

논문 2011-48TC-2-7

무선인지 시스템을 위한 수신기 중심 스펙트럼 센싱 기술

(Receiver-Centric Spectrum Sensing for Cognitive Radio Systems)

신 오 순*

(Oh-Soon Shin)

요 약

무선인지(cognitive radio) 시스템은 특정 대역에 면허권을 갖는 주사용자(primary user)의 유휴 스펙트럼을 부사용자(secondary user)가 기회적으로 사용하는 것을 허용하는 것으로 주파수 부족 문제의 해결책으로 부각되고 있다. 특히, 스펙트럼 센싱(spectrum sensing) 기술은 특정 스펙트럼을 사용하고자 하는 부사용자가 주변에서 해당 스펙트럼을 사용 중인 주사용자를 검출하는 것으로 무선인지 시스템의 핵심을 이룬다. 기존의 스펙트럼 센싱 기술은 부사용자가 주사용자 송신기를 센싱하지만 부사용자가 주사용자 수신기를 센싱할 수 있다면 주사용자에 미치는 간섭을 최소화하고 스펙트럼 사용 효율을 최대화할 수 있다. 본 논문에서는 수신기 중심(receiver-centric) 스펙트럼 센싱 기술을 제안하고 성능 분석을 통해 기존의 송신기 중심 스펙트럼 센싱 기술에 비해 주파수 효율 측면에서 성능 개선이 있음을 검증한다.

Abstract

Cognitive radio is accepted as an effective and promising approach for resolving the spectrum scarcity problem by allowing secondary users to borrow unused spectrum from primary users. A method of identifying busy and empty spectrum at the given time and space, which is called spectrum sensing, constitutes an essential element of the cognitive radio. In this paper, we propose a receiver-centric spectrum sensing scheme which attempts to detect the primary receiver rather than the primary transmitter. It is shown that the proposed receiver-centric sensing approach results in more efficient spectrum utilization than the conventional transmitter-centric sensing.

Keywords : cognitive radio, spectrum sensing, receiver-centric, spectral efficiency.

I. 서 론

전파 이용의 급속한 확산과 광대역 멀티미디어 서비스의 증가에 따라 주파수 수요가 급격히 증가하고 있고 실제로 할당된 대역 이외에는 비어있는 대역이 거의 없을 정도로 주파수 부족이 심각한 문제로 대두되었다. 반면 FCC(Federal Communications Commission)의 분석에 따르면 이미 할당된 대역 내에서 실제 특정 시간

과 장소에서 15~80%의 주파수만 사용되고 있다^[1]. 따라서 주파수 부족 문제를 해결하기 위해서는 한정된 주파수 자원의 이용 효율을 극대화해야 한다. 이러한 배경 하에 특정 시간과 장소에서 사용되지 않는 스펙트럼을 능동적으로 인지하여 통신하는 무선인지(cognitive radio) 기술이 활발히 연구되고 있다^[2~3].

스펙트럼 센싱(spectrum sensing) 기술은 부사용자(secondary user)가 주변의 전파 환경을 감지하여 비어있는 스펙트럼을 찾아내는 기술로 무선인지 통신의 근간을 이루는 기술이다. 스펙트럼 센싱이 부정확하면 이미 해당 주파수를 사용 중인 주사용자(primary user)에 간섭을 미칠 수도 있고, 특정 주파수가 실제로 비어 있음에도 불구하고 사용하지 못할 수 있다. 따라서 무선인지 기술에서 추구하는 타 기기에 미치는 간섭을 최소

* 정회원-교신저자, 숭실대학교 정보통신전자공학부
(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0064371).

접수일자: 2010년8월26일, 수정완료일: 2011년2월17일

화하고 주파수 이용 효율을 제고하기 위한 목적을 달성하기 위해서는 신속하고 정확한 센싱이 필수적이다.

대표적인 스펙트럼 센싱 기술로는 에너지 검출(energy detection), 정합 필터(matched filter), 신호특성 검출(signal feature detection) 방법이 있다^[4]. 특히, 에너지 검출 방법은 특정 대역에서 수신신호의 에너지 레벨을 추정하고 이를 임계치(threshold)와 비교하여 해당 주파수 대역에서 신호의 존재 유무를 검출하는 방법으로 가장 구현이 간단하고 실용성이 큰 기술이다.

