

채널 유휴 확률 추정을 이용한 인지 라디오 시스템의 유휴 채널 탐색 기법

학생회원 손민성*, 종신회원 신오순*

Idle Channel Search Scheme for Cognitive Radio Systems Based on Probability Estimation of Channel Idleness

Minsung Son* *Student Member*, Oh-Soon Shin*^o *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 다중 채널이 존재하는 인지 라디오 시스템에서 다중 사용자가 협력하여 유휴 채널 탐색 시간을 줄이는 방법을 제안한다. 구체적으로 채널 상태에 대한 마르코프 모델을 토대로 각 채널의 유휴 확률을 추정하고 확률이 높은 순서대로 채널을 센싱함으로써 유휴 채널 탐색 시간을 줄이는 방법을 제안한다. 또한 제안한 탐색 방법을 사용자 그룹을 형성하여 그룹마다 서로 다른 채널을 동시에 센싱하는 방법과 결합함으로써 보다 향상된 센싱 성능을 얻을 수 있도록 한다. 모의실험을 통해 사용자 그룹을 형성하는 방법은 검출 신뢰도를 저하시키지만 탐색 시간을 감소시키는 것을 검증하고, 채널 유휴 확률 추정을 이용한 센싱 순서 결정 방법을 사용하여 임의 탐색 기법에 비해 상당한 탐색 시간 감소 효과를 얻을 수 있음을 검증하였다. 최종적으로 제안한 채널 유휴 확률 추정 기반 탐색 방법과 사용자 그룹 형성 기법을 모두 적용한 인지 라디오 시스템의 유휴 채널 탐색 성능을 검증하였다.

Key Words : Cognitive Radio, Spectrum Sensing, Cooperative Spectrum Sensing, Idle Channel Search, Multiple Channels

ABSTRACT

In this paper, idle channel search schemes based on spectrum sensing are proposed for cognitive radio systems with multiple channels. Specifically, we propose a scheme for determining the order of sensing for multiple channels, for which the probability of each channel being idle is estimated every search interval. By performing sensing in the descending order of the probabilities, the time required for searching idle channels is expected to decrease. In addition, we combine the proposed scheme with a user grouping scheme to further improve the sensing performance. Simulation results show that the user grouping reduces the search time, although it degrades the reliability of detection. The proposed search scheme based on probability estimation of channel idleness is found to reduce the search time significantly as compared to the conventional random search scheme. We apply both the proposed search scheme and user grouping scheme to a cognitive radio system to validate the overall performance.

1. 서 론

무선통신 기술이 발달함에 따라 다양한 무선 응용 기술들이 혼재된 상황에서 주파수 부족 문제에 대한

※ 이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No.2009-0064371).

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 (osshin@ssu.ac.kr) (°: 교신저자)

논문번호: KICS2010-12-619, 접수일자: 2010년 12월 20일, 최종논문접수일자: 2011년 4월 26일

해결책으로 주파수 자원의 사용 효율성을 높일 수 있는 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 특정 시간 및 공간에서 사용되고 있지 않은 유휴 주파수를 탐색하고 주사용자(primary user)에게 간섭을 미치지 않는 한도 내에서 주파수를 효율적으로 활용하는 인지 라디오(cognitive radio) 기술에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다^[1,2]. 인지 라디오 시스템의 핵심이 되는 부분은 부사용자(secondary user)가 주사용자의 주파수 환경을 탐색하고 채널 사용 유무를 판단하는 것인데 이를 스펙트럼 센싱(spectrum sensing)이라고 한다^[3].

대부분의 스펙트럼 센싱에 대한 연구는 단일 채널을 대상으로 검출 신뢰도를 향상시키는데 초점이 맞추어져 왔다. 대표적으로 협력 스펙트럼 센싱 (cooperative spectrum sensing) 기술은 여러 사용자의 개별 센싱 결과를 취합하여 결합함으로써 센싱 신뢰도를 높이고자 하는 방법이다^[3-5]. 하지만 실제 환경에서는 일반적으로 탐색해야 하는 채널이 다수 존재하고 그 중에서 최적의 유휴 채널을 찾아야 한다^[6]. 이를 고려할 때 개별 채널에 대한 검출 신뢰도를 높이는 것도 중요하지만 궁극적으로 다수의 후보 채널 중에서 부사용자가 필요로 하는 최적의 유휴 채널을 최소의 시간을 소모해서 탐색하는 기술이 중요하다.

