

## 무선인지통신 시스템에서 최적 협업 센싱 방식

# Optimal cooperative sensing scheme in cognitive radio communication systems

이동준\*, 이명진\*

Dong-Jun Lee\*, Myeong-jin Lee\*

### 요 약

본 논문에서는 무선인지통신망에서 스펙트럼 센싱을 위한 협업 센싱을 하는 경우에 센싱 시간 및 협업 센싱 단말 수의 최적값들을 결정하는 방식에 대해서 다룬다. 협업 스펙트럼 센싱에서는 전송 중인 CU (Cognitive User) 외에 휴지중인 다른 CU들이 활성화되어 센싱에 참여함으로써 센싱 시간을 줄일 수 있다. 이로 인한 전송 CU의 전송률 이득과 CU들의 센싱으로 인한 에너지 소모간의 관계를 모두 고려하는 혼합 정수 계획법 문제를 풀어서 최적값들을 구할 수 있다.

### Abstract

In this paper, we study an optimization which determines the optimal sensing time and the number of cooperative sensing cognitive users for cooperative spectrum sensing scheme in cognitive radio networks. In cooperative spectrum sensing, cognitive users originally in inactive status are activated and take part in spectrum sensing along with transmitting cognitive users resulting in a reduced sensing time. Tradeoff between transmission rate gain and energy consumption due to cooperative sensing is formulated as a mixed integer programming problem which is solved for the optimal values.

Key words : Cognitive Radio, Cooperative Spectrum Sensing, Optimal Sensing Time, Quiet Period

### I. 서 론

한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위한 무선인지(Cognitive Radio) 통신시스템이 최근에 널리 관심을 모으고 있다. 무선인지 통신시스템에서는 기존 사용자인 IU (Incumbent User)에게 할당된 주파수 자원 중 현재 IU가 사용하고 있지 않은 자원을 무선

인지 사용자인 CU(Cognitive User)가 찾아서 사용하고, 만일 이 자원을 사용하는 도중에 IU가 전송을 시작하면 CU는 이를 감지하여 자신의 전송을 중지하게 된다[1]. 이러한 무선인지 통신 방식에 기반한 다양한 연구들이 진행 중에 있으며 특히 IEEE 802.22에서는 이러한 무선 인지 통신 방식에 대한 표준화가 진행되었다[2].

\* 한국항공대학교 항공전자및정보통신공학부(School of Electronics, Telecommunications and Computer Engineering, Korea Aerospace University)

· 제1저자 (First Author) : 이동준

· 투고일자 : 2008년 9월 10일

· 심사(수정)일자 : 2008년 9월 11일 (수정일자 : 2008년 10월 14일)

· 게재일자 : 2008년 10월 30일

무선 인지 통신에서 CU는 특정 주파수 자원이 IU에 의해서 사용되는지 여부를 파악하기 위하여 스펙트럼 센싱을 수행한다[3]. 이러한 스펙트럼 센싱 방식은 크게 에너지 센싱에 기반한 방식과 신호 특성 센싱에 기반한 방식으로 나눌 수 있다. 에너지 센싱에 기반한 방식은 간단하고 짧은 시간에 측정 결과를 낼 수 있는 장점이 있는 반면, 미리 정확한 잡음 값을 알고 있어야 하는 어려움이 있다[4,5]. 신호 특성에 기반한 방식으로는 cyclostationary 센싱 방식 등이 있다. 신호 특성 기반 센싱 방식은 복잡하고 측정 시간이 많이 걸리지만 상대적으로 잡음의 영향이 적다 [6].

IEEE 802.22 에서는 CU는 IU가 전송을 시작한 이후 2초 이내에 0.1이내의 오경보 확률 (false alarm probability)과 0.9 이상의 IU 신호 검출 확률 (detection probability)을 가지고 IU의 신호를 센싱하고 자신의 전송을 중지해야 한다는 요구조건을 제시하고 있다 [2]. 이러한 CU 전송 중의 IU 스펙트럼 센싱을 위해서 CU 전송 도중 휴지 구간(quiet period)를 두는 방식이 제시되었다. 즉 CU는 자신의 전송 도중에 휴지 구간 동안에 전송을 중지하고 IU의 전송 신호가 존재하는 지를 측정한다. 기본적으로 스펙트럼 센싱 시간이 길수록 센싱의 정확도는 증가한다. 하지만 이러한 센싱을 위한 휴지 구간이 길면 CU의 전송 성능이 떨어지기 때문에 너무 길어서는 안된다. 이 점을 고려하여 CU의 전송 성능을 고려한 최적의 휴지 구간의 길이를 결정하는 연구가 있었다[5]. 또한 결정이론을 이용하여 스펙트럼 센싱의 정확도를 높이려는 연구도 있었다[7].

