

무선 인지 네트워크에서 군집형 데이터 슬롯의 미검출 확률 추정에 기반한 최적 스펙트럼 센싱 구조

Optimal Spectrum Sensing Framework based on Estimated Miss Detection Probability for Aggregated Data Slots in Cognitive Radio Networks

우혁*, 이동준*

Hyuk Wu*, Dong-Jun Lee*

요 약

무선 인지 네트워크의 많은 연구는 한 번의 스펙트럼 센싱 수행으로 한 개의 데이터 슬롯을 전송하는 프레임 구조에 대하여 연구하였다. 프레임 길이가 짧은 경우, 데이터 전송률이 낮아지는 문제가 있다. 본 논문에서는 한 번의 스펙트럼 센싱 수행으로 다수의 데이터 슬롯을 전송하는 군집형 데이터 슬롯 구조에 대해서 연구한다. 이를 위해서 Chapman-Kolmogorov 방정식을 이용하여 선순위 사용자의 전송 확률을 모델링하고 이를 이용하여 후순위 사용자의 전송률을 최대화하기 위한 최적화 문제를 제시한다. 최적화 문제의 해를 구하여 최적의 스펙트럼 센싱 시간과 데이터 슬롯의 길이와 군집할 데이터 슬롯의 수를 도출한다.

Abstract

In cognitive radio networks, several research works typically address the framework which consists of a spectrum sensing period and a data transmission period. When the frame period is short, there is the problem that the throughput of secondary users decrease. In this paper, aggregated data slot structure is considered to increase the throughput of secondary users. Chapman-Kolmogorov equation is used for the modeling of the transmission probability of primary users and formulation of an optimization problem to maximize the throughput of secondary users. Solution of the optimization problem results in the optimal spectrum sensing time, the length of data slot and the number of data slots governed by a spectrum sensing.

Key words : Aggregated data slots, Chapman-Kolmogorov equation, Cognitive radio, Estimated miss detection probability

I. 서 론

무선 인지 네트워크 (cognitive radio networks) 에서 선순위 사용자 (primary user) 에게 할당된 주파수 채널을 선순위 사용자가 사용하지 않을 때, 후순위 사

용자 (secondary user) 는 이 채널을 발견하여 선순위 사용자가 해당 채널에서 데이터 전송을 재개하기 전 까지 사용할 수 있다 [1-3]. 후순위 사용자는 사용 가능한 주파수 채널을 찾기 위하여 스펙트럼 센싱 (spectrum sensing) 을 수행한다. 스펙트럼 센싱의 결

* 한국항공대학교 정보통신공학부 (Information & Telecommunication Engineering, Korea Aerospace University)

· 제1저자 (First Author) : 우혁(Hyuk Wu, tel : +82-10-2590-9900, email : amuse98@kau.ac.kr)

· 접수일자 : 2013년 8월 22일 · 심사(수정)일자 : 2013년 8월 24일 (수정일자 : 2013년 10월 23일) · 게재일자 : 2013년 10월 30일

<http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.5.506>

과 선순위 사용자 신호가 부재인 경우에 후순위 사용자가 해당 주파수 채널을 사용할 수 있다.

무선 인지 네트워크에서 스펙트럼 센싱 시간을 최적화하기 위한 연구가 있다 [4-13]. 선순위 사용자에게 미치는 무선 간섭 (interference) 영향을 일정 수준 이하로 유지하며 전송률을 최대화시키는 접근 방식을 사용하였다. 그러나 선순위 사용자에게 미치는 무선 간섭을 실제 상황에서 측정하기는 매우 어렵기 때문에 대부분의 연구에서 스펙트럼 센싱에서 선순위 사용자 신호의 미검출 (miss detection) 확률을 무선 간섭을 대신하여 사용하였다.

선순위 사용자 신호의 미검출은 선순위 사용자 신호가 존재하는 상황에서 후순위 사용자가 선순위 사용자의 신호 상태를 부재로 잘못 판단한 경우이다. 이 경우 후순위 사용자 데이터 전송은 선순위 사용자에게 무선 간섭으로 작용한다.

반대로 선순위 사용자 신호가 부재인 상황에서 후순위 사용자가 선순위 사용자의 신호 상태를 존재로 잘못 판단한 경우를 선순위 사용자 신호의 오경보 (false alarm) 라 한다. 이 경우 후순위 사용자는 주파수 채널을 사용가능한 상황에서 데이터를 전송하지 않으므로써 후순위 사용자의 전송률이 감소한다.

스펙트럼 센싱 구간이 충분한 경우에는 센싱 정확도가 증가하여 미검출 확률과 오경보 확률을 감소한다. 그러나 데이터 전송 구간이 짧은 경우에 충분한 스펙트럼 센싱 구간을 확보할 경우, 상대적으로 데이터 전송 구간의 비율이 낮아 전송률이 감소한다. 반대로 스펙트럼 센싱 구간이 짧은 경우, 센싱 정확도가 감소하여 미검출 확률 증가로 무선 간섭이 증가하고 오경보 확률 증가로 전송률이 감소한다.

기존의 많은 연구들은 한 번의 스펙트럼 센싱을 수행하여 한 개의 데이터 구간을 전송하는 구조에서, 전송률 최대화를 위하여 스펙트럼 센싱 구간과 데이터 전송 구간의 최적 구조에 대하여 연구하였다. 그러나 이 구조는 데이터 전송 슬롯의 길이가 짧은 경우에 스펙트럼 센싱 구간이 차지하는 비율 증가로 전송률이 급격히 감소하는 문제가 있다.