본 논문에서는 유휴 채널을 찾기 위해 다중 채널을 탐색하는 시간을 줄일 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 마르코프 체인(Markov chain)으로 채널 상태 변화를 모델링하고 이를 이용하여 각각의 채널에 대한 유휴 확률을 지속적으로 추정하여 이를 이용하는 방법이다. 추정된 유휴 확률이 큰 순서대로 채널을 순차적으로 탐색함으로써 채널 탐색 시간을 줄일 수 있다. 또한 제안한 방법을 사용자 그룹을 기반의 협력 스펙트럼 센싱 방법^[7,8]과 결합하여 전체적인 센싱 성능 향상을 검증한다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 고려하고 있는 인지 라디오 시스템 모델과 기존의 스펙트럼 센싱 기술에 대해 설명한다. III장에서는 채널의 유휴 확률 추정에 기반하여 채널 탐색 순서를 결정하는 방법을 제안하고 이를 사용자 그룹을 이용한 탐색 시간 감소 기법과 결합한 방법을 제시한다. IV장에서 모의실험을 통해 제안한 방법의 탐색 시간 감소 성능을 검증하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 인지 라디오 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 N 개의 채널을 K 명

의 부사용자가 협력하여 탐색하는 시나리오를 가정한다. K 명의 부사용자는 각각 채널 전체 또는 일부에 대해 개별 센싱을 수행하고 그 결과를 연판정(soft decision) 형태로 융합 센터(fusion center)에 보고한다. 융합 센터는 부사용자들의 개별 센싱 결과를 취합하여 최종적으로 이용 가능한 유휴 채널을 판별한다. 각 채널은 주사용자에 의해 사용되고 있는 상태(이하 “Busy” 상태)와 사용되고 있지 않은 상태(이하 “Idle” 상태)로 분류된다. 각 채널의 상태 변화는 그림 2와 같이 마르코프 체인에 따라 업데이트 된다고 가정한다^[9]. 주사용자의 평균 채널 사용시간이 채널 탐색 주기에 비해 일반적으로 훨씬 크다는 점을 감안할 때^[10], 그림 2에서 채널 상태가 Busy에서 Idle로 변화할 확률 P_{BI} 과 Idle에서 Busy로 변화할 확률 P_{IB} 는 일반적으로 매우 작은 값을 가질 것이다. 즉, 채널 상태를 유지하는 확률이 변화할 확률보다 훨씬 클 것이다. 각 채널의 초기 상태는 Busy 확률이 0.5라고 가정하였다.

부사용자는 한 번에 하나의 채널을 센싱할 수 있고 사용 가능한 유휴 채널을 찾을 때까지 순차적으로 탐색한다. 주사용자 신호에 대한 별다른 제약이 없다는 장점 때문에 가장 실용적 스펙트럼 센싱 방법인 에너지 검출 방식을 이용하여 주사용자 신호의 존재 유무를 판단한다고 가정한다^[3]. 부사용자 k 의 에너지 검출기는 채널 n 에 대한 센싱을 수행하기 위해 해당 채널에 대한 V 개의 신호 표본을 취하여 에너지를 누적함으로써 출력 $E_k(n)$ 을 생성한다. $E_k(n)$ 은 주사용자 신호의 존재 유무에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

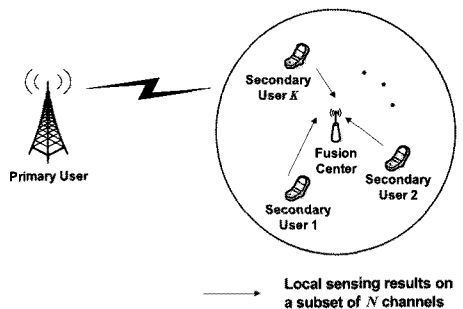


그림 1. 협력 스펙트럼 센싱 시스템 모델.