한편 스펙트럼 센싱 정확도를 높이기 위해서 여러 CU 단말들의 협업을 이용하는 방식에 대한 연구가 다수 수행되어 왔다[4,8]. 이들 협업 센싱을 이용하는 경우에는 각 단말의 센싱 구간 길이를 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만 CU 단말들이 스펙트럼 센싱을 수행하게 되는 경우에 이로 인한 에너지 소모가 증가하는 단점이 있다. 이와 같이 스펙트럼 센싱의 길이에 영향을 미치는 요소들은 여러 가지지만 이들을 모두 고려한 연구는 지금까지 없었다. 본 연구에서는 협업 센싱을 하는 상황에서 이로 인한 CU 단말들의 에너지 소모와 전송 CU의 전송 성능을 모두 고려한

최적 센싱 기간의 길이와 센싱에 참여하는 CU 갯수를 도출하는 방식을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II에서는 무선인지통신시스템에서 스펙트럼 센싱의 개요에 대해서 소개하고 III에서는 제안하는 협업 센싱에서의 최적 센싱 시간 및 센싱 CU 단말 수의 결정 기법을 설명한다. IV에서는 제안하는 방식의 성능 결과를 살펴보고 마지막으로 V에서는 결론을 맺는다.

## II. 무선인지통신 시스템에서 스펙트럼 센싱

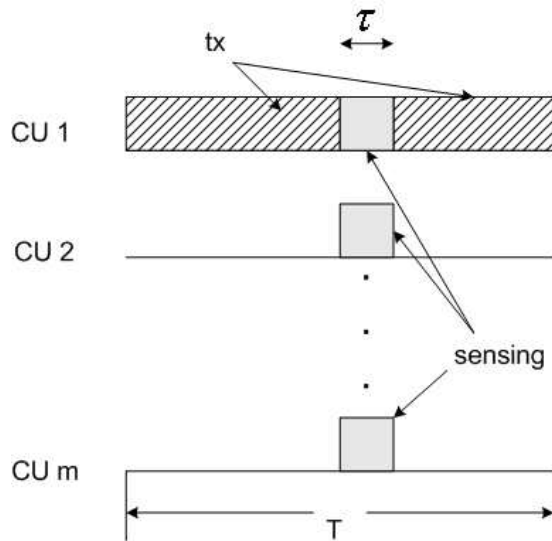


그림 1. 무선인지통신 시스템에서 CU들의 협업 스펙트럼 센싱

Fig. 1. Cooperative spectrum sensing of cognitive users in cognitive communication networks.

그림 1은 무선인지통신 시스템에서 CU가 전송하는 도중의 협업 스펙트럼 센싱을 위한 휴지 구간(quiet period)을 나타낸다. CU 1이 현재 데이터 전송 중인 단말이며, 나머지 CU는 휴지 상태에 있다. 시간 축 상에서 CU 1은 데이터 전송을 하며 스펙트럼 센싱을 하기 위해서 휴지 구간  $\tau$  동안 전송을 중지한다. 협업 센싱을 하기 위하여 나머지 휴지중이던 CU들은 활성화가 되어  $\tau$  동안 스펙트럼 센싱을 하고 다시 휴지 상태로 되돌아간다. 협업 스펙트럼 센싱에 참여하는 CU들의 센싱 결과는 특정 처리 노드에 전송된 후 모

두 더해져서 최종적인 스펙트럼 센싱 결과를 도출하는데 사용된다. 스펙트럼 센싱이 수행되는 주기는  $T$ 이다.

한편 IU의 상태는 다음과 같이 두 가지이다.

$H_0$  : IU가 휴지 상태이다.

$H_1$  : IU가 활성화되어 전송중이다.