기존의 스펙트럼 센싱 기술에서는 공통적으로 특정 주파수를 사용하고자 하는 부사용자가 주변에서 해당 주파수를 통해 신호를 송신하고 있는 주사용자가 존재하는지의 유무를 판단한다는 점에서 송신기 중심(transmitter-centric) 센싱이라 할 수 있다. 하지만 부사용자가 해당 스펙트럼을 사용함으로써 인해 직접적으로 영향을 받는 것은 주사용자의 송신기 측이 아니라 신호를 수신하는 수신기 측이다. 따라서 부사용자가 주사용자의 송신기가 아닌 수신기 중심(receiver-centric)으로 센싱을 수행한다면, 센싱 오류로 인해 해당 주파수를 사용해서 주사용자 수신기에 미치는 간섭을 줄일 수 있고 동시에 보다 효율적으로 주사용자와 주파수를 공유할 수 있을 것이다.

수신기 중심의 스펙트럼 관리 방식은 FCC에서 제안한 간섭온도 모델(interference temperature model)을 중심으로 연구되고 있다^[5-6]. 간섭온도 모델은 수신기 관점의 주파수 규제를 위하여 수신기에서의 간섭을 정량화하고 간섭의 양을 특정 임계치 이하로 제한함으로써 스펙트럼의 효율적인 관리를 추구하고자 하는 개념이다. 무선인지 시스템에 간섭온도 모델을 적용하기 위해서는 주사용자 수신기가 간섭을 측정하여 측정된 값과 간섭의 최대 허용치를 부사용자에게 알려주어야 한다. 따라서 주사용자 수신기에 간섭 측정 기능이 추가되어야 하며 주사용자와 부사용자간의 정보교환 프로토콜이 필요하므로 적용하는데 어려움이 있다.

본 논문에서는 간섭온도 모델에 의존하지 않고 스펙트럼 센싱 기술을 이용하여 부사용자가 직접 주사용자 수신기에 미치는 간섭을 측정하여 주파수 사용 여부를 결정하는 수신기 중심 스펙트럼 센싱 방법을 제안한다. 수신기 중심 스펙트럼 센싱은 부사용자가 주사용자의 수신기로부터 방사되는 신호를 센싱하여 이를 기준으로 스펙트럼 사용 여부를 결정하는 방식이다. 제안한 수신기 중심 스펙트럼 센싱과 기존의 송신기 중심 센싱 방

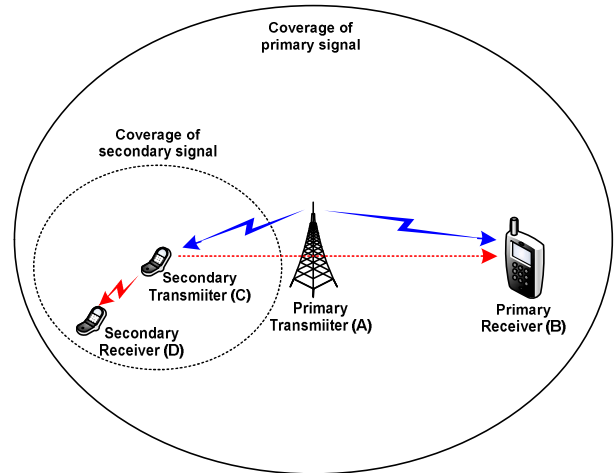


그림 1. 송신기 중심 스펙트럼 센싱의 문제점
Fig. 1. Problem of transmitter-centric spectrum sensing.

법의 성능을 주파수 효율(spectral efficiency) 측면에서 분석 및 비교한다. 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 기존의 송신기 중심 스펙트럼 센싱 기술의 문제점을 설명하고, III장에서는 제기된 문제점을 해결하기 위한 수신기 중심 스펙트럼 센싱 기술을 제안한다. IV장에서는 분석 및 모의실험을 통해 송신기 중심 센싱과 수신기 중심 센싱 기술의 성능을 주파수 효율 측면에서 비교 분석하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 기존 스펙트럼 센싱 기술의 문제점

기존의 송신기 중심 스펙트럼 센싱 기술에서는 기본적으로 부사용자가 주변에서 신호를 송신하고 있는 주사용자가 존재하는지의 유무를 결정한다. 예를 들어, 에너지 검출의 경우 부사용자가 수신하는 신호의 레벨이 임계치 이상이면 해당 스펙트럼을 주사용자가 사용하고 있다고 판단한다. 하지만 부사용자가 해당 스펙트럼을 사용하는 경우 직접적으로 간섭의 영향을 받는 것은 주사용자의 송신기가 아니라 수신기이다. 따라서 부사용자가 주사용자의 송신 신호를 감지한다 하더라도 주사용자의 통신에 간섭을 미치지 않으면서 주파수를 재사용할 수 있는 경우가 발생한다. 물론 이 경우 부사용자간의 통신은 주사용자로부터 간섭을 받게 되지만 신호의 세기가 충분히 큰 경우라면 통신이 가능할 것이다.