한편 한 번의 스펙트럼 센싱 수행으로 다수의 데이터 슬롯을 전송하는 군집형 데이터 슬롯 구조에서는 각 데이터 슬롯에서 차지하는 스펙트럼 센싱 구간

의 비율을 감소시켜 전송률을 증가시킬 수 있다. 그러나 스펙트럼 센싱 시점의 센싱 결과를 다수의 데이터 슬롯에 적용할 경우 선순위 사용자 신호의 상태 천이 확률을 고려해야 한다. 스펙트럼 센싱 시점에는 선순위 사용자 신호가 부재이고 후순위 사용자가 이를 정확히 센싱 하였더라도 데이터 슬롯이 증가함에 따라 선순위 사용자 신호가 존재 상태로 천이할 확률이 증가한다. 이는 선순위 사용자에게 무선 간섭으로 작용한다. 그러므로 각 데이터 슬롯에서 선순위 사용자 신호의 상태 천이 확률을 고려한 미검출 확률 추정이 필요하다. 하지만 이러한 문제를 직접적으로 다룬 논문들은 아직까지는 없었으며, 본 논문에서는 여기에 대해서 연구한다.

본 논문에서는 각 데이터 슬롯에서의 미검출 확률 추정을 위하여 Chapman-Kolmogorov 방정식을 이용한다. 스펙트럼 센싱 이후 각 데이터 슬롯까지의 경과 시간을 고려하고 경과시간에 따른 선순위 사용자의 상태가 변화할 확률을 도출한다. 이를 이용하여 각 데이터 슬롯에서의 미검출 확률을 예측하고 모든 데이터 슬롯에서의 미검출 확률이 요구값을 만족시키도록 한다. 이 조건하에서 전송률을 최대화하는 최적화 문제를 정의하고 최적의 군집형 데이터 슬롯 수와 데이터 슬롯 길이와 스펙트럼 센싱 시간을 찾고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 스펙트럼 센싱과 제안한 프레임 구조와 선순위 사용자의 신호 모델링에 대한 시스템 모델을 설명한다. III장에서는 Chapman-Kolmogorov 방정식을 이용하여 각 데이터 슬롯에서의 미검출 확률을 추정하고 수학적 분석을 통하여 최적화 문제를 정의한다. IV장에서는 성능 결과를 분석하고, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2-1 스펙트럼 센싱

후순위 사용자는 허가된 주파수를 할당 받은 선순위 사용자의 통신을 방해하지 않고 선순위 사용자 신

호가 존재하지 않는 경우에만 주파수를 사용해야 한다. 후순위 사용자가 주파수를 사용하는 중에도 선순위 사용자 신호 상태를 주기적으로 확인하여 선순위 사용자 신호를 감지하였을 경우, 후순위 사용자는 해당 주파수의 사용을 즉시 중지해야 한다. 이와 같이 후순위 사용자는 선순위 사용자의 신호 감지를 위하여 스펙트럼 센싱을 수행한다.

본 논문에서 스펙트럼 센싱 방식으로 에너지 검출 (energy detection) 방식을 이용한다 [5]. 에너지 검출 방식은 특정 주파수 대역에서 수신된 신호의 에너지 레벨을 측정하여 선순위 사용자의 존재 유무를 판단하는 기법이다. 수신된 신호에는 선순위 사용자 신호 뿐만 아니라 잡음도 함께 섞여있으므로 잡음의 영향을 고려하기 위해 일반적으로 평균이 0인 백색 가우스 잡음 (white Gaussian noise) 이 함께 수신된다고 가정한다. 에너지 검출 방식을 사용하는 경우 무선 인지 네트워크는 수신 에너지가 미리 정해진 임계 값을 넘지 못하면 해당 대역에 선순위 사용자 신호가 존재하지 않는다고 판단하며 (H_0), 반대로 수신 에너지가 임계 값을 넘으면 선순위 사용자 신호가 존재한다고 판단한다 (H_1). 에너지 검출 방식은 샘플기와 덧셈기를 사용해 쉽게 구현이 가능하며, 사전 정보 없이 선순위 사용자를 검출할 수 있다는 장점이 있다.

후순위 사용자가 에너지 검출기를 통하여 k 번째 시간에 수신한 신호 상태를 다음과 같이 나타낸다.

$$H_0 : y(k) = u(k) \quad (1)$$

$$H_1 : y(k) = s(k) + u(k) \quad (2)$$

여기서 $u(k)$ 는 잡음이고 $s(k)$ 는 선순위 사용자의 신호이다. 선순위 사용자 신호가 존재하는 상태에서 후순위 사용자가 선순위 사용자의 신호가 없다고 잘못 판단할 확률을 미검출 확률이라 한다. 미검출의 경우, 선순위 사용자 신호가 존재하는 상태에서 후순위 사용자도 신호를 전송하게 되어 선순위 사용자에게 무선 간섭으로 작용한다. 미검출 확률은 $P(\text{choose } H_0 | H_1 \text{ true})$ 으로 나타낸다. 선순위 사용자 신호가 없는 상태에서 후순위 사용자는 선순위 사용자 신호가 존재한다고 잘못 판단할 확률을 오경보 확률이라 한다.

