신호를 가정한다.

기존 연구에서는 부사용자의 센싱 시, 주사용자 신호에 대한 SNR이 동일한 환경을 가정하는 경우가 대부분이며, 그에 따라 부사용자들 간에 동일한 로컬 검출확률  $p_d(\tau, \delta)$ 가 간주되어, 수식 (5)와 같이 정의된 협력 검출확률을 사용하였다.<sup>2)</sup>

$$Q_d(\tau, \delta) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{d,i}(\tau, \delta)) \quad (5)$$

$$= 1 - (1 - p_d(\tau, \delta))^n$$

### 2.3 기존 최적화의 문제점

수식 (3)-(5)의 최적화 문제는 협력센싱에 참여하는 부사용자들이 모두 동일한  $\gamma$ 로 주사용자 신호를 수신하는 것을 가정하고 있으나, 실제에서는 공간상에 분포하는 부사용자들의 위치와 지형 및 채널 환경으로 인해, 각 부사용자들에 도달하는 주사용자 신호 세기가 상이한 경우가 일반적이다<sup>3)</sup>. 또한, 주사용자 및 부사용자의 이동성을 추가로 고려하면, 각 부사용자들에서의 SNR 값은 수시로 변화할 수 있다. 따라서,  $\gamma < \bar{\gamma}$ 인 부사용자가 존재하게 되면  $\bar{Q}_d$ 의 요구조건이 충족될 수 없는 상황이 발생할 수 있다. 기존 연구에서는 주사용자 신호에 대한 SNR이 부사용자별로 상이한 환경에서, 부사용자들 각각이 상이한 검출임계값을 갖도록 하는 최적화 방식을 제시하거나<sup>4)</sup>, 부사용자와 주사용자의 거리를 기반으로 각 부사용자의 센싱 결과에 가중치를 적용하는 방식으로 센싱 성능을 향상시키는 방안이 제시된 바 있다<sup>5)</sup>. 그러나, 이러한 연구들은 SNR 추정을 위한 주사용자 신호에 대한 사전 정보 혹은 주사용자와의 거리 정보 획득을 위한 부가적인 수단을 요구한다.

또한, 전장환경과 같이 노드 간 링크 연결 불안정성이 높은 네트워크 환경에서는 부사용자 노드의 (재)가입과 탈퇴가 빈번하게 발생할 수 있기 때문에  $n$  값이 수시로 변화할 수 있다. 특히,  $n$  값이 감소하는 경우에는  $Q_d(\tau, \delta)$  역시 감소하기 때문에,  $\bar{Q}_d$ 의 요구조건을 만족시키기 어렵게 된다. 이러한 경우, 변경된  $n$ 을 이용하여 최적의 센싱 기간과 검출임계값을 그때마다 도출하여 적용하는 방안을 고려해볼 수 있으나, 이는 quiet period<sup>6)</sup>로 작용하는 센싱 기간의 동기화된 갱신 절차가 보장되는 경우에만 적용이 가능한 방안이다. 이 경우, 메시지 손실 등의 불특정 요인에 의해 동기

화에 실패하는 부사용자가 발생하게 되면, quiet period 불일치로 인해 인접 부사용자의 전송을 주사용자 신호로 인지하는 등의 불필요한 오경보를 야기하는 문제가 발생할 수 있다.

## III. 협력 검출확률 하한 기반 협력 센싱 파라미터 최적화 방안

본 장에서는 본 논문에서 제안하는 협력 검출확률 하한 기반 센싱 파라미터 최적화 문제를 다룬다. 1절에서는 주사용자 보호 요구조건으로 제안된 협력 검출확률 하한의 정의와 함께, 협력 센싱을 수행하는 부사용자 개수가 고정된 상황에서의 센싱 파라미터를 결정하는 최적화 방안을 다룬다. 2절에서는 부사용자 개수가 가변되는 상황에서 최적화 방안을 다루며, 검출임계값의 가변 여부에 대한 제약을 추가로 고려하여, 적응적 검출임계값 적용 시 최적화 방안과 고정적 검출임계값 적용 시 최적화 방안을 각각 전개한다.