그림 1은 이러한 시나리오가 발생하는 일례를 보여준다. 주사용자 송신기 A가 주사용자 송신기 B에 신호를 전송하고 있는 경우로서 부사용자 송신기 C는 센싱 알고리즘을 통해 A의 신호를 감지하고 해당 주파수가

사용 중이라고 판단한다. 하지만 이 경우 C는 주사용자 수신기 B와 멀리 떨어져 있기 때문에 A와 B 사이의 통신에 영향을 안 미치면서 해당 주파수를 사용하여 부사용자 수신기 D에 신호를 전송하는 것이 가능하다. C가 B에 미치는 간섭은 B와 C 사이의 거리, 채널상태, C의 송신전력 등에 따라 결정되는 값으로 C에 의해 제어 가능하다. 송신기 중심 스펙트럼 센싱 기술은 그림 1의 시나리오에서 C로 하여금 항상 송신을 하지 못하도록 하는데 이는 무선인지 기술이 추구하는 주파수 효율을 최대화하는 측면에서 바람직하지 못하다. 부사용자가 위와 같은 주변 상황을 구분할 수 있는 기능을 가진다면 선택적으로 전송여부를 결정하고 주사용자에게 간섭을 주지 않고 주파수를 재사용함으로써 주파수 사용 효율을 높일 수 있다. 부사용자가 이러한 상황을 인지하기 위해서는 주사용자 송신기가 아니라 수신기에 대한 센싱이 필요하다.

III. 수신기 중심 스펙트럼 센싱 기술

수신기 중심 스펙트럼 센싱을 위해서는 주사용자의 수신기가 송신기와 동일한 주파수에 신호를 송신하는 것이 필요하다. 여기에서는 두 가지 시나리오에 대해서 수신기 중심 스펙트럼 센싱을 구현하는 구체적인 방안을 제시한다.

1. 시나리오 1: 주사용자가 동일한 주파수를 사용하여 양방향 통신을 하는 경우

주사용자가 동일한 주파수를 사용하여 양방향 통신을 하는 경우 두 주사용자 모두 송신기와 수신기 역할을 하기 때문에 부사용자는 센싱을 하는 데 있어서 송신기와 수신기를 구분할 필요가 없다. 즉, 부사용자 입장에서 주사용자는 서로 다른 두 개의 송신기로 인식된다. 따라서 기존의 송신기 중심 센싱 알고리즘을 적용하면 자연스럽게 수신기 센싱이 이루어지게 된다.

2. 시나리오 2: 주사용자가 단방향 통신을 하는 경우 또는 서로 다른 주파수로 양방향 통신을 하는 경우

이 경우 부사용자는 기존의 송신기 센싱 알고리즘으로 주사용자 수신기를 검출할 수 없다. Positive/Negative Acknowledgment (ACK/NACK) 또는 Clear-to-Send (CTS)등의 전송을 위한 피드백(feedback) 채

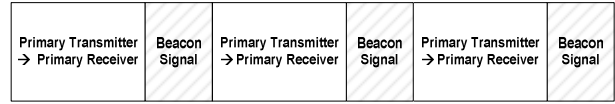


그림 2. 수신기 중심 센싱을 위한 주사용자 프레임 구조
Fig. 2. Frame structure of the primary user's signal for supporting receiver-centric spectrum sensing.

널이 있는 경우는 피드백 채널을 센싱하는 것이 가능하지만 그렇지 않은 경우는 센싱을 위해서는 주사용자 프레임 구조의 변경이 필요하다. 제안하는 방법은 주사용자 수신기가 신호를 수신하는 주파수와 동일한 대역에 주기적으로 비컨(beacon) 신호를 전송하는 것이다. 그러면 부사용자는 비컨 신호를 검출함으로써 수신기 중심 스펙트럼 센싱을 구현할 수 있다. 그림 2는 수신기 중심 센싱을 구현하기 위해 비컨 신호를 주기적으로 삽입한 주사용자 신호의 프레임 구조를 나타낸다. 비컨 신호의 송신전력 P_b 는 미리 정해진 고정 값으로 부사용자는 이를 알고 있다고 가정한다.

