

---

# 센싱 수신기 구조에 따른 스펙트럼 센싱의 성능 비교

강범주\*

Performance Comparison of Spectrum Sensing according to Structure of Sensing Receiver

Bub-Joo Kang\*

---

이 논문은 2008년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음

---

## 요 약

본 논문에서는 CR(cognitive radio) 시스템의 throughput 측면에서 스펙트럼 센싱의 최적화를 다루고 있다. 기존의 논문은 incumbent 사용자의 출현에 의해 다른 채널의 탐색 및 채널전환 등을 고려하지 않은 상태에서 스펙트럼 센싱의 최적화 문제를 다루고 있다. 이에 반해 본 논문에서는 채널탐색 및 채널전환 등을 고려하여 CR 사용자의 throughput를 분석하고 있다. 또한 본 논문에서는 데이터 수신 경로와 분리된 센싱수신기를 갖는 형태의 센싱구조를 제시하고, 데이터 수신 경로를 센싱 수신기로 사용하는 경우와 분리된 센싱 수신기를 갖는 센싱 구조와의 센싱 성능을 CR 사용자의 throughput 관점에서 비교하고 있다.

수치해석의 결과로는 incumbent 신호가 출현한 경우 채널이동을 위한 다른 빈 채널의 탐색에서 데이터 통신 경로와 분리된 센싱수신기에 의한 채널탐색을 통하여 throughput 효율이 향상됨을 보여주고 있다.

## ABSTRACT

This paper describes the optimization of the spectrum sensing in terms of the throughput of the cognitive radio (CR) system. The conventional papers do not describe the optimization problem of the spectrum sensing by considering the channel search and channel move of the CR system to be caused by the appearance of the incumbent user. However this paper evaluates the throughput of the CR user by considering the situations such as the channel search and channel move additionally. Also, this paper suggests the sensing structure being separated the data receiver from sensing receiver, and compares the sensing performance for the same receiver structure of sensing and communication with that for the separated sensing receiver in terms of the throughput of the CR user.

The numerical result demonstrates that the performance of the throughput efficiency is improved by the proposed sensing receiver to be separated from the data communication path.

## 키워드

signal detection, spectrum sensing, cognitive radio

## I. 서 론

주파수 부족 문제를 해결하기 위해서는 주파수 이용 효율의 극대화가 필요하며, 이를 위해서 국가 진파정책인 주파수 지정 할당 및 이용으로부터 허가 없이 유연하게 사용할 수 있는 개방형 주파수 할당으로의 패러다임의 변화가 필요하다. 현재 세계적으로 주파수 부족 문제 해결과 이미 할당된 주파수의 효율적 사용을 위해 CR(cognitive radio) 및 UWB와 같은 주파수 공유 기술을 개발하기 위해서 노력 중에 있다. 이러한 추세에 맞추어 미국 FCC는 스펙트럼 사용 효율을 높이고 새로운 서비스 도입을 용이하게 하기 위해 TV대역을 대상으로 주파수를 공유하는 Cognitive Radio(CR)를 적용하기로 하고 관련 규정에 관한 제정 작업을 진행하였고, 이러한 방침을 뒷받침하기 위해IEEE에서는 802.22 WG을 신설하고 CR 기술을 이용한 TV 대역 고정 무선통신망인 Wireless Regional Area Network(WRAN)에 대한 PHY/MAC 표준화 작업이 진행 중에 있다[1][2].

본 논문에서 주로 다루고자 하는 것은 CR 기술에서 스펙트럼 센싱에 관한 것이다. CR 시스템에서 스펙트럼 센싱의 주요 목적은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 첫 번째 목적은 incumbent 사용자의 면허대역에서 CR 사용자가 통신채널을 확보하기 위함이고 두 번째 목적은 사용 중인 채널에 대하여 incumbent 사용자의 출현여부를 확인하기 위함이다. 본 논문에서는 두 번째 목적인 사용 중인 채널에서 incumbent 사용자의 출현여부를 확인하는 스펙트럼 센싱과 throughput 효율과의 관계를 해석하고자 한다. CR 시스템에서 incumbent 신호에 대한 스펙트럼 센싱과 throughput 효율과의 관계는 trade-off 관계를 갖는다. Incumbent 신호에 대한 스펙트럼 센싱의 성능에 영향을 미치는 채널감시(channel monitoring) 시간과 throughput 효율과의 관계는 서로 상충되는 관계이므로 throughput 관점에서 최적의 센싱시간을 도출하는 연구들이 수행되었다[3][4].