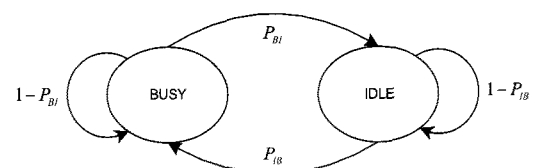


그림 2. 마르코프 체인 상태 전이 모델.

$$E_k(n) = \begin{cases} \sum_{v=1}^V |w_k(n,v)|^2, & H_0 \\ \sum_{v=1}^V |s_k(n,v) + w_k(n,v)|^2, & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 H_0 과 H_1 는 각각 주사용자 신호가 존재하지 않는 가설과 존재하는 가설을 나타내며, $s_k(n,v)$ 와 $w_k(n,v)$ 는 각각 채널 n 에서의 주사용자로부터의 수신 신호와 잡음 신호의 v 번째 표본을 나타낸다. 일반적인 협력 스펙트럼 센싱 방법은 융합 센터가 각 채널에 대한 K 명의 부사용자의 에너지 검출기 출력을 취합한 다음 이를 결합하여 결정 변수를 생성한다. 각 부사용자의 에너지 검출기 출력에 동일한 가중치를 준다고 가정하고 사용자 수로 에너지 값을 정규화하면 채널 n 의 결정 변수는 다음과 같다⁵⁾.

$$E(n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K E_k(n) \quad (2)$$

융합 센터는 식 (2)의 결정 변수를 정해진 임계치 (threshold) λ 와 비교하여 최종적으로 채널 사용 가능 여부를 판단한다. 즉, $u(\cdot)$ 를 단위 계단 함수 (unit step function)라고 할 때,

$$D(n) = u(E(n) - \lambda) \quad (3)$$

의 값이 1인 경우 채널 n 을 Busy 상태라고 판단하고, 0인 경우 채널 n 을 Idle 상태로 판단한다.

III. 제안하는 채널 탐색 기법

3.1 채널 유휴 확률 추정에 기반한 센싱 순서 결정 기법

유휴 채널을 탐색하는 가장 단순한 방법은 미리 정해진 순서 또는 임의의(random) 순서로 채널을 센싱하는 방법이다. 이러한 방법을 통칭하여 임의 탐색(random search) 기법으로 정의한다. 만약 채널 탐색을 수행하는 구간마다 각 채널의 상태가 이전 상태와 무관하게 독립적으로 상태가 바뀌고 모든 채널이 Idle 상태일 확률이 동일하다면 이러한 탐색 방법이 최적의 탐색 방법이 될 것이다. 하지만 II장에서 언급하였듯이 일반적으로 채널의 상태가 바뀔 확률보다 채널이 상태를 유지할 확률이 훨씬 크다. 다시 말하면, 이전 탐색 구간에서의 Idle 상태의 채널은 현재 탐색 구

표 1. 채널의 유휴 확률, 센싱 순서 및 실제 채널 상태.

탐색 구간	채널 유휴 확률 $P_f(n,t)$				센싱 순서				채널 상태			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.50	0.50	0.50	0.50	1	2	3	4	I	B	I	B
2	0.80	0.50	0.50	0.50	1	2	3	4	B	I	I	B
3	0.20	0.80	0.50	0.50	4	1	2	3	B	I	I	B
4	0.32	0.80	0.50	0.50	4	1	2	3	B	B	I	B
5	0.39	0.20	0.80	0.50	3	4	1	2	B	B	I	B
6	0.44	0.32	0.80	0.50	3	4	1	2	B	B	I	B
7	0.47	0.44	0.80	0.50	3	4	1	2	B	B	I	B
8	0.49	0.47	0.80	0.50	3	4	1	2	B	B	I	I

간에서도 Idle 상태일 확률이 크고, 마찬가지로 Busy 상태에 있는 채널은 Busy 상태를 유지할 확률이 크다. 이러한 확률적 특성을 이용하여 이전 채널 탐색에서의 정보로부터 각 채널의 유휴 확률을 추정할 수 있다. 추정된 유휴 확률이 큰 순서대로 채널을 센싱하면 유휴 채널을 탐색 하는데 소모되는 시간을 줄일 수 있을 것이다.

채널 상태가 그림 2의 마르코프 체인에 따라 탐색 구간마다 업데이트 된다고 가정하면, 채널 n 의 현재 유휴 확률 $P_f(n,t)$ 는 이전 탐색 구간에서 동일 채널의 유휴 확률 $P_f(n,t-1)$ 과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$P_f(n,t) = (1 - P_{IB}) \cdot P_f(n,t-1) + P_{BI} \cdot (1 - P_f(n,t-1)) \quad (4)$$