오경보는 선순위 사용자가 주파수 채널을 사용하지 않음에도 후순위 사용자가 해당 주파수 채널을 사용하지 않음으로 후순위 사용자의 성능 저하 요인이 된다. 오경보 확률은 $P(\text{choose } H_1 | H_0 \text{ true})$ 으로 나타낸다.

에너지 검출기는 다음과 같이 나타낸다.

$$X = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |y(k)|^2 \begin{cases} \geq \eta \Rightarrow H_1 \\ < \eta \Rightarrow H_0 \end{cases} \quad (3)$$

여기서 N 은 스펙트럼 센싱 샘플의 수이고 η 는 선순위 사용자 신호의 존재 유무를 판단하기 위한 결정 임계치이다. H_0 상태에서 $y(k)$ 는 잡음 $u(k)$ 만 존재한다. H_1 상태에서 $y(k)$ 는 선순위 사용자 신호 $s(k)$ 와 잡음 $u(k)$ 가 함께 존재한다.

샘플 수 N 은 $N = t f_s$ 로부터 구할 수 있으며, 여기서 f_s 는 샘플링 주파수 (sampling frequency) 이고, t 는 샘플링 시간이다. 후순위 사용자는 선순위 사용자 신호의 발신지 근처에 위치하고, 선순위 사용자 신호 SNR 과 후순위 사용자의 페이딩 영향 (fading effect) 은 거의 동일하다고 가정한다. 잡음 $u(k)$ 는 평균과 분산이 $(0, \sigma_u^2)$ 인 가우시안 (Gaussian) 이고 독립적이며 같은 분포를 따르는 확률과정 (independent and identically distributed random process) 으로 가정한다. 선순위 사용자 신호 $s(k)$ 는 평균과 분산이 $(0, \sigma_s^2)$ 인 가우시안이고 독립적이며 같은 분포를 따르는 확률과정으로 가정한다. 그리고 $u(k)$ 와 $s(k)$ 는 서로 독립이다. 잡음은 circularly symmetric complex Gaussian 으로 가정하고, 선순위 사용자 신호는 complex PSK 변조로 가정한다 [5]. H_0 상태에서 X 의 pdf 는 자유도가 $2N$ 인 카이스퀘어 분포 (chi-square distribution) 이다. 샘플 수 N 이 충분히 크다고 가정하면 $T(y)$ 는 중심 극한 이론 (central limit theorem) 에 의해 정규분포로 근사화가 가능하다. 그러므로 H_0 상태에서 X 의 평균과 분산은 각각 $\theta_0 = \sigma_u^2$ 과 $\sigma_0^2 = 2\sigma_u^4/N$ 이다. H_1 상태에서 X 의 평균과 분산은 각각 $\theta_1 = (\gamma + 1)\sigma_u^2$ 과 $\sigma_1^2 = (2\gamma + 1)2\sigma_u^4/N$ 이다. 여기서 γ 은 선순위 사용자 신호의 SNR이다 [5].

스펙트럼 센싱 시간 τ 를 갖는 후순위 사용자의 미검출 확률은 P_{md} 로 표시하며 다음과 같다.

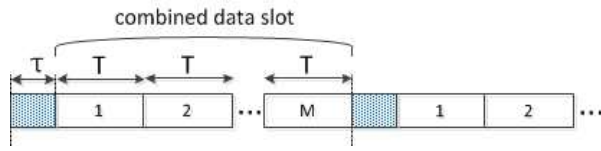


그림 1. M 개의 데이터 슬롯이 결합한 스펙트럼 센싱 프레임 구조

Fig. 1. Spectrum sensing framework with M combined data slots.

$$P_{md}(\tau) = \Phi\left(\frac{\eta - \theta_1}{\sigma_1}\right) \quad (4)$$

여기서 $\Phi(\cdot)$ 은 표준 정규 분포 함수 (standard normal distribution function) 이다.

후순위 사용자의 오경보 확률은 Pfa 로 표시하며 다음과 같다.

$$P_{fa}(\tau) = 1 - \Phi\left(\frac{\eta - \theta_0}{\sigma_0}\right). \quad (5)$$

2-2 프레임 구조

그림 1은 후순위 사용자의 MAC 프레임 구조이다. 여기서 τ 는 스펙트럼 센싱 길이이고, T 는 데이터 전송을 위한 슬롯 길이이다. 한 프레임은 한 개의 스펙트럼 센싱 구간과 M 개의 데이터 슬롯으로 구성한다. 한 번의 스펙트럼 센싱 결과를 M 개의 데이터 슬롯에서 이용한다.

2-3 선순위 사용자 신호 모델링

선순위 사용자 신호는 지수 시간 분포 (exponential-time distribution) 의 부존재 (idle) 와 존재 (busy) 의 두 가지 상태를 갖고, 각각 α, β 의 상태 천이율을 가지는 마르코프 프로세스 모델 (Markov process model) 로 모델링 할 수 있다. 그림 2는 마르코 프로세스 모델을 이용한 선순위 사용자 신호의 상태 천이도를 나타낸다. 선순위 사용자 신호가 부존재 상태인 경우 0 으로 표시하고, 존재 상태인 경우 1 로 표시한다. 선순위 사용자가 주파수 채널을 사용하는

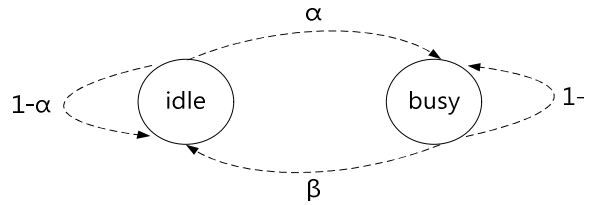


그림 2. 마르코프 프로세스 모델을 이용한 선순위 사용자의 상태 천이도.