### 3.1 협력 검출확률 하한 기반 최적화 문제

본 절에서는 부사용자들 각각이  $\gamma$ 값의 추정을 가능하도록 하는 외부 요인이 전무한 상황에서,  $\bar{\gamma}$ 를 기준으로 정의되는 주사용자 보호 요구조건을 정의하고자 한다. 임의의 부사용자는  $\gamma \leq \bar{\gamma}$ 의 조건을 만족하며, 부사용자 수  $n$ 은 고정된 상황을 고려한다. 그림 2는 수식 (3)-(5)를 통해 도출한 최적 센싱 기간  $\tau_c$ 와 검출임계값  $\delta_c$ 가 적용되었을 때, SNR 변화에 따른 협력

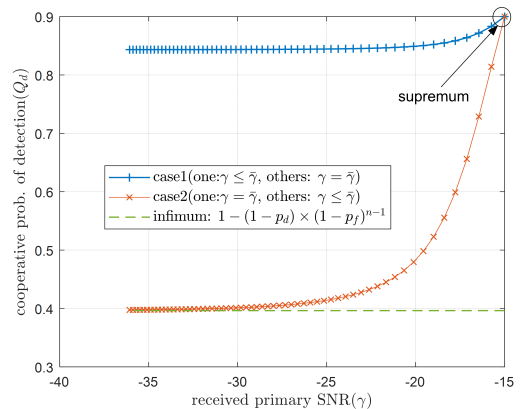


그림 2. 부사용자의 SNR 변화에 따른 협력 검출확률 ( $\bar{Q}_d = 0.9$ ,  $f_s = 6\text{MHz}$ ,  $\bar{\gamma}_{\text{dB}} = -15$ ,  $n = 5$ )  
 Fig. 2. Probability of cooperative detection according to received primary SNR ( $\bar{Q}_d = 0.9$ ,  $f_s = 6\text{MHz}$ ,  $\bar{\gamma}_{\text{dB}} = -15$ ,  $n = 5$ )

2) 본 논문에서는  $Q_f$ ,  $Q_d$  등의 확률과 네트워크 처리량  $R$ 에 대한 매개변수로  $\tau$ ,  $\delta$ ,  $n$ ,  $p_f$  등의 조합을 문맥에 맞게 선택하여 사용한다.

검출확률의 변화를 나타낸다.  $n = 5$ 가 고려된 가운데, case 1은 하나의 부사용자가  $\gamma \leq \bar{\gamma}$ 이고 나머지 모두는  $\gamma = \bar{\gamma}$ 인 경우를 나타낸 것이고, case 2는 반대로 하나를 제외한 나머지 부사용자들이 모두  $\gamma \leq \bar{\gamma}$ 인 경우를 나타낸 것이다. 이는 적어도 하나의 부사용자가  $\gamma = \bar{\gamma}$ 에 존재하고 임의의 부사용자가 그보다 작은 SNR을 갖는 모든 경우에서 기존의 최적 센싱 파라미터( $\tau_c, \delta_c$ )가 적용되었을 때, 협력 검출확률의 상한(supremum)과 하한(infimum)을 보인 것이다. 여기서 상한은  $n$ 개의 부사용자들이 모두  $\gamma = \bar{\gamma}$ 인 경우를, 하한은 하나의 부사용자가  $\gamma = \bar{\gamma}$ 이면서 나머지  $n - 1$ 개의 부사용자들은  $\gamma = 0$  (i.e.,  $\gamma_{dB} = -\infty$ )인 경우를 각각 의미하며, 다음 수식과 같이 표현할 수 있다.<sup>3)</sup>

$$\sup \{Q_d(\tau_c, \delta_c)\} = 1 - (1 - p_d(\tau_c, \delta_c, \gamma = \bar{\gamma}))^n \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \inf \{Q_d(\tau_c, \delta_c)\} &= 1 - (1 - p_d(\tau_c, \delta_c, \gamma = \bar{\gamma})) \left(1 - \lim_{\gamma \rightarrow 0} p_d(\tau_c, \delta_c, \gamma)\right)^{n-1} \\ &= 1 - (1 - p_d(\tau_c, \delta_c, \gamma = \bar{\gamma})) (1 - p_f(\tau_c, \delta_c))^{n-1} \end{aligned} \quad (7)$$

기존의 협력 센싱 파라미터 최적화 문제에서는 모든 부사용자에 대해  $\gamma = \bar{\gamma}$ 을 고려하여 성능을 분석하였으므로, 협력 검출확률의 상한을 고려한 것으로 볼 수 있다<sup>2,4)</sup>. 본 논문에서는 주사용자 보호 요구조건으로 수식 (7)의 하한을 고려하여, 네트워크 내 적어도 하나의 부사용자가 주사용자 신호를 SNR  $\bar{\gamma}$  이상으로 수신 가능할 때, 협력 센싱을 통해 최소  $\bar{Q}_d$  이상의 확률로 이를 검출하는 것으로 정의하며, 이를 기반으로 한 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max_{\tau, \delta} R(\tau, \delta), \\ \text{s.t. } \inf \{Q_d(\tau, \delta)\} \geq \bar{Q}_d, \\ \text{where } R(\tau, \delta) = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) (1 - Q_f(\tau, \delta)) \text{ and} \\ \inf \{Q_d(\tau, \delta)\} = 1 - (1 - p_d(\tau, \delta)) (1 - p_f(\tau, \delta))^{n-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

