

인지 라디오 시스템에서 주파수 상황 인지 능력 향상을 위한 감지 채널 스케줄링 기법

(A Sensing Channel Scheduling Scheme for Improving the Cognition Ability in Cognitive Radio Systems)

한 정 애 [†] 전 화 속 ^{††}
(Jeong Ae Han) (Wha Sook Jeon)

요 약 주파수 상황에 대해 정확히 인지하는 기법은 사용되고 있지 않은 주파수를 활용하는 인지 라디오 시스템에서 중요한 연구 과제 중 하나이다. 본 논문에서는 인지 라디오 ad hoc 네트워크에서 주파수 상황 인지 능력을 향상시키기 위한 감지(sensing) 채널 선택 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 각 인지 라디오 사용자가 감지한 정보를 활용함으로써 협동 감지를 실현할 수 있도록, 마스터(master)를 가지는 일종의 클러스터(cluster)를 이루어 채널 상황 정보를 수집/분석한다. 특히, 라이선스를 가진 사용자의 전송 반경이 한정되어 있다는 점을 활용하여 인지 라디오 사용자들이 각기 다른 주파수 대역을 감지하게 함으로써 좀 더 빠르고 정확하게 주파수 대역의 상황을 인지한다. 제안하는 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 평가하고 마스터 없이 개별적으로 주파수 상황을 인지하는 기법과 클러스터를 이루되 공간적으로 채널이 비어있을 수 있다는 점을 활용하지 않는 기법과 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과 제안하는 기법이 많은 빈 채널을 확보하면서도 빠른 시간 내에 라이선스 사용자를 발견함으로써 라이선스 사용자와 인지 라디오 사용자의 요구를 동시에 만족시킬 수 있음을 보였다.

키워드 : 인지 라디오 시스템, 라이선스 사용자, 인지 라디오 사용자, 주파수 상황 인지

Abstract The scheme for recognizing the channel availability is one of the most important research issues in cognitive radio systems utilizing unused frequency bands. In this paper, we propose a novel scheme of selecting sensing channel in order to improve the sensing ability of frequency status in cognitive radio ad hoc networks. To fully exploit the sensing ability of each cognitive radio user, we adopt a master for a cluster which is made of several cognitive radio users. By gathering and analyzing the sensing information from cognitive radio users in the cluster, the cooperative sensing is realized. Since the transmission range of a licensed user is limited, it is possible that a master determines different sensing channels to each cognitive radio users based on their location. By making cognitive radio users sense different channels, the proposed scheme can recognize the state of wireless spectrum fast and precisely. Using the simulation, we compare the performance of the proposed scheme with those of two different compared schemes that one makes cognitive radio users recognize the frequency status based on their own sensing results and the other shares frequency status information but does not utilize the location information of licensed user. Simulation results show that the proposed scheme provides available channels as many as possible while detecting the activation of licensed user immediately.

Key words : cognitive radio systems, licensed user, cognitive radio user, cognition of frequency status

· 이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-311-D00156)

[†] 학생회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부
han@mobilenet.snu.ac.kr

^{††} 종신회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부 교수
jeon@cse.snu.ac.kr

논문접수 : 2007년 4월 17일
심사완료 : 2008년 1월 11일

Copyright © 2008 한국정보과학회 : 개인 목적이거나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 정보통신 제35권 제2호(2008.4)

1. 서론

무선 통신이 시작된 이래 무선 통신 서비스의 종류와 수요는 폭발적으로 증가하고 있다. 이와 같이 점차 다양해지는 무선 서비스를 지원하기 위해서는 더 많은 무선 자원이 필요하다. 무선 통신에 필요한 가장 중요한 무선 자원 중 하나는 주파수 대역으로, 주파수 대역은 크제한 무선 서비스가 독점적으로 사용하는 주파수 대역과 누구나 사용할 수 있는 대역으로 나눌 수 있다.

무선 주파수는 한정된 자원이기 때문에 특정 시스템이 일부 주파수 대역을 독점적으로 사용하기 위해서는 고가의 라이선스 비용을 지불해야만 한다. 그리고 이미 통신 품질이 좋은 많은 무선 주파수가 초기 무선 통신 시스템에 할당되어 있다. 따라서 앞으로 생겨날 무선 서비스를 위한 무선 자원은 매우 부족한 실정이다. 그런데 최근 연구 조사 결과에 따르면 특정 무선 서비스에 독점적으로 할당된 주파수라 하더라도 시간과 공간상으로 볼 때 항상 사용되고 있지는 않다고 한다[1].

한편 라이선스 없이도 사용할 수 있는 주파수 대역인 ISM(industrial/scientific/medical) 대역을 통해서도 무선 서비스를 제공할 수 있다. 현재 무선 LAN(local area network)이나 무선 PAN(personal area network)과 같은 많은 데이터 통신 시스템이 ISM 대역을 활용하여 주파수에 대한 비용 부담 없이 통신 서비스를 제공하고 있다. 특히 필요에 따라 임의로 생성되어 통신하다가 소멸하는 ad hoc 네트워크는 주로 ISM 대역을 활용한다. 그러나 ISM 대역에는 전체 주파수 대역에 비해 매우 좁은 대역만이 할당되어 있다. 이와 같이 좁은 ISM 대역을 사용하는 통신 시스템이 점차 많아짐에 따라 ISM 대역은 곧 포화될 것이다[2].