Fig. 2. The state-transition diagram of the Markov process for activity of primary user signal activity.

평균 확률은 $\bar{P}_1 = \alpha / (\alpha + \beta)$ 이고, 주파수 채널을 사용하지 않는 평균 확률은 $\bar{P}_0 = \beta / (\alpha + \beta)$ 이다. 선순위 사용자 신호가 특정 순간에 i 상태에서 t 시간 이후에 j 상태로 천이할 확률을 Chapman-Kolmogorov 방정식을 이용하여 $p_{ij}(t)$ 로 나타낸다. $p_{ij}(t)$ 의 모든 경우의 확률은 다음과 같다 [14].

$$p_{01}(t) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} - \frac{\alpha}{\alpha + \beta} e^{-(\alpha + \beta)t}, \quad (6)$$

$$p_{11}(t) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} + \frac{\beta}{\alpha + \beta} e^{-(\alpha + \beta)t}, \quad (7)$$

$$p_{00}(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} + \frac{\alpha}{\alpha + \beta} e^{-(\alpha + \beta)t}, \quad (8)$$

$$p_{10}(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} - \frac{\beta}{\alpha + \beta} e^{-(\alpha + \beta)t}. \quad (9)$$

선순위 사용자 신호의 상태를 각 데이터 슬롯에서 결정시 상태 천이 확률 행렬 (state transition probability matrix) 을 이용한다.

$$Q = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} p_{00} &= p_{00}(t), \\ p_{01} &= p_{01}(t), \\ p_{10} &= p_{10}(t), \\ p_{11} &= p_{11}(t). \end{aligned}$$

III. 수학적 성능 분석

한 번의 스펙트럼 센싱으로 다수의 데이터 슬롯을 전송하는 경우에 선순위 사용자 신호는 후순위 사용자의 데이터 슬롯 전송 중에 상대 천이 할 수 있다. 그러므로 각 데이터 슬롯에 대해서 미검출 확률을 추정할 필요가 있다.

후순위 사용자의 각 데이터 슬롯에서 선순위 사용자 신호의 미검출은 두 가지의 경우가 존재한다. 우선 스펙트럼 센싱 시에 선순위 사용자 신호가 존재 상태에서 후순위 사용자는 부재로 잘못 판단하였고, i 번째 데이터 슬롯에서 선순위 사용자 신호가 그대로 존재하면 이는 i 번째 데이터 슬롯의 선순위 사용자 신호 미검출이다. 그리고 스펙트럼 센싱 시에 선순위 사용자 신호가 부재 상태에서 후순위 사용자가 신호가 부재로 정확히 판단하였다. 그러나 i 번째 데이터 슬롯에서 선순위 사용자 신호 상태가 존재 상태로 천이하면 이는 i 번째 데이터 슬롯의 선순위 사용자 신호 미검출이다. 이 두 가지 경우의 합이 i 번째 데이터 전송 영역의 선순위 사용자 신호 미검출 확률이며 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} P_{md,i}(\tau) &= [P_{md}(\tau) | H_1] P_{11}^{(i)} + [(1 - P_{fa}(\tau)) | H_0] P_{01}^{(i)} \\ &= \bar{P}_1 P_{md}(\tau) P_{11}^{(i)} + \bar{P}_0 (1 - P_{fa}(\tau)) P_{01}^{(i)} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 스펙트럼 센싱 시점에 선순위 사용자 신호가 존재 상태에서 이후 i 번째 슬롯에서 선순위 사용자의 신호가 존재 상태일 확률은 다음과 같다.

$$P_{11}^{(i)} = [0 \ 1] Q^i \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

스펙트럼 센싱 시점에 선순위 사용자 신호가 부재 상태에서 이후 i 번째 슬롯에서 선순위 사용자의 신호가 존재 상태일 확률은 다음과 같다.

$$P_{01}^{(i)} = [1 \ 0] Q^i \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

후순위 사용자는 선순위 사용자 신호가 부존재 상태로 판단한 경우에 데이터를 전송한다. 그러나 선순위 사용자 신호가 부재인 상태에서 스펙트럼 센싱 오류로 인하여 오경보가 발생할 경우, 후순위 사용자는 데이터를 전송하지 않는다. 반면에 선순위 사용자 신호가 존재인 상태에서 스펙트럼 센싱 오류로 인하여 미검출이 발생할 경우, 후순위 사용자는 데이터를 전송한다. 후순위 사용자의 데이터 전송 확률을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i(\tau) = \bar{P}_0 (1 - P_{fa}(\tau)) + \bar{P}_1 P_{md}(\tau). \quad (14)$$

프레임 구조에서 스펙트럼 센싱 구간이 차지하는 비율은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\tau}{\tau + MT}. \quad (15)$$

후순위 사용자의 정규 전송률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(\tau, T, M) = (1 - \lambda) P(\tau). \quad (16)$$