제안하는 탐색 방법은 융합 센터가 식 (4)에 따라 각 채널의 유휴 확률을 업데이트하고 유휴 확률이 큰 순서대로 부사용자들에게 센싱하도록 하는 것이다. 유휴 채널 검출이 완료되면 센싱을 중단하고, 다음 탐색을 위해 센싱을 수행한 채널 중에서 Idle 상태로 판정된 채널은 유휴 확률을 1로, Busy 상태로 판정된 채널은 유휴 확률을 0으로 재설정한다. 표 1은 채널 수 $N=4$ 인 경우 식 (4)를 이용하여 계산한 각 채널의 유휴 확률과 이에 따라 결정된 센싱 순서, 그리고 실제 채널의 상태에 대한 예를 보여준다. 모든 채널의 초기 유휴 확률은 0.5로 설정하였다. 표 1을 보면 시간이 지남에 따라 실제 Idle 상태의 채널을 우선적으로 센싱하는 것을 확인할 수 있다.

제안한 센싱 순서 결정 방법을 사용하면 임의로 순서를 결정하는 방법에 비해 상대적으로 적은 수의 채널에 대한 센싱을 수행하고 유휴 채널을 검출할 수 있을 것으로 예상된다. 식 (4)의 채널 유휴 확률을 계산하기 위해서는 P_{BI} , P_{IB} 가 필요한데 실제로 융합 센

터가 정확한 값을 알 수 없기 때문에 적절한 값으로 설정하여야 한다. 그 영향에 대해서는 IV장에서 언급할 것이다.

3.2 제안 기법과 사용자 그룹 형성 기법의 결합

3.1에서는 다중 채널이 존재할 때 효과적으로 센싱 순서를 결정하는 방법을 제안하였다. 한편, [7, 8]에서 제안된 사용자 그룹 형성 기반의 센싱 방식은 각 사용자가 센싱 해야 하는 채널의 수를 효과적으로 줄일 수 있는 방법으로 제안한 채널 유휴 확률 추정에 기반한 센싱 순서 결정 기법과 결합하면 보다 향상된 센싱 성능을 얻을 수 있을 것이다. 아래에서는 사용자 그룹 형성 기법에 대해 기술하고, 제안 기법과 결합되었을 때의 성능은 IV장에서 제시할 것이다.

사용자 그룹 형성 기법은 N 개의 채널을 K 명의 사용자가 분할하여 탐색하는 방법이다. 융합 센터는 K 명의 사용자를 M 개의 중첩되지 않는 그룹으로 분할하고, 각 그룹에 속한 K/M 명의 사용자는 N/M 개의 채널에 대한 센싱만 수행하도록 한다. 따라서 동시에 M 개의 채널을 병렬적으로 탐색할 수 있고 전체 채널을 탐색하는데 N/M 번의 센싱이 필요하다. 따라서 채널을 유휴 채널 탐색에 소모되는 시간을 M 배 줄일 수 있다. 그림 3은 $K=4$, $N=8$ 인 경우 사용자 그룹 수 M 에 따라 각 사용자가 유휴 채널 탐색을 위해 채널 별로 센싱을 수행하는 순서에 대한 일례를 도식적으로 보여준다. 그림에서 T 는 각 사용자가 하나의 채널을 센싱 하는데 소요되는 시간을 나타낸다. 그림 3으로부터 사용자 그룹 수가 커질수록 단시간에 많은 채널을 탐색할 수 있음을 확인할 수 있다.

사용자 그룹 형성 기법을 사용하였을 때 융합 센터는 채널 n 에 대한 결정 변수를 다음과 같이 생성할 수 있다.

$$E(n) = \frac{M}{K} \sum_{k \in G(n)} E_k(n) \quad (5)$$

식 (5)에서 $G(n)$ 은 채널 n 에 대한 센싱을 수행하는 사용자 그룹에 속한 사용자의 인덱스를 나타내는 집합이고 K/M 개의 원소를 가진다. 융합 센터는 식 (3)에서와 같이 식 (5)의 결정 변수를 임계치와 비교하여 각 채널의 상태를 판정한다. 그룹 수가 늘어나면 각 채널에 대해 센싱을 하는 사용자 수가 줄어들기 때문에 검출 성능, 즉 센싱 결과의 정확도는 저하될 것이다. 따라서 탐색 시간과 검출 성능의 trade-off 관계에 따라 적절한 그룹 수 M 을 선정하는 것이 중요하다.