임의의  $\tau$ 에 대해  $\inf \{Q_d(\tau, \delta)\}$ 와  $Q_f(\tau, \delta)$ 는  $\delta$ 에 대한 단조감소함수이고,  $R(\tau, \delta)$ 는  $\delta$ 에 대한 단조증가

3) 임의의 부사용자가  $\gamma \leq \bar{\gamma}$ 인 상황에서, 모든 부사용자들이  $\gamma < \bar{\gamma}$ 인 경우에는 협력 검출확률에 의한 주사용자 보호 요구조건을 고려할 필요가 없으며, 적어도 하나의 부사용자가  $\gamma = \bar{\gamma}$ 인 경우에만 협력 검출확률에 의한 주사용자 보호 요구조건을 적용한다.

표 1. 협력 센싱 파라미터 도출 알고리즘  
Table 1. Algorithm for derivation of cooperative spectrum sensing parameter

<b>A: Initialization</b>	
Input	$f_s, T, \bar{\gamma}, \bar{Q}_d, n, \sigma_u^2, R_{tmp} (=0), p_{f, \min}$ (e.g., $10^{-5}$ )
Output	$\tau_p$ and $\delta_p$
<b>B: Derive max. available <math>p_f</math></b>	
	$p_{f, \max} = 1 - \sqrt[n]{1 - \bar{Q}_d}$
<b>C: Derive optimal <math>\tau_p</math> and <math>\delta_p</math></b>	
for	$p_{f, tmp} = p_{f, \min}$ to $p_{f, \max}$ do
Use (7) with	$p_{f, tmp}$ to compute $p_{d, tmp}$
	$p_{d, tmp} = 1 - (1 - \bar{Q}_d) / (1 - p_{f, tmp})^{n-1}$
Use (1) and (2) to compute	$\tau_{tmp}$
	$\tau_{tmp} = f_s / \gamma^2 \times (Q^{-1}(p_{f, tmp}) - Q^{-1}(p_{d, tmp}) \sqrt{2\gamma + 1})^2$
Use (4) and (8) with	$p_{f, tmp}, \tau_{tmp}$ to compute $Q_f, R$
if	$R_{tmp} < R$ do
	$R_{tmp} = R$
else if	$R_{tmp} \geq R$ do
	$\tau_p = \tau_{tmp}$
Use (2) to compute	$\delta_p$
break	
end if	
end for	

함수이다. 따라서,  $\delta$ 는  $\inf \{Q_d(\tau, \delta)\} = \bar{Q}_d$ 를 만족하는 값으로 결정된다. 또한,  $p_f(\tau, \delta) \leq 0.5$ 인 조건을 만족하는 임의의  $\delta$ 에 대해서는  $R(\tau, \delta)$ 를 극대화하는  $\tau$ 가 반드시 존재한다<sup>3)</sup>. 따라서, 최적의 센싱 기간과 검출 임계값은  $\inf \{Q_d(\tau, \delta)\} = \bar{Q}_d$ 를 만족하는  $(\tau, \delta)$  쌍 중  $R(\tau, \delta)$ 를 극대화하는 순서쌍으로 도출된다. 표 1은 수식 (8)에 의한 협력 센싱 파라미터 ( $\tau_p, \delta_p$ ) 도출 알고리즘을 나타낸 것이다.

### 3.2 부사용자 수 변화에 따른 센싱 파라미터

본 절에서는 초기에 적용된  $\tau$ 의 변경이 불가능한 시스템에서 부사용자 수  $n$ 이 실시간으로 변화하는 환경을 고려한다. 이 경우, 협력 검출확률 하한과 협력 오경보확률, 네트워크 처리량은 각각  $\inf \{Q_d(\delta, n)\}$ ,  $Q_f(\delta, n)$ ,  $R(\delta, n)$ 로 다시 쓸 수 있다.

부사용자들이 가입과 탈퇴 정보를 융합센터로 공유하는 네트워크에서는 융합센터가 현재의  $n$ 값을 파악할 수 있다. 이 경우, 융합센터를 제외한  $n - 1$ 개의 부사용자들은 융합센터로 센싱 결과를 전달하게 된다.

융합센서가 현재의  $n$ 값을 파악할 수 있고, 부사용자들로부터의 센싱 결과 메시지를 누락없이 공유받을 수 있는 시스템에서는  $n$ 에 따라 검출임계값을 적응적으로 변경함으로써 네트워크 처리량을 최대화하는 것이 가능하다. 반면, 융합센서가  $n$ 의 변화를 파악할 수 없거나, 이를 파악할 수 있다고 하더라도 센싱 결과 메시지 누락이 수시로 발생하는 환경에서는, 모든 부사용자들이 사전에 정의되어 변경이 불가능한 센싱 파라미터를 사용해야 한다.