데이터 슬롯 길이 T 와 결합된 데이터 슬롯 수 M 의 프레임 구조에서 정규 전송률을 최대화하기 위한 최적화 문제를 다음과 같이 나타냈다.

$$\begin{aligned} \max_{\tau, T, M} & R(\tau, T, M) \\ \text{s.t.} & P_{md,i}(\tau, M | H_1) \leq \delta \quad \forall i, \\ & 0 < i \leq M, \\ & \tau, T, M > 0. \end{aligned} \quad (17)$$

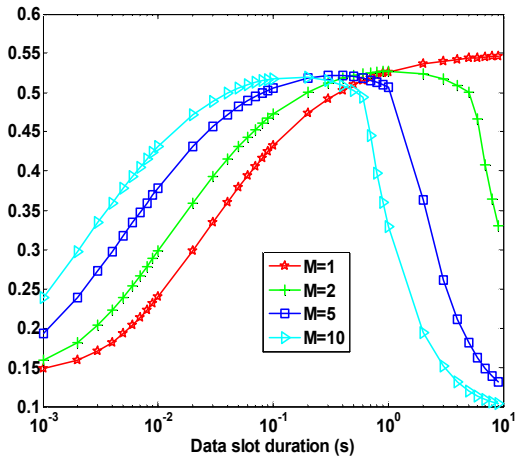


그림 3. 스펙트럼 센싱 시간이 최적인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 정규 전송률

Fig. 3. The normalized throughput with respect to data slot duration when optimal spectrum sensing time is used.

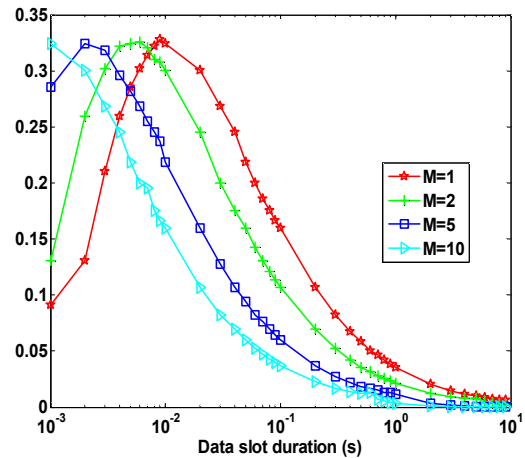


그림 5. 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 스펙트럼 센싱 시간 비율

Fig. 5. The spectrum sensing time ratio with respect to data slot duration when maximum normalized throughput is achieved.

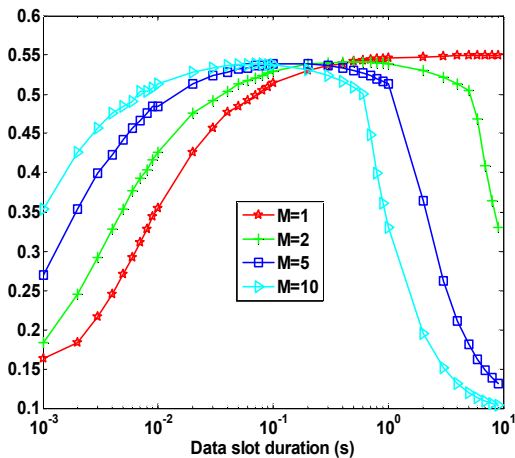


그림 4. 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 데이터 전송 확률

Fig. 4. The data transmission probability with respect to data slot duration when maximum normalized throughput is achieved.

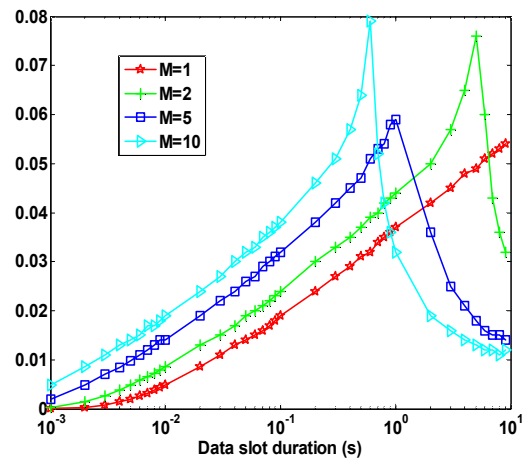


그림 6. 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 스펙트럼 센싱 시간

Fig. 6. The spectrum sensing time with respect to data slot duration when maximum normalized throughput is achieved.

여기서 δ 는 최대 허용 미검출 확률이며 모든 데이터 슬롯에서 δ 이하의 미검출 확률이어야 한다.

IV. 성능 분석 결과

성능 분석을 위한 중요 변수를 다음과 같이 설정하였다. 선순위 사용자 신호의 상태 천이 확률 α 와

β 는 0.02로 설정하였다. 선순위 사용자의 목표 (target) SNR은 -20 dB로 설정하였고, 샘플 주파수는 6 Mhz로 설정하였다. 잡음 스펙트럼 밀도 (noise spectral density) 는 -174 dBm/Hz로 가정하였다. 선순위 사용자가 존재하는 경우에 선순위 사용자에게 작용하는 최대 허용 미검출 확률 δ 를 0.1로 설정하였다.