IV. 모의실험 결과

이번 장에서는 III장에서 제안한 유휴 채널 탐색 기법의 성능을 모의실험을 통해 검증한다. 모의실험에서 부사용자 수 $K=8$, 에너지 검출기의 누적 샘플 수 $V=10$ 으로 가정하였다. 주사용자로부터 각 부사용자에 수신되는 신호는 서로 독립적인 레일리 페이딩 (Rayleigh fading) 채널로 겪고 백색 가우시안 부가잡음 (additive white Gaussian noise)이 더해지는 것으로 가정하고, 각 부사용자의 평균 수신 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio: SNR)는 동일하다고 가정한다. 페이딩은 에너지 검출기의 누적 구간 동안은 일정하며 센싱 구간마다 독립적으로 변하는 블록 페이딩 모델을 가정하였으며, 각 부사용자의 에너지 검출기 출력은 에러 없이 융합 센터에 전달되는 것으로 가정한다. 부사용자가 하나의 채널을 센싱하는 시간 T 는 편의상 1로 정규화 하였다.

먼저 채널 유휴 확률 추정을 이용한 센싱 순서 결정 방법이 채널 탐색 시간에 미치는 영향을 검증한다. 그림 4에서는 편의상 한명의 부사용자가 100개의 채널을 탐색할 때 한 개의 유휴 채널을 검출하는데 걸리는 시간을 그래프로 나타낸 것이다. 이 그림은 임의 탐색 기법과 제안한 기법의 채널 탐색 순서의 영향을 검증하기 위한 것으로 각 선택된 채널에 대한 센싱은 에러 없이 이상적으로 이루어진다고 가정하였다. 따라서 평균 센싱 시간은 순수하게 에너지 검출을 이용한 센싱에 걸리는 시간의 평균값을 나타낸다. 제안한 방법에 대해서는 부사용자가 식 (4)를 계산할 때 $p (= P_{IB} = P_{BI})$ 값을 정확히 아는 경우와 0.1로 고정하고 계산한 경우, 그리고 이론적인 하한 값(lower bound)의 평균 센싱 시간을 나타내었다. 임의 탐색 방법의 경우는 p 값에 관계없이 성능이 동일한데, 이는

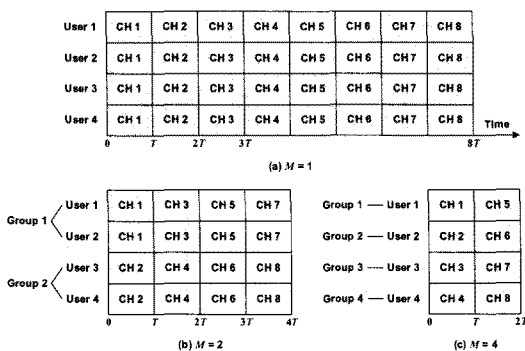


그림 3. $K=4$, $N=8$ 인 경우 사용자 그룹 수 M 에 따른 유휴 채널 탐색을 위한 센싱 순서.

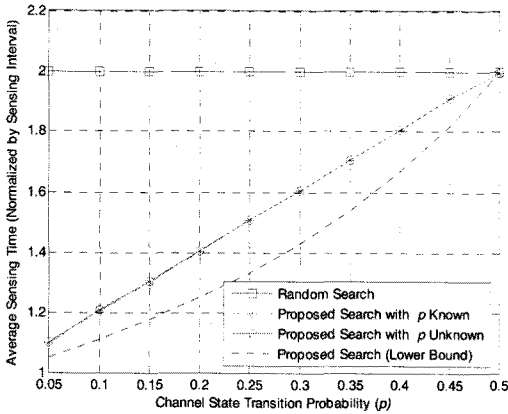


그림 4. 채널 상태 천이 확률에 따른 평균 탐색 시간 비교

이론적으로 쉽게 설명할 수 있다. 그림 2의 마르코프 모델에서 p 에 관계없이 정상 상태(steady state)에서 채널이 Idle 상태일 확률과 Busy 상태일 확률은 0.5로 동일하고, 따라서 평균 센싱 시간은 $\sum_{n=1}^{\infty} n(0.5)^n = 2$ 가 된다. 반면, 제안한 방법은 p 값이 감소함에 따라 평균 센싱 시간이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 평균 센싱 시간의 하한 값(lower bound)을 이용하여 설명할 수 있다. 그림 4에서 하한 값은 항상 유휴 확률이 가장 큰 채널, 즉 이전 센싱 구간에서 Idle 상태였던 채널을 먼저 센싱하는 경우의 평균 센싱 시간으로 $\sum_{n=1}^{\infty} np^{n-1}(1-p) = 1/(1-p)$ 와 같이