### 3.2.1 적응적 검출임계값 적용 시

센싱 기간이 고정된 환경에서 검출임계값을 적응적으로 변경할 수 있는 환경을 먼저 고려한다. 초기에 고려한 부사용자 수를  $n_{init}$ , 현재의 부사용자 수를  $n_{cur}$ 라 할 때, 초기의 센싱 파라미터는 수식 (8)을 통해 도출한다( $n = n_{init}$ ). 이후  $n_{init} \neq n_{cur}$ 인 경우에는  $\inf \{Q_d(\delta, n)\}$ 와  $R(\delta, n)$ 의 변화를 고려해야 한다.  $\inf \{Q_d(\delta, n)\}$ 와  $Q_f(\delta, n)$ 는  $n$ 에 대한 단조증가함수이고,  $R(\delta, n)$ 는  $n$ 에 대한 단조감소함수이므로,  $n_{init} > n_{cur}$ 인 경우 주사용자 보호 요구조건 만족을 위해 검출임계값을 감소시켜야 한다. 검출임계값의 감소는 협력 오경보확률을 증가시키며,  $n$ 의 감소로 증가한 네트워크 처리량을 일부 감소시키는 작용을 한다. 반면,  $n_{init} < n_{cur}$ 인 경우에는 주사용자 보호 요구조건을 만족시키도록 검출임계값을 증가시킴으로써 네트워크 처리량을 일부 증가시킬 수 있다. 따라서,  $n$ 값이 변경되는 경우에는 증감여부와 무관하게  $\inf \{Q_d(\delta, n)\} = \bar{Q}_d$ 이 만족되도록 검출임계값을 변경하는 것이 네트워크 처리량 측면에서 최선임을 알 수 있다.

### 3.2.2 고정적 검출임계값 적용 시

네트워크 운용 중 센싱 기간과 검출임계값 모두 변경이 불가능한 시스템의 경우에는 초기부터  $n$ 의 변경과 무관하게 주사용자 보호 요구조건이 만족되도록 하는 제약사항을 고려해야 한다. 이 경우, 수식 (8)에서 협력 센싱을 위한 최소 부사용자의 수인  $n_{min} = 2$ 를 주사용자 보호를 위한 요구조건으로 하는 다음의 최적화 문제를 고려한다.

$$\begin{aligned} & \max_{\tau, \delta, n} R(\tau, \delta, n), \\ & \text{s.t., } \inf \{Q_d(\tau, \delta, n_{min})\} \geq \bar{Q}_d \end{aligned} \quad (9)$$

수식 (9)는 수식 (8)과 마찬가지로의 원리로  $\inf \{Q_d(\tau, \delta, n_{min})\} = \bar{Q}_d$ 의 관계를 만족하는  $(\tau, \delta)$  쌍 중,  $R(\tau, \delta, n)$ 을 극대화하는 순서쌍이며, 이 때 고려하는  $n$ 의 값에 따라 상이한  $(\tau, \delta)$  순서쌍이 도출된다.  $R(\tau, \delta, n)$ 은  $n$ 이 1씩 감소하는 경우  $(1 - p_f(\tau, \delta))$ 을 나눈 만큼 증가하고, 반대의 경우  $(1 - p_f(\tau, \delta))$ 을 곱한 만큼 감소한다. 따라서,  $(1 - p_f(\tau, \delta))$ 값이 클수록 (즉,  $p_f(\tau, \delta)$ 값이 작을수록),  $n$ 의 변화에도 네트워크 처리량의 변화가 적게 된다. 네트워크 운용에 따른  $n$ 의 분포(예, 확률질량함수)가 예측 가능한 경우에는 적합한  $n$ 을 지정할 수 있으며, 이의 사전 예측이 불가능한 경우에는  $n$ 의 변화에 따른 네트워크 처리량의 변화가 최소화되도록 하는 보다 큰  $n$ 을 수식 (9)에 적용할 수 있다. 이의 도출 알고리즘은 표 1의 알고리즘에서 3번 행과 6번 행에  $n = 2$ 를 적용하는 것과 같다.

## IV. 성능분석

본 장에서는 협력 검출확률 하한 기반 최적화 수행 시, 검출확률과 네트워크 처리량 측면에서의 성능을 분석한다. 성능분석 간에는  $\bar{Q}_d = 0.9$ ,  $\bar{\gamma}_{dB} = -15$ ,  $f_s = 6\text{MHz}$ ,  $T = 5\text{ms}$ 를 적용하였다.