본 논문에서는 센싱시간과 throughput 효율과의 관계를 고려한 센싱성능을 평가함에 있어 기존 논문[3][4]와는 달리 incumbent 신호가 검출되면, CR 사용자가 다른 빈 채널로의 채널전환을 위해 채널탐색 및 채널전환 시간을 고려하여 센싱성능을 평가하고 있다.

또한 본 논문에서는 센싱성능을 평가함에 있어 IU(incumbent user) 검출지연 시간을 고려하고 있는데,

이것은 CR 사용자가 사용 중인 채널에 incumbent 신호가 출현하였는데도 이것을 검출하지 못한 경우에 추가적으로 주어지는 시간으로 정의하였다. 면허대역에 대하여 CR 사용자가 incumbent 신호를 검출하지 못한 경우 계속해서 incumbent 신호를 검출해야 하고, incumbent 신호를 검출하지 못한 상태에서 해당 채널로 통신이 계속하여 진행된다면 상호간에 간섭을 주는 경우로써 CR 사용자의 데이터 전송에러만이 발생하는 상황에서 연속된 incumbent 신호의 센싱으로 인하여 지연된 시간을 IU 검출지연 시간으로 해석하였다.

그리고 기존 논문[3]의 경우 incumbent 신호가 출현하면, 기존에 통신 중인 채널로의 통신을 중단하고 다른 빈 채널을 탐색하는 형태로 성능을 평가하고 있는데, 본 논문의 경우에는 데이터 통신 경로와 센싱 수신 경로를 분리하는 형태의 센싱구조를 구성함으로써 데이터 프레임의 데이터 전송 기간에서 다른 빈 채널, 즉 후보채널(candidate channel)을 탐색함으로써 채널전환 시간을 짧게 하는 방안을 제안하고 이에 대한 성능을 제시하고 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 제II절에는 에너지 검출기반 스펙트럼 센싱을 해석하고 제III절에서는 스펙트럼 센싱과 throughput 효율과의 관계를 제시하고 있다. 그리고 제IV절에서는 Rayleigh 페이딩 채널에서 스펙트럼 센싱과 throughput 효율과의 관계에 관한 수치해석 결과로 분석하고 제V절에서 결론을 제시하였다.

## II. 에너지 검출기반 스펙트럼 센싱

본 논문에서 고려하고 있는 센싱기법은 에너지검출 방식이고, 검출하고자 하는 신호,  $y(t)$  는

$$y(t) = \begin{cases} u(t), & H_0 \\ \alpha s(t) + u(t), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

으로 표현할 수 있다. 여기에서  $y(t)$  는 에너지 검출기의 수신신호이고,  $s(t)$  와  $u(t)$  는 각각 incumbent 신호와 AWGN 신호이며  $\alpha$  는 채널의 진폭이득이다[3].

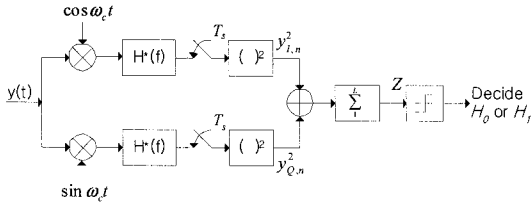


그림1. 에너지 검출기의 구조  
Fig. 1 Structure of energy detector

그림1은 식(1)의 송신신호에 대한 에너지 검출기 구조로써  $H^*(f)$ 는 송신단의 파형 정형 필터에 대한 정합 필터의 주파수 응답이다. 그림1의 에너지 검출기의 최종 출력,  $Z$ 는

$$Z = \sum_{n=1}^L (y_{I,n}^2 + y_{Q,n}^2) \quad (2)$$

으로 주어진다. 여기에서  $L$ 은 난코히런트 적분의 수로써 샘플링주파수,  $f_s$ 와 센싱시간,  $T$ 와의 곱으로 표현되는 time-bandwidth product으로 정의된다.