스펙트럼 센싱을 위한 휴지 구간에서 CU에서의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 임의의 시간  $n$ 에서 IU가  $H_0$  상태이면, CU  $i$ 의 수신 신호는

$$y_i(n) = u_i(n) \quad (1)$$

IU가  $H_1$  상태이면,

$$y_i(n) = h_i s_i(n) + u_i(n) \quad (2)$$

여기서  $u_i(n)$ 는 가우시안 잡음으로써, 독립동일분포 (i.i.d.)를 가지는 확률과정이며 평균은 0이고 분산은  $E[|u_i(n)|^2] = \sigma_u^2$ 이다.  $s_i(n)$ 는 IU의 전송 신호의 CU에서의 수신값이며, iid 확률과정이며 평균은 0이고 분산은  $E[|s_i(n)|^2] = \sigma_s^2$ 이다. 또한  $s(n)$ 과  $u(n)$ 은 서로 독립이며 모두 circularly symmetric complex Gaussian (CSCG)라고 가정한다.  $h_i$ 는 각 CU  $i$ 와 IU 사이의 채널 계수이며 여기서는 모든 경우에 1로 동일하다고 가정한다.  $\gamma = \sigma_s^2 / \sigma_u^2$ 는  $H_1$  상태에서 IU 전송 신호의 CU에서의 수신 SNR이다.  $\tau$ 는 센싱 시간이며  $T$ 는 센싱 주기이다.

본 연구에서는 IU의 상태를 결정하기 위해서 CU의 수신 신호들의 에너지 측정값을 이용한다고 가정한다. CU  $i$ 에서의 에너지 센싱값은 다음과 같이 주어진다[5].

$$L_i(y) = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} |y_i(n)|^2 \quad (3)$$

$$N_i = \lfloor \tau f_s \rfloor \quad (4)$$

여기에서  $f_s$ 는 스펙트럼 센싱을 위한 샘플링 주파수이다. 협업 센싱에 참여하는 CU들의 에너지 측정값을 모두 더하면 아래와 같다.  $m$ 은 센싱에 참여하는 CU 수이다. CU의 총수는 충분히 크다고 가정한다.

다.

$$L(y) = \sum_{i=1}^m L_i(y). \quad (5)$$

IU가  $H_0$ 의 상태인데 CU가  $H_1$ 으로 잘못 인지하는 경우를 false alarm이라고 하고, 반대로  $H_1$ 의 상태인데  $H_0$ 로 잘못 인지하는 경우를 mis-detection이라고 한다. CU는 IU의 두 가지 상태를 직접적으로 파악할 수 없다. 대신 스펙트럼 센싱 결과에 따라서 확률적으로 간접적인 예측을 할 수 있다.

### III. 제안하는 협업 센싱에서의 최적 센싱 시간 및 센싱 단말 수 결정 방식

제안하는 알고리즘은 협업 스펙트럼 센싱을 하는 경우에 최적 센싱 시간과 센싱 단말의 수를 결정하는 방식에 대한 것이다.

기존의 센싱에 대해서 고려한 연구에서는 다음과 같이 최적화 문제를 정의하였다[5].

$$\begin{aligned} \max. & R(\tau) \\ \text{s.t.} & P_d(\epsilon, \tau) \geq \overline{P_d} \end{aligned} \quad (6)$$

이 때,

$$R(\tau) \approx \frac{T-\tau}{T} (1 - P_{fa}(\tau)) R \quad (7)$$

$R$ 은 현재 전송중인 CU의 전송율을 나타낸다.  $R(\tau)$ 는 센싱 시간  $\tau$ 와 false alarm 확률을 고려한 CU 전송율의 저하를 나타낸다. 즉, 기존 연구에서는 협업 센싱의 목적 함수를 오로지 전송율 관점에서만 바라보았다. 또한 현재 전송중인 CU만 스펙트럼 센싱에 참여하며 여기서 변수는 센싱 기준치인  $\epsilon$ 이다. 그리고 센싱 시간  $\tau$ 는 고정되었다고 가정하였다[5].

그러나 본 연구에서는 센싱 기준치  $\epsilon$ 가 고정되었다고 가정하고 센싱 시간  $\tau$ 의 변화에 대한 최적화 문제로 간주한다. 이러한 센싱 시간에 대한 최적화 문

제를 생각하게 되면, 하나의 센싱 CU 외에 여러 센싱 CU들로 확장할 수 있게 되고, 이에 따른 센싱 시간의 단축의 영향을 고려해 볼 수 있다. 여러 CU들이 센싱에 참여하는 경우에는 다음과 같은 최적화 문제를 고려할 수 있다. 센싱에 참여하는 CU들의 수가 증가하면 주어진 센싱 확률을 달성하기 위한 센싱 시간이 감소하고 이로 인해서 현재 전송 CU의 전송 성능이 증가하게 된다. 그러나 이 CU들은 그만큼의 에너지 소모가 발생한다. 결국 센싱에 참여하는 CU 수의 최적값은 이들의 트레이드오프 관계에 의해서 결정된다고 볼 수 있다.