그림 3은 스펙트럼 센싱 시간이 최적인 경우의 데

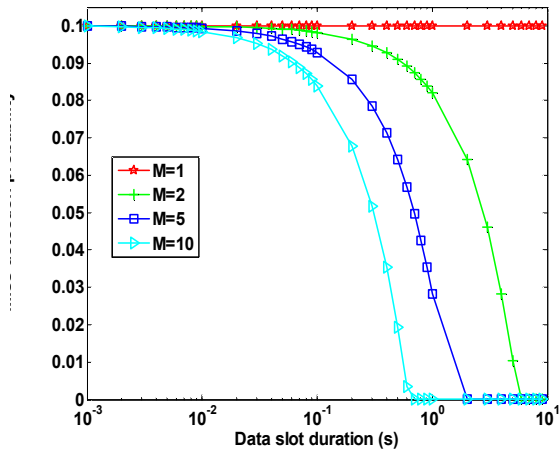


그림 7. 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 스펙트럼 센싱 시점의 미검출 확률
 Fig. 7. The miss detection probability with respect to data slot duration when maximum normalized throughput is achieved.

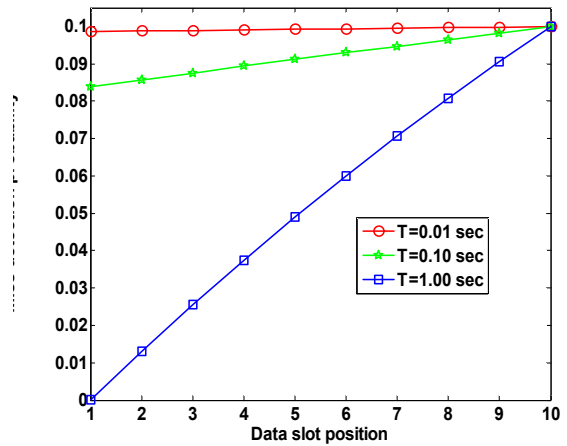


그림 9. 정규 전송률이 최대이고 결합한 데이터 슬롯 수가 10인 경우의 슬롯 위치에 따른 미검출 확률
 Fig. 9. The miss detection probability at each data slot when maximum normalized throughput is achieved and the number of combined data slot is 10.

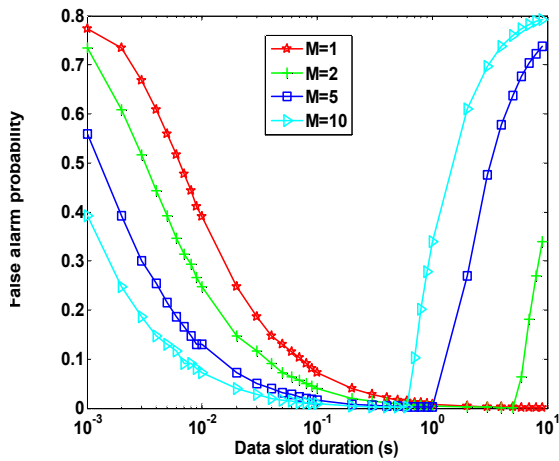


그림 8. 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 스펙트럼 센싱 시점의 오경보 확률
 Fig. 8. The false alarm probability with respect to data slot duration when maximum normalized throughput is achieved.

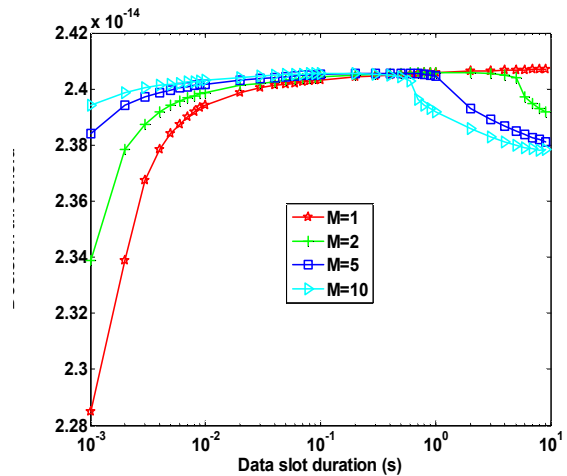


그림 10. 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 결정 임계치
 Fig. 10. The decision threshold with respect to data slot duration when maximum normalized throughput is achieved.

이더 슬롯 길이에 따른 결합한 데이터 슬롯 수 별 전송률을 나타낸다. 결합한 데이터 슬롯 수가 1인 경우, 데이터 슬롯 길이가 증가할수록 전송률이 지속적으로 증가하여 일정 값으로 수렴한다. 그러나 결합한 데이터 슬롯 수가 2 이상의 경우, 데이터 슬롯 길이가 증가할수록 전송률이 증가한다. 그러나 일정 데이터 슬롯 길이를 기점으로 전송률이 급격히 감소한다. 데이터 슬롯 길이가 짧은 경우에는 결합한 데이터 슬

롯 수가 많을수록 전송률이 높다. 그러나 결합한 데이터 슬롯 수가 2 이상의 경우, 일정 데이터 슬롯 길이를 기점으로 감소하게 되고, 데이터 슬롯 길이가 긴 경우에는 결합한 데이터 슬롯 수가 적을수록 전송률이 높다.