AWGN 채널에서 에너지 검출기 출력,  $Z$ 에 대한 오경보 확률,  $P_f$ 은

$$P_f = \int_{\lambda/V_N}^{\infty} \frac{x^{L-1} e^{-x}}{(L-1)!} dx = e^{-\lambda/V_N} \sum_{k=0}^{L-1} \frac{(\lambda/V_N)^k}{k!} \quad (3)$$

으로 주어진다[5][6]. 여기에서  $\lambda$ 와  $V_N$ 은 각각 임계치와 잡음분산이다. 그리고 신호검출확률,  $P_d$ 은

$$P_d = \int_{\lambda/V_N}^{\infty} \left( \frac{x}{L\mu} \right)^{(L-1)/2} e^{-(x+L\mu)} I_{L-1}(2\sqrt{L\mu x}) dx \quad (4)$$

으로 주어진다[5][6]. 여기에서  $I_{L-1}(\cdot)$ 은  $(L-1)$ 번 차수의 Modified Bessel 함수이고,  $\mu$ 는 incumbent 신호의 SNR이다.

Rayleigh 페이딩 채널에서의 신호검출확률,  $P'_d$ 은

$$P'_d = e^{-\lambda/V_F} \sum_{k=0}^{L-1} \frac{(\lambda/V_F)^k}{k!} \quad (5)$$

으로 주어진다[5][6]. 여기에서  $V_F$ 는

$$V_F = V_N (1 + \bar{\mu}) \quad (6)$$

으로 주어지고, 여기에서  $\bar{\mu}$ 는 Rayleigh 페이딩 채널에서 incumbent 신호의 평균 SNR이다.

### III. 스펙트럼 센싱과 throughput과의 관계

CR 사용자는 주파수 채널을 사용하기 이전에 incumbent 사용자가 해당 주파수 채널을 사용하고 있는가를 스펙트럼 센싱을 통하여 먼저 확인하여야 한다.

그림2는 CR 사용자의 주기적인 스펙트럼 센싱과 빈 채널(idle channel)의 이용과정을 보여주고 있다. 그림2에서 채널 유용 체크(channel availability check) 기간,  $T_{check}$ 은 CR 사용자가 통신하기 위해 빈 채널(idle channel)을 탐색하기 위한 기간으로써 보다 긴 시간이 주어질 수 있다. 채널 유용 체크 기간 동안 빈 채널을 탐색하고 탐색한 채널에 대하여 incumbent 사용자가 출현하지 않으면, 탐색한 채널로 CR 사용자의 통신채널로 설정하여 통신데이터를 송수신하게 된다.

CR 사용자가 통신채널을 설정한 이후에는 그림2와 같이 사용 중인 채널에 incumbent 사용자가 출현하였는가를 확인하기 위해 주기적인 스펙트럼 센싱을 수행하게 된다.

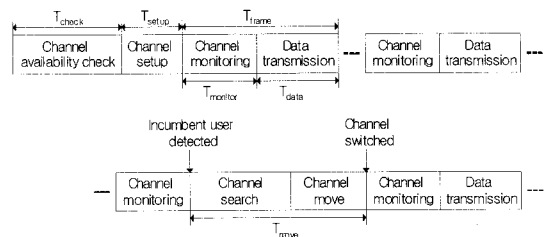


그림 2. CR 시스템의 주기적인 스펙트럼 센싱 및 빈 채널의 이용 과정

Fig.2. Procedure of idle channel utilization and periodic spectrum sensing in CR system

그림2에서 **incumbent** 신호의 출현 여부를 확인하기 위한 센싱은 주기적으로 수행되는데, 이 경우의 센싱 주기(sensing period)는  $T_{frame}$ 이고 센싱시간(sensing time)은  $T_{monitor}$  간격으로 센싱을 수행하게 된다. 그런데 CR 사용자가 사용 중인 채널에 **incumbent** 신호가 나타나게 되면, CR 사용자는 다른 빈 채널(vacant channel)을 탐색하여 탐색한 빈 채널로 채널을 전환하여야만 한다.