IU 신호의 검출 확률에 대한 요구조건을 만족시키는 제안하는 최적화 문제의 형태는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \min. & g(m, \tau) \\ \text{s.t.} & P_d(m, \tau) \geq \overline{P_d} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 목적함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g(m, \tau) \\ = \alpha c(\tau)m - \frac{T-\tau}{T}(1 - P_{fa}(m, \tau))R \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $c(\tau)$ 는 휴지 상태에 있던 CU들의 센싱 시간에 따른 에너지 소모를 의미하며 단조증가 함수로 생각할 수 있다. 한편  $c(\tau) = c_0 + c_1\tau$  이라고 가정한다. 여기서  $c_0$ 는 휴지 상태에 있는 CU가 스펙트럼 센싱을 위해서 활성화 될 때 필요한 에너지 비용이다.  $c_1$ 은 단위 시간의 스펙트럼 센싱에 사용되는 에너지 비용이다.  $\alpha$ 는 에너지 비용의 상대적 중요성을 나타내는 계수이다. 센싱 시간으로 인한 전송 휴지와 센싱 시간에 따라서 정해지는 false alarm 확률을 고려한 CU 전송율이 정해지고, 여기에 각 CU들의 센싱으로 인한 에너지 소모에 의한 비용을 뺀 것이 목적 함수가 된다. 여기에서 사용되는 false alarm 확률과 mis-detection 확률은 아래와 같이 나타낼 수 있다[5].

$$P_{fa}(\epsilon, m, \tau) = Q\left(\left(\frac{\epsilon}{\sigma_u^2} - 1\right)\sqrt{m\tau f_s}\right) \quad (10)$$

$$P_{md}(\epsilon, m, \tau) \quad (11)$$

$$= Q\left(\left(-\frac{\epsilon}{\sigma_u^2} + \gamma + 1\right)\sqrt{\frac{m\tau f_s}{2\gamma + 1}}\right)$$

$$P_d(\epsilon, m, \tau) = 1 - P_{md}(\epsilon, m, \tau) \quad (12)$$

$\epsilon$ 는 주어진 측정치로부터 IU 상태  $H_0$ 와  $H_1$ 을 결정하는 기준치이다.

위 식에서 Q-함수의 다음과 같은 근사함수를 이용할 수 있다[9].  $x$ 가 0보다 큰 경우에,

$$\begin{aligned} Q(x) &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{12} e^{-\frac{x^2}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2}{3}x^2} \\ &\approx \frac{1}{3} - \frac{5}{24}x^2 \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 위 근사적인 Q 함수를 사용하면, 위 식들을 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$P_{fa}(\epsilon, m, \tau) \approx \frac{1}{3} - \frac{5}{24}\left(\frac{\epsilon}{\sigma_u^2} - 1\right)^2 m\tau f_s \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_{md}(\epsilon, m, \tau) &\approx \frac{1}{3} - \frac{5}{24}\left(-\frac{\epsilon}{\sigma_u^2} + \gamma + 1\right)^2 \frac{m\tau f_s}{2\gamma + 1} \\ &= \frac{1}{3} - Dm\tau \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P_d(\epsilon, m, \tau) &= 1 - P_{md}(\epsilon, m, \tau) \\ &= \frac{2}{3} + Dm\tau \end{aligned} \quad (16)$$

$$D(\epsilon) = \frac{5}{24}\left(-\frac{\epsilon}{\sigma_u^2} + \gamma + 1\right)^2 \frac{f_s}{2\gamma + 1} > 0 \quad (17)$$

결국 목적 함수는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} g(m, \tau) &= \alpha c(\tau)m \\ &\quad - \frac{T-\tau}{T}\left(\frac{2}{3} + \frac{5}{24}\left(\frac{\epsilon}{\sigma_u^2} - 1\right)^2 f_s m\tau\right)R \end{aligned} \quad (18)$$

이를 아래와 같이 간단히 할 수 있다. 여기서 상수

부분은 제거하여도 최적화 문제의 결과에 영향을 미치지 않으므로 제거하였다.