그림 4는 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 후순위 사용자의 데이터 전송 확률이다. 데이터 전송 확률은 그림 3의 정규 전송률과 매

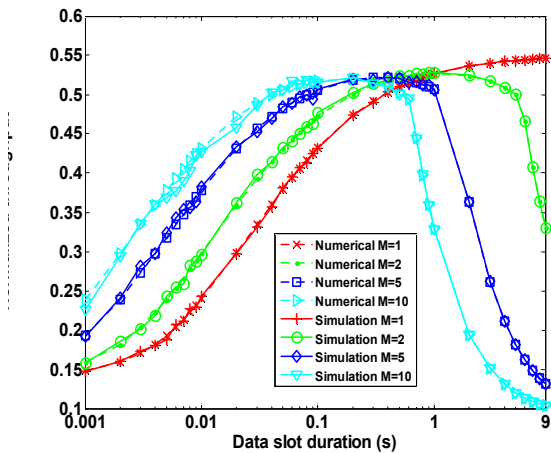


그림 11. 스펙트럼 센싱 시간이 최적인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 결합된 데이터 슬롯 수 별 수학적 정규 전송률과 시뮬레이션 정규 전송률

Fig. 11. The normalized throughput of numerical and simulation results with respect to data slot duration when optimal spectrum sensing time is used.

우 유사하다. 그러나 데이터 슬롯 길이가 짧은 구간에서는 그림 3의 정규 전송률 그래프와 차이가 크다. 그 이유는 (16) 과 그림 5에서 알 수 있다. (16) 에서 정규 전송률은 스펙트럼 센싱 프레임 구조에서 스펙트럼 센싱 시간이 차지하는 비율에 반비례하고, 데이터 전송 확률에 비례한다. 데이터 슬롯의 길이가 짧은 경우, 데이터 슬롯의 길이가 긴 경우보다 상대적으로 스펙트럼 센싱 시간의 영향을 많이 받기 때문에 차이가 크다. 반면에 데이터 슬롯 길이가 긴 경우에는 스펙트럼 센싱 시간의 변화가 스펙트럼 센싱 시간이 차지하는 비율에 미치는 영향이 적어 전송률에 미치는 영향이 크지 않다. 그러므로 데이터 슬롯 길이가 긴 경우, 정규 전송률은 데이터 전송 확률의 영향을 많이 받아 유사하게 나타난다.

그림 3에서 결합한 데이터 슬롯 수가 1 인 경우, 데이터 슬롯 길이가 증가함에 따라 전송률도 지속적으로 증가한다. 그리고 일정 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 그림 8의 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 스펙트럼 센싱 시점의 선순위 사용자 신호 오경보 확률에서 알 수 있다. 데이터 슬롯 길이가 증가함에 따라 오경보 확률이 지속적으로 감소하며 0 에 가까운 값으로 수렴한다. 이로 인하여 후순위 사용자의 데이터 전송 확

률이 지속적으로 증가하여 특정 값으로 수렴한다.

결합한 데이터 슬롯 수가 2 이상인 경우, 데이터 슬롯 길이가 증가함에 따라 전송률이 증가한다. 그러나 특정 데이터 슬롯 길이를 기점으로 전송률이 감소한다. 그 이유는 그림 8의 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 스펙트럼 센싱 시점의 오경보 확률에서 알 수 있다. 데이터 슬롯 길이가 증가함에 따라 오경보 확률은 감소한다. 그러나 후순위 사용자의 데이터 전송 확률이 감소하기 시작하는 데이터 슬롯 길이와 동일한 위치에서 오경보 확률이 증가한다. 오경보 확률의 증가로 인하여 전송률이 감소하게 된다. 오경보 확률이 증가하는 이유는 그림 6의 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 스펙트럼 센싱 시간과 그림 10의 정규 전송률이 최대인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 선순위 사용자 신호의 결정 임계치에서 알 수 있다. 데이터 슬롯 길이가 증가함에 따라 스펙트럼 센싱 시간이 증가한다. 스펙트럼 센싱 시간의 증가는 센싱하는 샘플수가 증가하게 되고, 이로 인하여 센싱의 정확도가 증가하게 된다. 센싱 정확도의 증가는 미검출 확률을 만족시키기 위한 결정 임계치의 증가로 이어지며, 이는 오경보 확률을 감소시키게 된다. 그러나 오경보 확률이 증가하기 시작하는 데이터 슬롯 길이를 기점으로 스펙트럼 센싱 시간과 결정 임계치가 감소한다. 이로 인하여 오경보 확률이 증가하게 된다. 데이터 슬롯 길이의 특정 기점에서 스펙트럼 센싱 시간이 감소하는 이유는 그림 7, 8, 9에서 알 수 있다. 모든 데이터 슬롯에서 미검출 확률이 최대 허용 미검출 확률 δ (0.1) 이하로 만족시켜야 한다. 그림 9는 정규 전송률이 최대이고 결합한 데이터 슬롯 수가 10 인 경우의 슬롯 위치에 따른 미검출 확률이다. 첫 번째 슬롯에서의 미검출 확률은 가장 낮고, 마지막 10 번째 슬롯에서의 미검출 확률은 가장 높다. 모든 슬롯에서 최대 허용 미검출 확률을 만족시켜야 함으로, 비록 마지막 슬롯 이전의 미검출 확률이 최대 허용 미검출 확률보다 낮더라도 마지막 슬롯의 미검출 확률이 최대 허용 미검출 확률을 만족시켜야 한다. 그러나 그림 7에서 미검출 확률이 0 으로 수렴하였음에도 선순위 사용자 신호의 상태 천이에 의하여 마지막 슬롯의 미검출 확률이 최대 허용 미검출 확률을 만족시키지