본 논문에서 센싱시간과 throughput과의 관계를 고려한 센싱성능을 평가함에 있어 기존 논문[3][4]과는 달리 **incumbent** 신호가 검출되면, CR 사용자가 다른 빈 채널로의 채널전환을 위해 채널탐색 및 채널전환 시간,  $T_{move}$  을 고려하여 센싱성능을 평가하고 있다.

또한 기존 논문[3]의 경우 **incumbent** 신호가 출현하면, CR 사용자가 사용중인 채널로의 통신을 중단하고 다른 빈 채널을 탐색하는 방식으로 성능을 평가하고 있는데, 본 논문의 경우에서는 그림3과 같이 데이터 통신 경로와 센싱 수신 경로를 분리하는 형태의 센싱구조를 구성함으로써 데이터 프레임,  $T_{frame}$ 의 데이터 전송 기간,  $T_{data}$  동안에 다른 빈 채널, 즉 후보채널(candidate channel)을 탐색함으로써 채널전환시간을 짧게 하는 방법을 제시하고 있다.

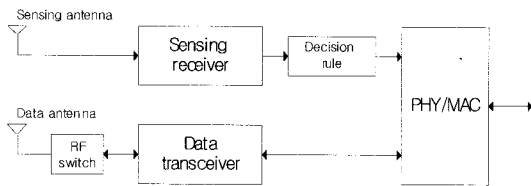


그림 3. 데이터 송수신기와 분리된 센싱수신기 구조  
Fig.3. Structure of sensing receiver being separated from data transceiver

그림3에서 CR 단말기와 CR 기지국은 **incumbent** 사용자가 어디에서 출현하는가를 모르기 때문에 스펙트럼 센싱에서는 전방향성 안테나(omni-directional antenna)를 사용하는 반면, CR 시스템의 통신을 위한 데이터 송수신용 안테나는 간섭을 감소할 수 있는 지향성 안테나(directional antenna)로 구성하는 특징을 고려할 때 CR 시스템의 센싱수신기는 데이터 송수신기와 분리된 형태로 구성하는 것이 안테나 구현 측면에서 유리한 장점을 갖고 있다.

참고문헌[3]에서는 통신 중에 **incumbent** 신호가 출현하면, **incumbent** 신호가 출현했다고 인지한 시점에서부터 다른 빈 채널을 탐색하는 것으로 센싱 과정을 제시하고 있다. 이러한 경우 CR 시스템에서 운영되고 있는 채널수가  $N$ 이라고 할 때, CR 사용자가 사용 중인 채널을 제외한 나머지  $N-1$  채널에 대하여 연속적으로 빈 채널의 탐색을 수행한 경우 평균 탐색 시간은[3]

$$\bar{T}_{search} = T_{search} \sum_{n=1}^{N-1} n P_v (1 - P_v)^{n-1} = \left[ \frac{1 - (1 - P_v)^N}{P_v} - N(1 - P_v)^{N-1} \right] T_{search} \quad (7)$$

으로 주어진다. 여기에서  $T_{search}$ 는 각각의 채널에 대하여 채널이 비어있는가를 탐색하는 시간이고  $P_v$ 는 탐색한 채널이 빈 채널(vacant channel)이라고 선언할 확률으로써

$$P_v = P(H_0)(1 - P_f^s) + P(H_1)(1 - P_d^s) \quad (8)$$

으로 표현할 수 있다. 여기에서  $P_d^s$ 와  $P_f^s$ 는 각각 채널 탐색과정에서 탐색 채널의 신호검출확률과 오정보 확률이다. 그리고  $P(H_0)$ 와  $P(H_1)$ 는 각각 주어진 주파수 대역에서 **incumbent** 사용자가 사용 중이지 않을 확률과 **incumbent** 사용자가 사용 중인 확률로 정의하고,  $P(H_0) + P(H_1) = 1$  이다[4]. 채널탐색과정에서 정확한 스펙트럼 센싱에 의해  $P_d^s$ 가 거의 100%이라면 식(8)에서  $P_v$ 는

$$P_v = P(H_0)(1 - P_f^s) \quad (9)$$

으로 주어진다.