$$g(m, \tau) = \alpha c(\tau)m - \frac{T - \tau}{T}(R + Zm\tau) \quad (19)$$

$$Z = \frac{5}{16} \left( \frac{\epsilon}{\sigma_u^2} - 1 \right)^2 f_s > 0 \quad (20)$$

이를 조금 변경하면,

$$g(m, \tau) = \alpha c(\tau)Tm - (T - \tau)(R + Zm\tau) \quad (21)$$

최소화시켜야 하는 목적 함수는 이를 고려하여 최종적으로 다음과 같이 단순화 된다.

$$\begin{aligned} g(m, \tau) &= Zm\tau^2 + (R - TZm + \alpha c_1 Tm)\tau \\ &+ \alpha c_0 Tm \end{aligned} \quad (22)$$

제약조건은 다음과 같다.

$$P_d(\epsilon, m, \tau) = \frac{2}{3} + Dm\tau \geq \overline{P}_d \quad (23)$$

이를 다시 쓰면,  $m\tau \geq \left( \overline{P}_d - \frac{2}{3} \right) / D$  이다. 즉,  $\epsilon$ 과  $m$  값이 주어진 상황에서  $\tau$ 의 최소값은 다음과 같다.

$$\tau_{\min}(m) = \left( \overline{P}_d - \frac{2}{3} \right) / (Dm) \quad (24)$$

일반적으로  $\overline{P}_d$ 가 0.9 정도의 값을 가지기 때문에  $\tau_{\min}(m)$ 은 양의 값을 가진다.

이 때, 센싱 시간  $\tau$ 는 임의의 양의 실수 값을 가질 수 있지만, 센싱 CU 수  $m$ 은 양의 정수 값만을 가질 수 있다. 따라서 제안하는 최적화 문제는 혼합 정수 계획법 문제 해당된다. 그리고  $m$  값이 주어진 상황에서, 주어진 목적함수는  $\tau$ 의 이차 함수로써 콘벡스 함수이다. 제약조건이 없는 경우에  $\tau$ 의 최적값은 다음과 같다.

$$\tau^*(m) = - \frac{R + (\alpha c_1 T - TZ)m}{2Zm} \quad (25)$$

여기에  $\tau$ 에 대한 제약조건이 적용되면  $\tau$ 의 최적값은 다음과 같이 수정된다.

만일  $\tau^*(m) \geq \tau_{\min}(m)$  이면

$\tau_{opt}(m) = \tau^*(m)$  이고, 이 때 목적 함수의 값은 식 (24)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} g(m, \tau^*) &= \alpha c_0 Tm \\ &- \frac{(R + (\alpha c_1 T - TZ)m)^2}{4Zm} \end{aligned} \quad (27)$$

만일  $\tau^*(m) < \tau_{\min}(m)$  이면,

$\tau_{opt}(m) = \tau_{\min}(m)$  이다. 이 경우의 목적 함수의 값은 다음과 같아지고, 상수 부분( $RT$ )은 제거하여도 최적화 문제의 결과에 영향을 미치지 않으므로 제거하였다.

$$\begin{aligned} g(m, \tau_{\min}(m)) &= Zm\tau_{\min}^2 + R\tau_{\min} \\ &+ (\alpha c_1 T - TZ)m\tau_{\min} + \alpha c_0 Tm \\ &= \frac{Z(\overline{P}_d - 2/3)^2}{D^2m} + \frac{R(\overline{P}_d - 2/3)}{Dm} \\ &+ \frac{(\alpha c_1 T - TZ)(\overline{P}_d - 2/3)}{D} + \alpha c_0 Tm \end{aligned} \quad (28)$$

그런데, 일반적으로 가능한 변수값들을 사용하면,  $\tau^*$ 는 0보다 작은 값이 된다. 따라서  $\tau^*(m) < \tau_{\min}(m)$ 이라고 간주할 수 있다. 최소 목적함수의 값은 식 (28)로 나타낼 수 있다.  $m$  값을 하나씩 증가시키면서 각  $m$  값에서의  $\tau$ 의 최적값을 구하고 이 값들을 서로 비교해서 가장 최적의  $m$  값을 구하면, 최적의  $m$ 과  $\tau$ 을 구할 수 있다. 최적  $m$  값은  $dg(m)/dm$ 이 0인 점이다.

$$\begin{aligned} \frac{dg}{dm} &= \alpha c_0 T - \frac{ZK^2}{m^2} - \frac{RK}{m^2} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (29)$$

$$K = (\overline{P}_d - 2/3) / D \quad (30)$$

위 식 (29)를 다시 쓰면,

$$\alpha c_0 T m^2 - ZK^2 - RK = 0 \quad (31)$$

따라서 위 식을 만족하는  $m$  값은 아래와 같다.