부사용자는 비컨 신호 구간에서 에너지 검출기를 사용하여 수신 신호의 전력을 측정한다. 측정된 수신 신호의 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{P}_r = P_b A_{pr,st} |h_{pr,st}|^2 + W_r \tag{1}$$

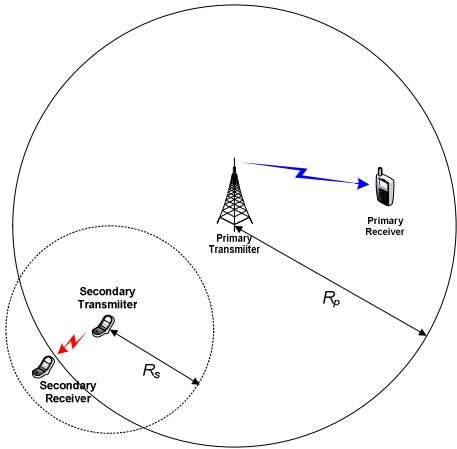
여기서 $A_{pr,st}$ 는 경로손실(path loss) 및 섀도우잉(shadowing)에 의한 주사용자 수신기와 부사용자 송신기 간의 전력 감쇄, $h_{pr,st}$ 는 페이딩에 의한 채널 계수, W_r 은 잡음 성분의 전력을 나타낸다. 식 (1)로부터 주사용자 수신기와 부사용자 송신기 간의 채널 이득 \hat{H} 을 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{H} = \frac{\hat{P}_r}{P_b} = A_{pr,st} |h_{pr,st}|^2 + \frac{W_r}{P_b} \tag{2}$$

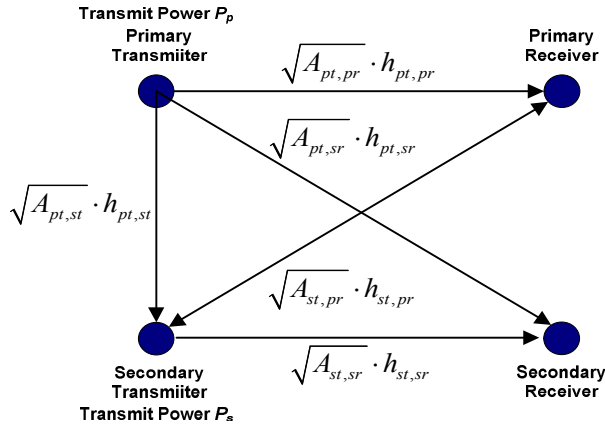
식 (2)을 사용하여 부사용자는 자신이 P_s 의 전력으로 송신하는 경우 주사용자 수신기에 미치는 간섭량 \hat{I} 을 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{I} = P_s \hat{H} \tag{3}$$

스펙트럼 사용 가능 여부에 대한 최종적인 판정은 \hat{I} 를 임계치 λ 와 비교함으로써 이루어진다. $\hat{I} \geq \lambda$ 인 경우 부사용자는 채널을 사용하지 않고 반대의 경우 채널을



(a) 성능 분석 시스템 모델



(b) 등가 모델

그림 3. 수신기 중심 스펙트럼 센싱 이득 분석을 위한 시스템 모델 및 등가 모델

Fig. 3. System model and equivalent model for analyzing performance gain of the receiver-centric spectrum sensing.

사용한다. 간섭 임계치 λ 는 부사용자가 주사용자 수신기에 허용 가능한 최대 간섭량을 고려하여 결정하여야 한다. 주사용자 수신기는 비컨 신호 전송 시에 간섭 허용치에 대한 정보를 실어서 보낼 수 있다.

IV. 성능 분석

수신기 중심 스펙트럼 센싱의 이득 분석을 위해 III장에서 제시한 시나리오 2에 대해서 그림 3과 같은 시스템 모델을 고려한다. 주사용자 수신기와 부사용자 송신기의 위치는 주사용자 송신기를 중심으로 하는 반경 R_p 의 영역 내에서 균일하게 분포한다고 가정하고, 부사용자 수신기는 부사용자 송신기를 중심으로 하는 반

경 R_s 의 영역 내에서 균일하게 분포한다고 가정한다. 주사용자의 송신 전력은 P_p , 부사용자의 송신 전력은 P_s 로 설정하고, 반경 R_p 와 R_s 는 원의 가장자리에서의 신호대잡음비가 γ_b 가 되도록 설정된다. 각 노드간 채널은 거리에 따른 경로손실과 레일리(Rayleigh) 페이딩을 겪는 것으로 가정한다.