기존 논문[3]과 같이 분리된 센싱 수신기를 갖고 있지 않은 경우 사용 중인 채널에 대하여 **incumbent** 신호가 출현하면 다른 채널로의 전환은 채널탐색과정과 채널전환과정 등 두 가지 과정을 수행하게 된다. 그렇지만 분리된 센싱 수신기를 갖고 있는 경우에는 전환할 채널을 미리 확보하고 있는 상태이므로 채널전환과정

만이 있게 되어 분리된 센싱 수신기가 있는 경우에 대한 채널이동시간은 채널감시시간과 채널전환시간의 합이므로

$$\bar{T}_{move} = T_{frame} + T_{switch} \quad (10)$$

으로 주어지고, 기존 논문[3]과 같이 분리된 센싱 수신기를 갖고 있지 않은 경우에 대한 채널이동시간은 식(10)에서 채널탐색과정을 추가적으로 고려해야 하기 때문에

$$\begin{aligned} \bar{T}_{move} &= T_{frame} + \bar{T}_{search} + T_{switch} \\ &= T_{frame} + \left[ \frac{1 - (1 - P_v)^N}{P_v} - N(1 - P_v)^{N-1} \right] T_{search} + T_{switch} \end{aligned} \quad (11)$$

으로 주어진다.

일반적으로 throughput은 사용 중인 채널에 대하여 CR 사용자의 전체 채널점유시간으로 데이터 전송시간을 나누는 것으로 정의하고 있다.

그림2에서 CR 사용자가 사용 중인 채널에 대한 전체 채널점유시간,  $\bar{T}_{total}$  은

$$\begin{aligned} \bar{T}_{total} &= P(H_0)(1 - P_f^m)T_{frame} + P(H_0)P_f^m\bar{T}_{move} \\ &\quad + P(H_1)P_d^m\bar{T}_{move} + P(H_1)(1 - P_d^m)T_{delay} \end{aligned} \quad (12)$$

으로 주어진다. 여기에서  $P_d^s$  와  $P_f^s$  는 각각 채널감시(channel monitoring) 과정에서 사용 중인 채널의 신호검출확률과 오경보 확률이다. 식(12)에서 CR 사용자는 성공적으로 빈 채널을 탐색하는 것으로 채널전환시간,  $\bar{T}_{move}$  을 해석하였다.

그리고  $T_{delay}$  는 검출지연 시간으로 CR 사용자가 사용 중인 채널에 incumbent 신호가 출현하였는데도 이를 검출하지 못한 경우에 incumbent 신호에 의한 간섭 때문에 데이터 전송에러만 발생하는 경우로써 전송상에 지연되는 시간으로 정의하였다. 면허대역에 대하여 2차 사용자인 CR 사용자는 incumbent 신호를 검출하지 못한 경

우 계속해서 incumbent 신호를 검출해야 하고, incumbent 신호를 검출하지 못한 상태에서 해당 채널로 통신이 계속하여 진행된다면 incumbent 신호에 의한 간섭 때문에 CR 사용자의 데이터 전송이 거의 불가능한 상태로 해석하여 데이터 전송에러만이 발생하고 연속된 채널감시과정으로 소비되는 시간을 검출지연 시간으로 정의하였다. 만약에 N-번째 채널감시과정에서 incumbent 신호를 검출하였다면,  $T_{delay}$  는  $(N-1) T_{frame}$  으로 표현할 수 있다. 실제적으로 IEEE802.22 WRAN의 스펙트럼 센싱에서는 -116dBm/MHz의 ATSC TV신호에 대하여 신호검출확률,  $P_d^m$  는 90% 이상 그리고 오경보확률,  $P_f^m$  는 10% 이하의 신호검출성능을 규정하여 동작하도록 기능요구규격(functional requirement document)에 제시하고 있다.

CR 사용자의 사용 채널에 대한 평균적인 데이터 전송시간은

$$\bar{T}_{data} = T_{data} \{ P(H_0)(1 - P_f^m) + P(H_1)(1 - P_d^m) \} \quad (13)$$

으로 주어진다. 여기에서  $T_{data}$  는  $T_{frame}$  에서  $T_{monitor}$  부분을 제외한 값이다. 그런데 식(13)에서 incumbent 신호가 출현한 경우 incumbent 신호를 검출하지 못하고 CR 사용자가 데이터를 전송하는 것은 전송에러가 발생한 것으로 간주하므로 throughput는 없다. 따라서 평균적인 데이터 전송시간은

$$\bar{T}_{data} ; T_{data} P(H_0)(1 - P_f^m) \quad (14)$$

으로 표현할 수 있다.