그림 3은 표 1의 알고리즘에 기초하여 수식 (3)에 의한 기존 최적화 방식과 수식 (8)에 의한 제안된 최적화 방식을 비교한 것이다<sup>4)</sup>. 제안된 방식에서는 협력 검출확률의 하한을 이용하기 때문에,  $n$ 이 주어졌을 때  $p_f$ 에 따라  $\inf \{Q_d(\tau, p_f)\} = \bar{Q}_d$ 를 만족하는  $p_d$ 가 그림 3(a)와 같은 양상을 보인다(표 1의 5~6번 행). 반면, 기존의 방식은  $p_f$ 와 무관하게 수식 (5)에 의해 각 부사용자의  $p_d$ 가 결정된다. 그림 3(b)는 그림 3(a)에서 주어진  $p_d$ 와  $p_f$ 의 순서쌍에 따른 센싱 기간(표 1의 7~8번 행)을 나타낸 것으로, 동일한 부사용자 수를 기준으로 했을 때, 제안된 방식은 기존의 방식에 비해 보다 긴 센싱 기간을 요구하는 것을 알 수 있다. 그림 3(c)에서는 제안된 방식과 기존의 방식 모두 네트워크 처리량을 극대화하는 로컬 오경보확률이 존재하여 그에 따른 검출임계값 도출이 가능함을 보인다(표 1의 9~16번). 제안된 방식은 기존의 방식과 비교하여 높은 로컬 오경보확률과 긴 센싱 기간에 의해 네

4) 기존의 최적화 파라미터  $(\tau_c, \delta_c)$  도출 과정은 표 1의 알고리즘에서 3번 행을  $p_f = 1 - \sqrt{1 - \bar{Q}_d}$ 로 대체하고, 이후  $p_{f, \max} = p_d$ 를 실행한 후, 5번 행과 6번 행을 삭제하고, 8번 행의  $p_{d, \text{tmp}}$ 를  $p_d$ 로 대체한 것과 같다.

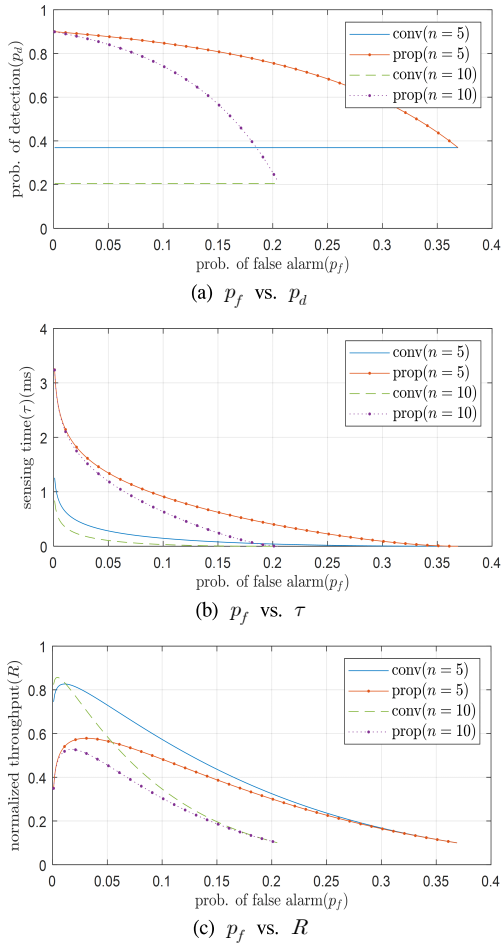


그림 3. 협력 센싱 파라미터 최적화 (기존 vs. 제안)  
Fig. 3. Cooperative sensing parameter optimization (conventional vs. proposed)

트위크 처리량이 최적화되기 때문에, 기존의 방식에 비해 네트워크 처리량이 감소하는 것처럼 보인다. 그러나, 그림 4에 제시된 것과 같이 기존의 방식은 부사용자들의  $\gamma$ 에 따라 주사용자 보호 요구조건 자체를 충족시키지 못하는 문제를 발생시킬 수 있음에 유의해야 한다.

그림 4는 그림 3(c)에서  $n=5$ 인 경우에 대한 기존의 방식과 제안된 방식 각각의 최적 센싱 시간과 검출 임계값이 적용된 경우, 부사용자들의  $\gamma$ 에 따른 협력 검출확률을 비교한 것이다. 기존 방식의 경우, 단지 하나의 부사용자가  $\gamma < \bar{\gamma}$ 의 상황에 놓이게 되더라도  $\bar{Q}_d$  조건을 충족시킬 수 없음을 알 수 있다. 특히, 이러한 부사용자들이 증가할수록 협력 검출확률이 급격히 감소하여, 주사용자 보호 성능이 크게 미흡할 수