$$m^* = \sqrt{\frac{K(ZK + R)}{\alpha c_0 T}} \quad (32)$$

여기에서  $m$ 은 정수값을 취하므로 최적 값은 식 (32)에 가장 가까운 정수값을 취하면 된다. 이 최적  $m$  값은 에너지 비용의 계수  $\alpha c_0$ 에 의해서 영향을 받는다. 에너지 비용 계수가 클수록 최적  $m$  값은 감소하고 이는 협업 센싱의 필요성이 감소한다는 의미이다.

#### IV. 성능 결과

여기에서는 센싱에 참여하는 CU 단말의 수에 따른 전송 CU의 전송률의 변화를 살펴본다. 각 파라미터의 수치는 다음과 같다. 센싱 주기  $T$ 는 1초이다.  $\overline{P_d}$ 는 0.9이다.  $\epsilon/\sigma_u^2$ 은 1.1로 한다.  $\gamma$ 는 10 dB와 0dB의 두 경우를 고려한다.  $f_s$ 는 6MHz이다.  $R$ 은 6Mbps이다.  $\alpha$ 는 1이고,  $c_0$ 와  $c_1$  값은 동일하다고 가정하고 이를 변화시키면서 성능 결과를 살펴본다.

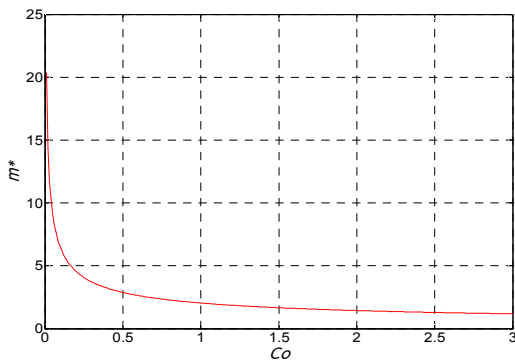


그림 2. 에너지 비용 계수  $c_0$ 의 변화에 따른 최적 센싱 단말 수,  $\gamma = 0dB$ .

Fig. 2. The optimal number of cooperative sensing cognitive users with respect to energy cost coefficient  $c_0$ ,  $\gamma = 0dB$ .

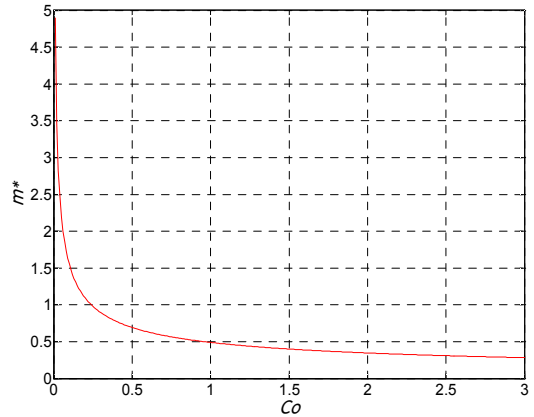


그림 3. 에너지 비용 계수  $c_0$ 의 변화에 따른 최적 센싱 단말 수,  $\gamma = 10dB$ .

Fig. 3. The optimal number of cooperative sensing cognitive users with respect to energy cost coefficient  $c_0$ ,  $\gamma = 10dB$ .

그림 2는 SNR  $\gamma = 0dB$  일 때에 에너지 비용 계수  $c_0$ 의 변화에 따른 최적 협업 센싱 단말 수  $m$ 의 변화를 그린 것이다. 에너지 계수가 증가할수록 최적 센싱 단말수가 감소함을 알 수 있다. 그림 3은  $\gamma = 10dB$  일 때의 결과이다. SNR이 클수록 최적 센싱 단말 수가 더 줄어들음을 알 수 있다. 이는 SNR이 크면 동일한 조건에서 센싱의 정확도가 증가하기 때문이다.