최종적으로 식(12)과 식(14)를 이용하여 throughput은

$$\begin{aligned} \bar{\eta} &= \frac{\bar{T}_{data}}{\bar{T}_{total}} \eta \\ &= \frac{\bar{T}_{data} P(H_0)(1 - P_f^m)}{P(H_0) \{ (1 - P_f^m) T_{frame} + P_f^m \bar{T}_{move} \} + P(H_1) \{ P_d^m \bar{T}_{move} + (1 - P_d^m) T_{delay} \}} \eta \end{aligned} \quad (15)$$

으로 표현할 수 있다. 여기에서  $\eta$  는  $T_{data}$  동안의 데이터 전송속도이다.

### IV. 컴퓨터 모의실험

본 논문에서 컴퓨터 모의실험을 위해 사용한 **incumbent** 신호는 대역폭이 10kHz인 BPSK 변조신호로 가정하고 에너지 검출기에서의 샘플링주파수는 신호 대역폭과 동일하게 10kHz로 설정하였다. **Incumbent** 사용자 및 **CR** 사용자의 통신채널 환경은 Rayleigh 페이딩 채널이고 **incumbent** 사용자의 면허대역에는 30개의 주파수 채널들이 있다. 그리고 **CR** 사용자의 프레임길이, 즉 센싱주기,  $T_{frame}$ 은 100ms으로 설정하고 **incumbent** 신호가 출현한 경우 채널전환을 위한 채널탐색과정에서 거의 성공적으로 빈 채널이 탐색되기 위하여 채널탐색 시간,  $T_{search}$ 는 14ms로 설정하였고, 채널탐색 후에 다른 빈 채널로의 채널전환에 관련된 채널전환시간,  $T_{switch}$ 도 14ms로 설정하였다. 여기서 채널탐색시간은 주파수 채널 전환 시간과 해당 채널이 빈 채널인가를 탐색하는 시간의 합으로 주어지고 있다. 또한 수치해석 결과를 도출함에 있어 면허대역 내에 있는 30개 채널에 대한 채널탐색과정에서 신호검출확률,  $P_d^s$ 와 오경보확률,  $P_f^s$  등은 Rayleigh 페이딩 채널에 대하여 식(3)과 식(5)를 이용하여 도출하였다.

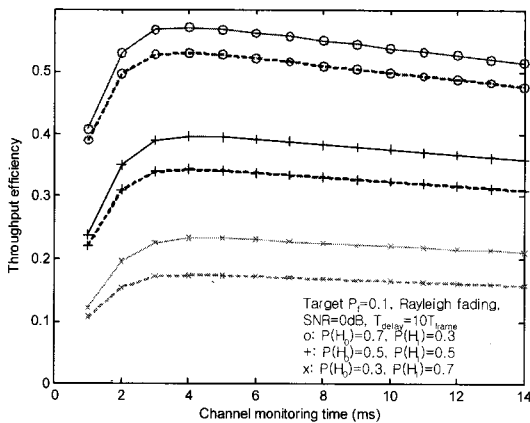


그림4. 센싱수신기 구조에 따른 채널감시시간 대비 throughput 효율:  $T_{frame}=100ms$   
 Fig.4.Channel monitoring time vs. throughput efficiency according to structure of sensing receiver:  $T_{frame}=100ms$

그림4는 분리된 센싱 수신기의 유무에 따른 채널감시 시간 대비 throughput 효율을 보여주고 있다. 그림4에서 점선은 센싱수신기와 통신용 수신기가 동일한 RF수신 경로를 사용하는 경우이고 직선은 센싱수신기와 데이터 통신용 수신기가 분리된 형태이다. 그림4에서 데이터 통신용 수신기와 분리된 형태의 센싱구조가 throughput 효율 측면에서 성능이 좋은 것은 CR사용자 통신중인 상황에도 채널이동하기 위한 후보채널을 확보할 수 있기 때문이다. 또한 그림4에서는  $P(H_0)$ 와  $P(H_1)$  확률에 따른 throughput 효율을 보여주고 있는데,  $P(H_0)$ 와  $P(H_1)$  확률 값에 상관없이 채널감시과정에서의 최적의 채널 감시시간은 동일하게 4ms로 제시되고 있다.