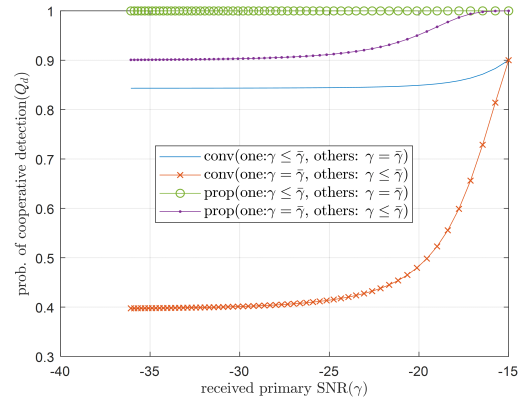


그림 4. 부사용자의 SNR 변화에 따른 협력 검출확률 (기존 vs. 제안,  $n=5$ )  
Fig. 4. Probability of cooperative detection according to received primary SNR (conventional vs. proposed,  $n=5$ )

있음을 보인다. 반면, 제안된 방식의 경우에는 대부분의 부사용자들이  $\gamma < \bar{\gamma}$ 의 상황에 놓이는 열악한 환경에서도 최소한  $\bar{Q}_d$  조건을 충족시킬 수 있음을 보이며, 이는 기존과 달리 제안된 협력 검출확률 하한 기반의 최적화 방식이 태생적으로 매우 안정적인 주사용자 보호 성능을 보장한다는 것을 의미한다.

그림 5는 제안된 최적화 방식에 적응적 검출임계값을 적용했을 때, 네트워크 처리량을 보인다.  $n_{init} = n_{cur}$ 는 센싱 시간  $\tau$ 의 변경이 가능한 상황을 가정하여  $n_{cur}$ 에 따른 최적의  $(\tau, \delta)$ 가 적용된 결과로,  $\tau$ 의 변경이 불가능한 상황에서  $n_{cur}$ 에 따른 적응적 검출 임계값 변경이 네트워크 처리량에 미치는 영향을 비교하기 위한 참고치이다. 그림에서는  $n_{init}$ 이 클수록

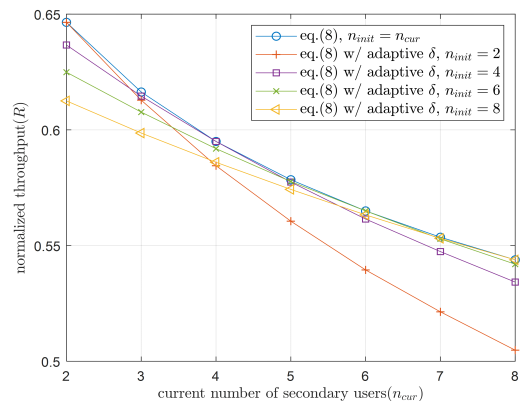


그림 5. 적응적 검출임계값 적용에 의한 네트워크 처리량 변화  
Fig. 5. Effect of adaptive detection threshold on normalized network throughput

부사용자 수 변화에 따른 네트워크 처리량 변화가 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 이는  $n_{init}$  값이 클수록 협력 검출확률 하한을 만족하기 위해 각 부사용자에 요구되는  $p_d$ 와  $p_f$ 가 작아지기 때문이다. 즉, 초기에 고려된 부사용자 수가 큰 경우에는 네트워크 운용 중 부사용자 수 변경에 따른 협력 오경보확률  $Q_f$ 의 변화 폭이 작아서 네트워크 처리량의 변화폭 역시 작아지게 된다. 따라서, 부사용자 수가 빈번하게 가변되는 환경에서는 가급적 큰  $n_{init}$ 을 고려하는 것이 네트워크 처리량 변화폭을 최소화하는 방법임을 알 수 있다.

그림 6은 수식 (8)의 최적화에 적응적 검출임계값을 적용한 경우와 수식 (9)의 고정적 검출임계값 기반 최적화를 적용한 경우의 네트워크 처리량을 비교한 것이다. 고정적 검출임계값의 경우, 주사용자 보호 요구조건으로  $n_{min} = 2$ 를 고려하기 때문에,  $n_{init}$ 을 고려하는 수식(8)에 비해 각 부사용자들에 상대적으로 높은  $p_d$ 와  $p_f$ 를 요구하며, 이로 인해 센싱 기간 또한 상대적으로 증가하게 된다. 증가한  $p_f$ 와  $\tau$ 로 인해, 고정적 검출임계값을 적용하는 경우의 네트워크 처리량은 적응적 검출임계값을 적용한 경우에 비해 다소 감소하는 양상을 보인다. 또한, 그림 6의 결과는 적응적 검출임계값 적용 방식과 마찬가지로, 보다 큰  $n_{init}$ 을 기준으로 고정적 검출임계값을 적용하는 경우,  $n_{cur}$  값 변화에 따른 네트워크 처리량 변화폭이 감소하는 양상을 보이고 있다.