못하게 된다. 선순위 사용자 신호의 상태 천이를 고려하여 마지막 슬롯에서의 미검출 확률이 최대 허용 미검출 확률을 만족시키기 위해서는 데이터 전송을 하지 않아야 한다. 데이터 전송을 하지 않기 위해서는 오경보 확률을 증가시켜 데이터 전송을 하지 않으면 된다. 오경보 확률의 증가로 인하여 마지막 슬롯에서 최대 허용 미검출 확률을 만족시킬 수 있게 된다. 그러므로 제안한 방식은 선순위 사용자 신호의 상태 천이가 자주 발생하지 않고, 데이터 슬롯 길이가 짧은 경우에 기존의 방식에 비하여 상대적으로 높은 전송률을 기대할 수 있다.

그림 11은 스펙트럼 센싱 시간이 최적인 경우의 데이터 슬롯 길이에 따른 결합된 데이터 슬롯 수 별 정규 전송률의 수학적 결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 수학적 결과와 시뮬레이션 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 데이터 슬롯이 짧은 경우에 스펙트럼 센싱이 차지하는 비율을 감소시켜 전송률을 높이기 위한 방안으로써 한 번의 스펙트럼 센싱으로 다수의 데이터 슬롯을 전송하는 군집형 데이터 슬롯 구조에 대하여 연구하였다. 군집형 데이터 슬롯 구조는 스펙트럼 센싱 이후 데이터 슬롯이 증가함에 따라 미검출 확률이 증가하는 문제가 있다. 본 논문에서는 Chapman-Kolmogorov 방정식을 이용하여 선순위 사용자의 신호 발생률을 예측 함으로써 모든 데이터 슬롯에서 최대 허용 미검출 확률을 만족시키도록 하였다. 그리고 후순위 사용자의 전송률을 최대화하기 위한 최적화 문제를 제시하였고, 수학적 성능 분석을 통하여 최적의 스펙트럼 센싱 시간과 군집할 데이터 슬롯의 수와 데이터 슬롯의 길이를 도출하였다. 마지막으로 시뮬레이션을 수행하여 수학적 성능 분석 결과를 검증하였다.

차기 연구에서는 실제 선순위 사용자에게 미치는 무선 간섭을 고려한 최적의 스펙트럼 센싱 구조에 대해서 연구하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2012R1A1A2008169).

Reference

- [1] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [2] FCC, ET Docket No 02-135 Spectrum Policy Take Force (SPTF) Report, Nov. 2002.
- [3] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "NeXt generation / dynamic spectrum access / cognitive radio wireless networks: a survey," *Computer Networks J.*, vol. 50, no. 13, pp. 2127-2159, Sept. 2006.
- [4] S. Stotas and A. Nallanathan, "Optimal sensing time and power allocation in multiband cognitive radio networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 1, pp. 226-235, Jan. 2011
- [5] Y. C. Liang, Y. Zong, E. C. Y. Peh and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, Apr. 2008.
- [6] D. J. Lee and M. S. Jang, "Optimal spectrum sensing time considering spectrum handoff due to false alarm in cognitive radio networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 12, pp. 899-901, Dec. 2009.
- [7] W. Y. Lee, and I. F. Akyildiz, "Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 3845-3857, Oct. 2008.
- [8] Y. Xu, Y. Li, H. Zou, and X. Yang, "Joint sensing period optimization and transmission time allocation for cognitive radio networks," in *Proc. IEEE WCSP*, pp. 1-5, Nov. 2009.
- [9] W. Liu, W. Xiong, J. Wang, and S Li, "Optimal spectrum sensing framework in cognitive radio contexts," in *Proc. IEEE ICCT*, pp. 191-194, Nov. 2010.

[10] L. C. Wang and C. W. Wang, "Spectrum management techniques with QoS provisioning in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE ISWPC*, pp. 116-121, May 2010.

[11] L. C. Wang, C. W. Wang, K. T. Feng, "A queuing-theoretical framework for QoS-enhanced spectrum management in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 6, pp. 18-26, 2011.

[12] D. J. Lee and H. Wu, "Spectrum sensing time minimizing access delay of IEEE 802.11-like MAC in cognitive radio networks," *IEEE Commun. Letters*, vol. 15, no. 11, pp. 1249-1251, Nov. 2011

[13] D. J. Lee and M. J. Lee, "Optimal cooperative sensing scheme in cognitive radio communication systems," *The Journal of Korea Navigation Institute*, vol. 12, no. 5, pp. 429-436, Oct. 2008.

[14] A. Leon-Garcia, "Probability and random processes for electrical engineering," 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley publishing company, inc., 1994.

이 동 준 (Dong-Jun Lee)



1994년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학사)
 1996년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
 2000년 8월 : 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)
 2000년 9월~ 2005년 2월 : 삼성전자 책임연구원
 2005년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 부교수
 관심분야 : P2P, 무선자원 관리, 무선인지통신시스템

우 혁 (Hyuk Wu)



2007년 2월 : 한국항공대학교 정보통신공학과(공학사)
 2009년 8월 : 한국항공대학교 정보통신공학과(공학석사)
 2009년 9월 ~ 현재 : 한국항공대학교 정보통신공학과 박사과정
 관심분야 : P2P, 무선센서네트워크, 무선인지통신