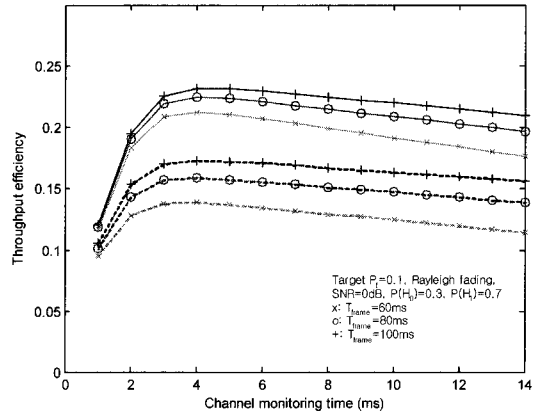


그림5. 센싱수신기구조 및 센싱주기에 따른 채널감시시간 대비 throughput 효율  
 Fig.5. Channel monitoring time vs. throughput efficiency according to sensing receiver structure and sensing period

그림5는  $P(H_0)=0.3$ 과  $P(H_1)=0.7$ 인 경우 센싱수신기 구조와 센싱주기의 변화에 따른 throughput 효율을 보여주고 있다. 그림5에서 센싱주기, 즉 데이터 프레임 100ms에서 80ms와 60ms로 감소하면 채널감시시간이 고정된 상태에서 throughput 효율이 감소하지만 데이터 프레임의 감소만큼 throughput 효율이 감소하지 않음을 확인하였다. 따라서 그림4와 그림5의 결과를 분석하면 throughput 효율은 CR 서비스 지역에서 사용주파수 대역의  $P(H_0)$ 와  $P(H_1)$ 에 크게 의존됨을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 센싱 수신기가 데이터 수신기와 동일한 RF 수신경로인 경우, 그리고 데이터 수신기와 분리된 별도의 센싱수신기를 갖는 센싱구조에 따른 성능을 throughput 효율관점에서 분석하고 있다. 또한 본 논문에서는 CR 통신시스템의 throughput 효율을 유도함에 있어서, incumbent 신호가 출현했을 때 이를 CR 사용자가 검출하지 못하면 IU 검출 지연 시간이 발생하는 형태로 throughput 효율에 관한 식을 유도하였다.

수치해석의 결과로는 incumbent 신호가 출현한 경우 채널이동을 위한 다른 빈 채널의 탐색을 데이터 통신 경로와 분리된 센싱수신기를 이용함으로써 throughput 효율 성능이 향상됨을 보여주고 있다.

## 참고문헌

- [1] IEEE 802.22, "Functional Requirements for the 802.22 WRAN Standard," 802.22-05/007r46, September 2005.
- [2] IEEE 802.22 WG, Draft standard for wireless regional area networks part 22, IEEE P802.22/ D0.3, May 2007.
- [3] A. Ghasemi and E.S. Sousa, "Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks," IEEE CCNC, Jan. 2007, pp.1022-1026
- [4] Y.C. Liang, Y. Zeng, E. Peh, and A.T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks," IEEE Trans. Wireless Commun. vol. 7, no. 4, April 2008, pp.1326-1337
- [5] A.J. Viterbi, "CDMA Principles of Spread Spectrum Multiple Access Communication," Addison-Wesley, New York, 1995.
- [6] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," Proc. IEEE, vol.55, pp.523-531, April 1967.

## 저자소개



강법주(Bub-Joo Kang)

1983년: 경희대학교 전자공학과 (공학사)  
 1985년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1996년: 연세대학교 전자공학과(공학박사)  
 1988년 2월- 2001년 2월: ETRI 책임연구원  
 2001년 3월- 현재: 동국대학교 정보통신공학과 부교수  
 ※ 관심분야: 스펙트럼 센싱, 인지무선, 이동통신