계산한 것이다. 따라서 p 값이 감소하면 평균 센싱 시간이 점점 감소한다. 실제 값과 하한 값과의 차이는 유휴 확률 추정 오차에 기인한 것으로 임의 탐색 방법에 대한 성능 향상과 비교할 때 상대적으로 미약한 것으로 생각된다. 또한 $p < 0.5$ 인 경우 제안한 방법의 성능이 임의 탐색 보다 항상 우수함을 확인할 수 있다. 예를 들어 $p=0.1$ 인 경우 제안한 탐색 방법을 사용하면 임의 탐색에 비해 탐색 시간이 40% 감소한다. $p=0.5$ 인 경우는 이전 상태에 관계없이 임의적으로 채널 상태가 변하기 때문에 두 방법의 성능이 동일하다. 또한 정확한 p 값에 대한 정보 없이도 제안한 탐색 방법의 성능 열화는 거의 없음을 확인할 수 있다.

그림 5는 사용자 그룹 형성 기법을 적용한 경우 사용자 그룹 수 M 에 따라 융합 센터 판정의 수신기 동작 특성(receiver operating characteristic)이 어떻게 변하는지를 보여준다. 주사용자 신호에 대한 각 부사용자의 SNR은 -10dB와 0dB인 경우를 고려하였다. 검출 확률(detection probability)은 실제 Idle 상태의

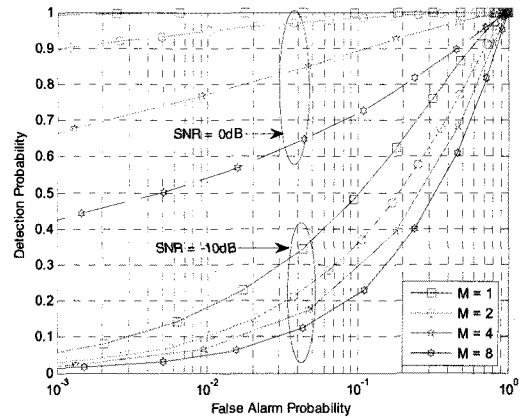


그림 5. 사용자 그룹 수에 따른 수신기 동작 특성.

채널을 Idle 상태로 판정하는 확률, 오경보 확률(false alarm probability)은 실제 Busy 상태의 채널을 Idle 상태로 판정하는 확률을 나타낸다. 사용자 그룹 수 M 이 증가할수록 각 채널을 센싱 하는 사용자 수가 감소하여 수신기 동작 특성이 열화됨을 확인할 수 있다. 하지만, 탐색 시간은 그룹 수에 비례하여 줄어든다.

그림 6은 제안한 유휴 확률 추정을 이용한 센싱 순서 결정 방법과 사용자 그룹 형성 기법을 모두 적용하였을 때 임계값 변화에 따른 유휴 채널 평균 탐색 시간을 비교한 것이다. SNR = -5dB로 설정하였고, 그림 4에서와는 달리 검출 오류로 인한 영향을 반영하였다. 즉, 실제 채널 상태가 Idle인데 Busy라고 판단한 경우는 다른 채널을 탐색하는 시간이 부가적으로 필요하고, 반대로 실제 채널 상태가 Busy인데 Idle로 판정하는 경우는 특정한 값의 페널티 시간(penalty time)을 겪은 후에 유휴 채널 탐색을 다시 시작할 수 있다. 전체 채널의 수 $N=100$ 으로 가정하였고, 페널