기존의 송신기 중심 센싱의 경우 부사용자 송신기는 주사용자 송신기가 보낸 신호를 센싱한다. 즉, 센싱을 위해 부사용자 송신기에 수신되는 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \begin{cases} w(t), & H_0 \\ \sqrt{P_p A_{pt,st}} h_{pt,st} s_p(t) + w(t), & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

여기서 H_0 와 H_1 은 각각 주사용자 신호가 존재하지 않는 가설과 존재하는 가설을 나타내고, $s_p(t)$ 는 주사용자가 송신하는 신호, $w(t)$ 는 분산이 σ^2 인 잡음 신호를 나타낸다. 부사용자 송신기는 식 (4)의 수신 신호를 샘플링하고 에너지 검출기에 통과하여 다음과 같이 에너지 추정치 E_1 을 계산한다.

$$E_1 = \begin{cases} \sum_{n=1}^N |w[n]|^2, & H_0 \\ \sum_{n=1}^N |\sqrt{P_p A_{pt,st}} h_{pt,st} s_p[n] + w[n]|^2, & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

여기서 신호 $x[n]$ 은 $x(t)$ 의 n 번째 샘플을 나타내고, N 은 에너지 검출기에서 누적하는 샘플의 수를 나타낸다. E_1 을 결정 임계치 λ_1 과 비교하여 E_1 이 λ_1 보다 크면 주사용자 신호가 존재하는 것으로 판정하고 그렇지 않은 경우 주사용자 신호가 존재하지 않는 것으로 판정한다. 각각의 경우, 주사용자 송수신기간의 주파수 효율 $C_{1,p}$ 와 부사용자 송수신기간의 주파수 효율 $C_{1,s}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$E_1 \geq \lambda_1$ 인 경우:

$$C_{1,p} = \log_2 \left(1 + \frac{P_p A_{pt,pr} |h_{pt,pr}|^2}{\sigma^2} \right), \quad C_{1,s} = 0 \quad (6)$$

$E_1 < \lambda_1$ 인 경우:

$$C_{1,p} = \log_2 \left(1 + \frac{P_p A_{pt,pr} |h_{pt,pr}|^2}{P_s A_{st,pr} |h_{st,pr}|^2 + \sigma^2} \right),$$

$$C_{1,s} = \log_2 \left(1 + \frac{P_s A_{st,sr} |h_{st,sr}|^2}{P_p A_{pt,sr} |h_{pt,sr}|^2 + \sigma^2} \right). \quad (7)$$

III장에서 제안한 수신기 중심 스펙트럼 센싱의 경우 부사용자 송신기는 주사용자 수신기가 전송하는 비컨 신호를 센싱한다. 주사용자 수신기가 송신 전력 P_b 로 비컨 신호 $b(t)$ 를 송신한다고 하면, 부사용자 송신기가 센싱을 위해 수신하는 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \begin{cases} w(t), & H_0 \\ \sqrt{P_b A_{st,pr}} h_{st,pr} b(t) + w(t), & H_1 \end{cases} \quad (8)$$

부사용자 송신기는 식 (8)의 수신 신호를 샘플링하고 에너지 검출기에 통과하여 식 (5)와 동일한 방법으로 에너지 추정치 E_2 를 계산한다. E_2 를 임계치 λ_2 와 비교하여 E_2 가 λ_2 보다 크면 주사용자 신호가 존재하는 것으로 판정하고 그렇지 않은 경우 주사용자 신호가 존재하지 않는 것으로 판정한다. λ_2 는 III장에서 설명한 바와 같이 부사용자의 송신 전력 P_s 와 주사용자 수신기에 허용 가능한 간섭 크기를 고려하여 결정하여야 한다. 주사용자의 주파수 효율 $C_{2,p}$ 와 부사용자의 주파수 효율 $C_{2,s}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$E_2 \geq \lambda_2$ 인 경우:

$$C_{2,p} = \log_2 \left(1 + \frac{P_p A_{pt,pr} |h_{pt,pr}|^2}{\sigma^2} \right), \quad C_{2,s} = 0 \quad (9)$$

$E_2 < \lambda_2$ 인 경우:

$$C_{2,p} = \log_2 \left(1 + \frac{P_p A_{pt,pr} |h_{pt,pr}|^2}{P_s A_{st,pr} |h_{st,pr}|^2 + \sigma^2} \right),$$

$$C_{2,s} = \log_2 \left(1 + \frac{P_s A_{st,sr} |h_{st,sr}|^2}{P_p A_{pt,sr} |h_{pt,sr}|^2 + \sigma^2} \right). \quad (10)$$