그림 7은 적응적 검출임계값을 적용한 경우와 고정적 검출임계값을 적용한 경우에 대해, 융합센터에 성공적으로 공유된 센싱 결과 메시지의 수

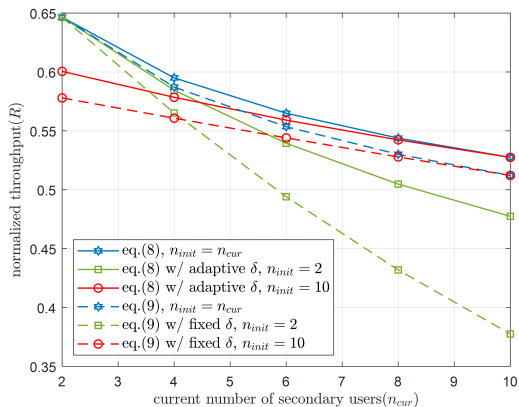


그림 6. 적응적 검출임계값과 고정적 검출임계값 적용 시 네트워크 처리량  
Fig. 6. Normalized network throughput with adaptive detection threshold and fixed detection threshold

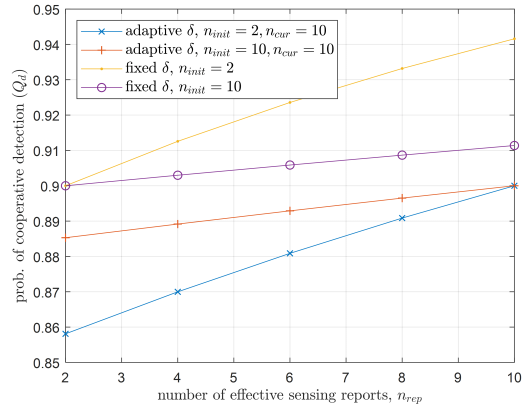


그림 7. 유효 센싱 결과 메시지 수에 따른 협력 검출확률  
Fig. 7. Probability of cooperative detection according to the number of effective sensing reports

$n_{rep} (\leq n_{cur})$ 에 따른 실질 협력검출확률을 비교한 것이다.  $n_{init} = 2$  혹은  $n_{init} = 10$ 의 상황에서  $n_{cur} = 10$ 에 대한 적응적 검출임계값이 적용된 경우,  $n_{rep} < n_{cur}$ 에서  $\bar{Q}_d$ 의 조건이 만족되지 않는 것을 나타내는 반면, 고정적 검출임계값 적용 방식에서는  $n_{min} = 2$ 를 이용하기 때문에 융합센터 자신을 제외한 적어도 하나의 부사용자로부터 센싱 결과 메시지를 공유받으면, 주사용자 보호 요구조건이 만족되는 것을 보인다. 이는 링크간 연결상태가 불안정한 환경일수록 고정적 검출임계값을 적용하여 센싱 파라미터를 도출하는 것이 주사용자 보호 측면에서 안정적인 성능을 보장함을 의미한다.

그림 5~7의 결과는 적응적 검출임계값 혹은 고정적 검출임계값을 적용하는 경우, 보다 큰  $n_{init}$ 을 고려하는 것이  $n_{cur}$  및  $n_{rep}$ 이 변화하는 환경에서도, 최소 보장 네트워크 처리량을 증가시키는 방법임을 시사한다.

## V. 결론

본 논문에서는 부사용자들이 겪는 주사용자 신호에 대한 SNR이 상이한 환경을 고려하여, 기존의 협력검출확률 정의가 실질적으로는 주사용자 보호 요구조건을 충족시키기에 미흡할 수 있음을 보이고, 협력 검출확률 하한으로 정의된 주사용자 보호 요구조건을 기반으로 하는 센싱 파라미터 최적화 문제를 제시하였다. 또한, 협력센싱에 참여하는 부사용자 수가 변화하는 경우를 고려하였으며, 그에 따른 최적 센싱 파라미터를 도출하는데 있어서 검출임계값의 실시간 변경만 가능한 시스템과 센싱 기간과 검출임계값 모두 변경



이 불가능한 시스템을 각각 고려하였다. 제안된 최적화 방법은 협력 검출확률 측면에서 주사용자 보호 요구조건을 항상 충족할 수 있음을 보였으며, 협력 센싱 노드 수가 가변되는 상황에서는 검출임계값의 적응적 변경을 통해 부가적인 네트워크 처리량의 최적화가 가능함을 보였다. 또한, 성능분석을 통해 적응적 검출 임계값을 적용하는 경우나 고정적 검출임계값을 적용하는 경우 모두에서, 협력 센싱 노드 수의 분포를 예상하기 어려운 경우, 최적화 문제에서 고려해야 할 협력 센싱 노드의 수는 시스템에서 허용가능한 가장 큰 값을 선택하는 것이 네트워크 처리량 측면에서 최선의 선택임을 보였다.