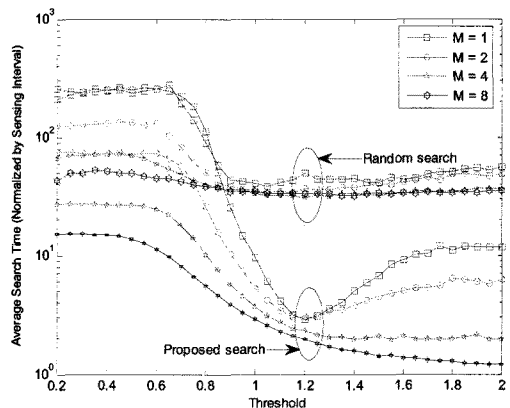


그림 6. 전체 시스템의 평균 채널 탐색 시간 비교

터 시간은 10으로 설정하였다. 채널 상태 전이 확률 P_{IB} , P_{BI} 는 0.2로 동일하게 설정하였다. 먼저, 사용자 그룹 수가 늘어남에 따라 평균 탐색 시간이 감소함을 알 수 있다. 이는 검출 신뢰도 저하보다 센싱할 채널의 수가 줄어드는 효과가 탐색 시간에 미치는 영향이 더 크다는 것을 의미한다. 그리고 제한한 채널 유휴 확률 추정을 이용한 센싱 순서 결정 기법을 적용하면 임의 탐색 기법에 비해 평균 탐색 시간이 현저히 감소함을 확인할 수 있다. 예를 들어, $M=8$ 인 경우 임계값을 최적으로 선택하면 제안한 방법은 평균 탐색 시간이 1.2이지만, 임의 탐색 방법의 경우는 31.8로 25 배 이상의 감소 효과가 있음을 보여준다.

V. 결 론

무선통신 기술의 발달과 다양화로 인해 주파수 부족현상이 점점 가속화됨에 따라 인지 라디오 기술의 중요성이 커지고 있다. 본 논문에서는 인지 라디오 시스템에서 유휴 채널 탐색 시간을 줄이기 위한 기법을 제안하였다. 제안한 방법은 각 채널의 유휴 확률을 추정하고 이를 바탕으로 센싱 순서를 결정함으로써 채널 탐색 시간을 줄이는 효과가 있다. 또한 제안한 방법을 사용자 그룹 형성 기법과 결합하여 협력 스펙트럼 센싱에 적용함으로써 다중 채널이 존재하는 경우보다 향상된 성능을 얻을 수 있음을 검증하였다. 모의 실험 결과 제안한 기술과 사용자 그룹 형성 기법을 적용하면 인지 라디오 시스템의 유휴 채널 평균 탐색 시간을 현저히 줄일 수 있음을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.23, No.2, pp.210-220, Feb. 2005.

[2] E. Hossain, D. Niyato, and Z. Han, *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*. Cambridge Univ. Press, 2009.

[3] W. Y. Lee and I. F. Akyildiz, "Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.7, pp.3845-3857, July 2008.

[4] W. Zhang, R. K. Mallik, and K. B. Letaief, "Cooperative spectrum sensing optimization in

cognitive radio networks," *Proc. IEEE Inter. Conf. Commun. (ICC)*, pp.3411-3415, Beijing, China, May 2008.

[5] J. Ma and Y. Li, "Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp.3139-3143, Washington, DC, USA, Nov. 2007.

[6] A. E. Leu, B. L. Mark, and M. A. McHenry, "A framework for cognitive WiMAX with frequency agility," *Proc. IEEE*, Vol.97, pp.755-773, Apr. 2009.

[7] A. R. Biswas, T. C. Aysal, S. Kandeepan, D. Kliazovich, and R. Piesiewicz, "Cooperative shared spectrum sensing for dynamic cognitive radio networks," *Proc. IEEE Inter. Conf., Commun. (ICC)*, Dresden, Germany, June 2009.

[8] S.-H. Wu, C.-Y. Yang, and D.-H. T. Huang, "Cooperative sensing of wideband cognitive radio: a multiple-hypothesis-testing approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.59, pp.1835-1846, May 2010.

[9] A. Motamedi and A. Bahai, "MAC protocol design for spectrum-agile wireless networks: stochastic control approach," in *Proc. IEEE DySPAN*, Dublin, Ireland, Apr. 2007, pp.448-451.

[10] H. Kim and K. G. Shin, "In-band spectrum sensing in cognitive radio networks: energy detection or feature detection?," *Proc. ACM Inter. Conf. Mobile Computing and Networking*, pp.14-25, San Francisco, CA, USA, Sept. 2008.

손민성 (Minsung Son)

학생회원



2004년 3월~현재 숭실대학교
정보통신전자공학부 학부 과정
<관심분야> 인지라디오 시스템, 스펙트럼 센싱

신 오 슨 (Oh-Soon Shin)

종신회원



1998년 2월 서울대학교 전기
공학부 학사

2000년 2월 서울대학교 전기
공학부 석사

2004년 2월 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 박사

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

2006년 4월~2007년 8월 삼성전자 통신연구소 책임
연구원

2007년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부
조교수

<관심분야> 통신이론, 통신시스템, 통신신호처리