그림 4는 P_s/P_p 를 변화 시키면서 식 (6)~(7)로부터 계산한 송신기 센싱 기술과 식 (9)~(10)으로부터 계산한 수신기 센싱 기술의 경우 주사용자의 주파수 효율, 부사용자의 주파수 효율 및 전체 합계 평균값을 보여준다. 경로손실 계수는 3.7, 주사용자와 부사용자 송신기의 서비스 반경에서의 평균 신호대잡음비 γ_b 는 0dB로

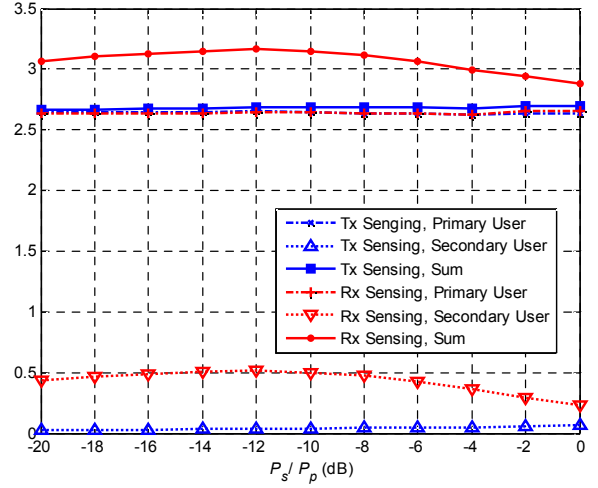


그림 4. 송신기 중심 센싱과 수신기 중심 센싱의 평균 주파수 효율 비교

Fig. 4. Comparison of average spectral efficiency between transmitter-centric sensing and receiver-centric sensing.

설정하였다. 센싱 임계치 λ_1 과 λ_2 는 부사용자 송신기로부터 각각 주사용자 송신기와 주사용자 수신기에 미치는 간섭 전력이 잡음 전력보다 10dB 작도록 설정하였다. 그림 4의 결과로부터 수신기 중심 센싱 기술을 도입하면 기존의 송신기 센싱의 경우에 비해 부사용자의 주파수 효율이 확연히 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 부사용자가 주사용자의 주파수 효율에 영향을 거의 안 주면서, 즉 주사용자에 간섭을 거의 안 미치면서 채널을 기회적으로 재사용하기 때문인 것으로 분석된다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선인지 시스템에서 수신기 중심 스펙트럼 센싱 기술을 제안하였다. 제안한 센싱 기술은 주사용자 수신기의 비컨 신호를 센싱하여 주사용자 수신기에 미치는 간섭을 추정할 수 있어 기존의 송신기 중심 센싱 기술에 비해 보다 정확하게 주변의 스펙트럼 환경을 인지하는 것을 가능하게 한다. 성능 분석 결과를 토대로 수신기 중심 스펙트럼 센싱 기술을 도입하면 주파수 효율 관점에서 주사용자의 성능에 거의 영향을 안 미치면서 부사용자의 성능을 현저히 향상시킬 수 있음을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] FCC Spectrum Policy Task Force, "Report of the spectrum efficiency working group," ET Docket No. 02-115, Nov. 2002.
- [2] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 210-220, Feb. 2005.
- [3] E. Hossain, D. Niyato, and Z. Han, *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*. Cambridge Univ. Press, 2009.
- [4] W. Y. Lee and I. F. Akyildiz, "Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 7, pp. 3845-3857, July 2008.
- [5] FCC, "Establishment of interference temperature metric to quantify and manage interference and to expand available unlicensed operation in certain fixed mobile and satellite frequency bands," ET Docket No. 03-289, Nov. 2003.
- [6] T. Clancy, "Formalizing the interference temperature model," *Wireless Commun. & Mobile Computing*, vol. 7, no. 9, pp. 1077-1086, Nov. 2007.

저 자 소 개



신 오 순(정회원)

1998년 서울대학교
전기공학부 학사

2000년 서울대학교
전기공학부 석사

2004년 서울대학교
전기컴퓨터공학부 박사

2004년 3월 ~ 2005년 9월 Harvard University
박사후연구원

2006년 4월 ~ 2007년 8월 삼성전자 통신연구소
책임연구원

2007년 9월 ~ 현재 숭실대학교
정보통신전자공학부 조교수

<주관심분야 : 통신이론, 통신시스템, 통신신호처리>