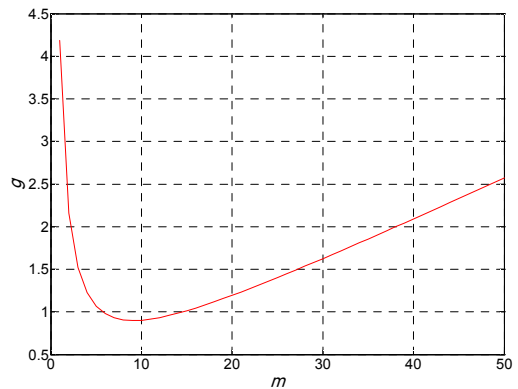


그림 4. 센싱 단말 수의 변화에 따른 목적 함수 값,  $\gamma = 0dB$ ,  $c_0 = c_1 = 0.05$ .

Fig. 4. The objective function value with respect to the number of cooperative sensing cognitive users,  $\gamma = 0dB$ ,  $c_0 = c_1 = 0.05$ .

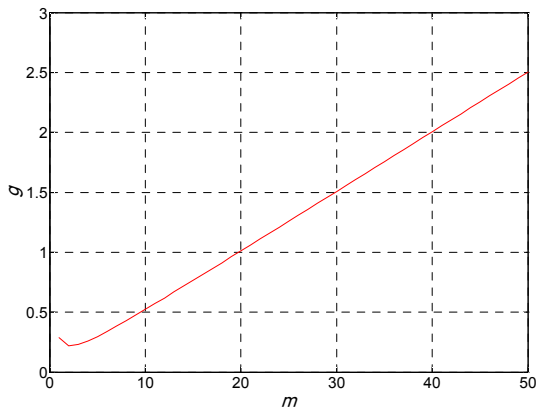


그림 5. 센싱 단말 수의 변화에 따른 목적 함수 값,  
 $\gamma = 10dB, c_0 = c_1 = 0.05$ .  
 Fig. 5. The objective function value with respect to the number of cooperative sensing cognitive users,  
 $\gamma = 10dB, c_0 = c_1 = 0.05$ .

그림 4는 SNR  $\gamma = 0dB$  일 때에 센싱 단말 수  $m$ 의 변화에 따른 목적 함수 값의 변화를 그린 것이다. 에너지 비용 계수  $c_0$  는 0.05 인 경우를 그렸다. 그림 5는  $\gamma = 10dB$  일 때의 결과이다. SNR이 클수록 최적 센싱 단말 수가 더 줄어들며 이는 협업 센싱의 필요성이 줄어드는 것을 의미한다.  $m$ 이 1 인 경우는 협업 센싱이 필요없는 경우를 의미하게 된다.

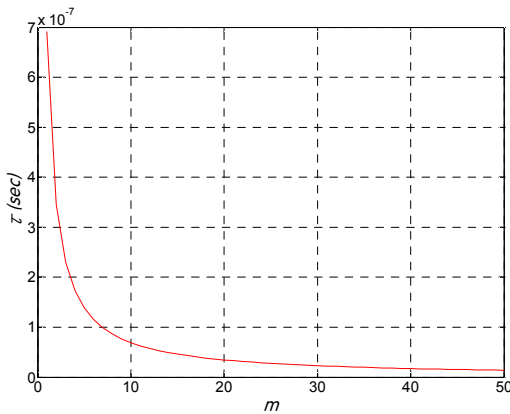


그림 6. 센싱 단말 수의 변화에 따른 최적 센싱 시간,  
 $\gamma = 0dB, c_0 = c_1 = 0.05$ .  
 Fig. 6. The total sensing time with respect to the number of cooperative sensing cognitive users,  
 $\gamma = 0dB, c_0 = c_1 = 0.05$ .

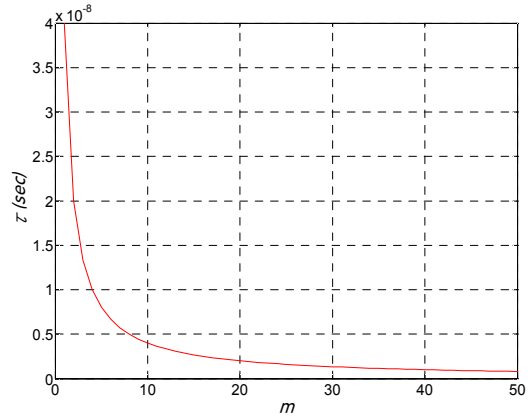


그림 7. 센싱 단말 수의 변화에 따른 최적 센싱 시간,  
 $\gamma = 10dB, c_0 = c_1 = 0.05$ .  
 Fig. 7. The total sensing time with respect to the number of cooperative sensing cognitive users,  
 $\gamma = 10dB, c_0 = c_1 = 0.05$ .