### References

[1] G. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," in *Proc. IEEE Int. Symp. DySPAN*, pp. 131-136, Nov. 2005.

[2] A. Kumar, P. Thakur, S. Pandit, and G. Singh, "Analysis of optimal threshold selection for spectrum sensing in a cognitive radio network: an energy detection approach," *Wirel. Netw.*, vol. 25, pp. 3917-3931, 2019.

[3] Y.-C. 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.

[4] E. C. Y. Peh, Y.-C. Liang, Y. L. Guan, and Y. Zeng, "Optimization of cooperative sensing in cognitive radio networks: A sensing-throughput tradeoff view," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 9, pp. 5294-5299, Nov. 2009.

[5] N.-K. Kim and Y.-S. Byun, "A threshold optimization method for decentralized cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 02, pp. 253-263, Feb. 2015.

[6] S. Bae, J. So, and H. Kim, "On optimal cooperative sensing with energy detection in cognitive radio," *Sensors (Basel)*, vol. 17, no. 9, 2111, Sep. 2017.

[7] G. Verma and O. P. Sahu, "A distance based

reliable cooperative spectrum sensing algorithm in cognitive radio," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 99, pp. 203-212, Nov. 2017.

[8] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and S. Shankar, "IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios," in *Proc. IEEE Int. Symp. DySPAN*, pp. 328-337, Nov. 2005.

[9] R. Kishore, et al., "Sensing-throughput tradeoff for superior selective reporting-based spectrum sensing in energy harvesting HCRNs," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 2, pp. 330-341, Jun. 2019.

[10] D.-C. Oh and Y.-H. Lee, "Cooperative spectrum sensing with imperfect feedback channel in the cognitive radio systems," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 99, pp. 763-779, Mar. 2010.

#### 최 재 각 (Jae-Kark Choi)



2006년 2월 : 인하대학교 전자공학과 졸업  
 2008년 8월 : 인하대학교 정보통신공학과 석사  
 2013년 2월 : 인하대학교 정보통신공학과 박사  
 2013년 1월~2017년 1월 : NIST Guest Researcher  
 2017년 2월~현재 : 한화시스템 전문연구원  
 <관심분야> 무선통신시스템, 인지무선, 전술통신  
 [ORCID:0000-0002-0293-7222]

#### 서 명 환 (Myunghwan Seo)



2002년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 졸업  
 2004년 2월 : 한국과학기술원 전자공학과 석사  
 2009년 2월 : 한국과학기술원 전자공학과 박사  
 2009년 1월~현재 : 한화시스템 수석연구원

<관심분야> Mobile Ad-hoc Network, Tactical Communication Systems, Cognitive Radio  
 [ORCID:0000-0002-9093-6739]

음수빈 (Soobin Um)



2012년 2월 : 한양대학교 미디어  
어통신공학과 졸업  
2014년 2월 : 한국과학기술원  
전기 및 전자공학과 석사  
2014년 2월~현재 : 국방과학연  
구소 선임연구원

<관심분야> Machine Learning,  
Communication Theory, Information Theory,  
Cognitive Radio, Tactical Communication  
Systems, Datalink Systems  
[ORCID:0000-0002-1133-0027]

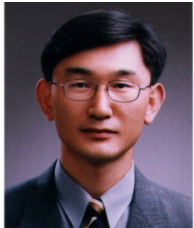
한철희 (Chulhee Han)



1997년 2월 : 중앙대학교 전자  
공학과 졸업  
1999년 2월 : 연세대학교 전자  
공학과 졸업  
2007년 2월 : 연세대학교 전기  
전자공학과 박사

2006년 11월~현재 : 한화시스템  
수석연구원  
<관심분야> 전술통신, 이동통신시스템, 신호처리,  
Cognitive Radio  
[ORCID:0000-0002-7781-7057]

최증원 (Jeung Won Choi)



1989년 2월 : 충남대학교 계산  
통계학과 졸업  
1993년 8월 : 충남대학교 계산  
통계학과(전산학) 석사  
1997년 8월 : 충남대학교 전산  
학과 박사  
1997년 7월~현재 : 국방과학연  
구소 수석연구원

2013년 9월~현재 : 과학기술연합대학원대학교 교수  
<관심분야> Tactical Communication Systems,  
Cognitive Radio, Satellite Communications,  
Datalink Systems, Data Fusion  
[ORCID:0000-0002-3642-2323]