그림 6은 SNR  $\gamma = 0dB$  일 때에 센싱 단말 수  $m$ 의 변화에 따른 최적 센싱 시간의 변화를 그린 것이다. 에너지 비용 계수  $c_0$  는 0.05 인 경우이다. 그림 7은  $\gamma = 10dB$  일 때의 결과이다. SNR이 클수록 최적 센싱 시간이 더 줄어들을 볼 수 있다. 또한 센싱 단말 수가 증가하면 센싱 시간은 계속 감소하게 된다. 센싱 시간의 크기는 센싱 주기에 비해서 상당히 작다. 이는 에너지 센싱을 가정했기 때문이다. 신호 특성에 기반한 센싱을 사용하는 경우에는 센싱 시간은 훨씬 커질 것이다.

### V. 결 론

본 논문에서는 무선인지통신 시스템에서 에너지 검출에 기반한 협업 스펙트럼 센싱을 하는 경우에 최적 센싱 시간 및 협업 센싱 단말수를 혼합 정수 계획법을 이용하여 도출하였다. 협업 센싱으로 인한 센싱 시간의 감소와 이로 인한 전송률의 이득과 더불어 에너지 비용의 증가를 고려한 최적화 문제를 제시하고 그 최적값을 도출하였다.

향후 연구 방향으로서는 에너지 검출 대신 수신 신호의 특성 검출에 기반한 연구가 필요하다. 특성 검출시 더 우수한 스펙트럼 센싱이 가능하지만, 센싱 시간이 에너지 검출에 비해서 훨씬 크기 때문에 이를

고려한 연구가 필요하다. 하지만 아직까지 특성 검출 성능에 대한 확률 분포 도출 등에 대한 명확한 결과가 나오지 않은 상황이다. 본 논문에서 제안한 접근 방식은 향후 특성 검출에 기반한 협업 센싱에도 유사하게 적용될 수 있을 것이다. 그 외에 협업 센싱 샘플 수를 매 센싱 주기의 시작점에서 고정적으로 정하지 않고 센싱 결과에 따라 적응적으로 변화시키는 방식에 대한 연구가 현재 진행 중에 있다.

### 감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00518)

### 참 고 문 헌

- [1] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE JSAC*. vol. 23, no. 2, Feb. 2005.
- [2] IEEE 802.22 WRAN Systems, 2006.
- [3] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs," *IEEE Communications magazine*, pp. 32-39, Apr. 2008.
- [4] Z. Quan, et al., "Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 2, no. 1, pp. 28-40, Feb. 2008.
- [5] Y. C. Liang, et al., "Sensing -throughput tradeoff for cognitive radio networks," *IEEE Tr. Wireless communications*, vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, Apr. 2008.
- [6] K. Kim, et al., "Cyclostationary approaches to signal detection and classification in cognitive radio," *IEEE DySPAN'2007*, pp.212-215, 2007.
- [7] A. T. Hoang, et al., "Oppoutunisitic spectrum access for energy-constrained cognitive radio," *VTC'2008 spring*, pp. 1559-1563, 2008.
- [8] W. Wang, et al., "On the distributed cooperative spectrum sensing for cognitive radio," *ISCIT'2007*, pp. 1496-1501, 2007.
- [9] M.Chiani and D. Dardari, "Improved exponential bounds and approximation for the Q-function with application with average error probability computation," *IEEE Globecom'2002*, pp.1399-1402, 2002.

### 이 동 준 (李東俊)



1994년 2월 : 한국과학기술원 전기및 전자공학과(공학사)  
1996년 2월 : 한국과학기술원 전기및 전자공학과(공학석사)  
2000년 8월 : 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)

2000년 9월 ~ 2005년 2월: 삼성전자 책임연구원

2005년 3월 ~ 현재: 한국항공대학교 조교수

관심분야 : P2P, 무선자원 관리, 무선인지통신시스템

### 이 명 진 (李明辰)



1994년 2월 : 한국과학기술원 전기및 전자공학과(공학사)

1996년 2월 : 한국과학기술원 전기및 전자공학과(공학석사)

2001년 8월 : 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)

2001년 3월 ~ 2004년 2월: 삼성전자 SYSTEM LSI 책임

2004년 3월 ~ 2007년 2월: 경성대학교 전기전자공학과 교수

2007년 3월~ 현재: 한국항공대학교 조교수

관심분야 : 멀티미디어 통신, 무선통신시스템, SoC 설계