라이선스가 필요한 주파수는 특정 무선 서비스가 독점하기 때문에 주파수 사용률이 낮고 통신 품질도 좋지만 새로운 무선 서비스는 해당 대역을 사용할 수 없다. 반면 ISM 대역은 많은 무선 서비스로 인해 포화 상태에 이르렀으므로 새로운 무선 서비스가 ISM 대역을 사용하여 높은 서비스 품질을 얻기는 힘들 것이다. 이처럼 지금과 같은 주파수 할당 방식에서는 높은 통신 품질을 제공하는 주파수의 부족을 해결하기 힘들다. 만일 라이선스 사용자, 즉 라이선스를 가진 무선 서비스에게 할당된 주파수 대역을 ISM 대역처럼 다른 무선 서비스와 공유할 수도 있다면 이러한 주파수 부족 문제는 크게 완화될 것이며 새로운 무선 서비스가 활용할 수 있는 무선 자원은 풍부해질 것이다. 그러나 이 경우 라이선스 사용자가 가진 독점권을 침해하지 않도록 주파수 상황을 인지하여 비어있는 주파수만을 사용해야 한다. 이렇게 특정 시간, 일정 공간에서 사용 중이지 않은 주파수

를 인지하여 통신에 활용하는 무선 시스템을 인지 라디오(cognitive radio) 시스템[3]이라 한다.

인지 라디오 시스템은 고정된 주파수 대역만을 사용하는 것이 아니라, 시공간상으로 비어 있는 주파수를 인지하여 적극 활용한다. ad hoc 네트워크에 이러한 인지 라디오 시스템을 적용한다면 혼잡한 ISM 대역이 아닌 넓은 주파수 대역을 활용하여 높은 데이터 전송률을 얻을 수 있을 것이다. 이렇게 인지 라디오 시스템을 적용한 ad hoc 네트워크를 인지 라디오 ad hoc 네트워크라 한다.

인지 라디오 ad hoc 네트워크는 시공간상으로 비어 있는 여러 주파수 대역을 인지하여 전송에 활용할 수 있으므로 일종의 다중 채널 상황이다. 만약 무선 주파수 상태를 정확히 알고 있다면 [4]에서 제안된 DCA(dynamic channel access) 기법을 활용하여 데이터를 전송할 수 있을 것이다. DCA는 RTS/CTS/RES(request to send/clear to send/reserve) 패킷을 제어 채널로 전송하여 데이터 채널 사용을 예약한다. 이때 주파수 대역을 고정된 크기로 나누기 때문에 비어있는 넓은 무선 자원 중 일부만을 사용하게 되어 자원 효율이 떨어지게 된다. 그래서 인지 라디오 시스템을 위해 제안된 [5]는 연속적으로 빈 주파수 대역을 활용하기 위해 고정된 크기의 채널로 나누지 않고 송신자와 수신자가 사용할 수 있는 가장 큰 주파수 대역을 활용한다. 주파수와 시간이라는 자원을 경쟁을 통해 획득하는 [4,5]와 달리 [6,7]은 서로 다른 주파수 환경에 처해 있는 인지 라디오 사용자가 주어진 자원인 시간과 채널을 최대한 활용하기 위해 그 래프 이론을 적용하여 주파수를 할당하는 기법을 제안한다. [5-7]에서 제안된 인지 라디오 ad hoc 연구의 경우 인지 라디오 사용자가 자신의 채널 상황을 정확히 인지한다고 가정하고 있다. 자신의 채널 상황을 인지하지 못할 경우 제안된 기법을 적용하기 힘들 것이다.

한편 인지 라디오 ad hoc 네트워크는 라이선스 사용자의 권한을 보호하는 동시에 인지 라디오 사용자의 높은 서비스 품질 요구를 만족시킬 수 있어야 한다. 따라서 인지 라디오 ad hoc 네트워크에 속한 인지 라디오 사용자는 라이선스 사용자가 사용하지 않고 있는 다수의 주파수를 시공간에서 지속적으로 찾아 통신에 사용해야 할 것이다. 뿐만 아니라 인지 라디오 ad hoc 네트워크는 다양한 주파수 대역을 활용하므로 서로간의 제어 정보를 주고 받기 위한 제어 채널을 유지하는 일이 매우 중요하다[8]. 이때 제어 채널은 ad hoc 네트워크에 속한 모든 인지 라디오 사용자가 사용할 수 있는 채널이어야 한다. 그런데 라이선스 사용자는 다양한 지역에서 서로 다른 주파수를 사용할 수 있기 때문에 공통의 제어 채널을 유지하기 위해서 인지 라디오 사용자는 최

대한 많은 빈 채널을 파악하는 것이 중요하다.

많은 빈 채널을 확보하기 위해서 각 인지 라디오 사용자는 다수의 채널을 센싱해보아야 하며, 이때 인지 라디오 사용자에게 의한 간섭을 피하기 위해서는 필수적으로 모든 인지 라디오 사용자가 감지할 채널에서 통신을 시도하지 않는 침묵 기간(quiet period)를 가져야만 할 것이다. 또한 사용 중이지 않은 채널을 감지한다 하더라도 감지를 위한 특별한 센서가 따로 존재하지 않는다면 인지 라디오 사용자는 통신을 중단하고 원하는 채널을 감지해야 할 것이다. 결국 효과적인 채널 감지를 위해서는 주기적으로 인지 라디오 사용자들이 전송을 멈추고 한 채널을 선택하여 감지해보아야 할 것이다. 이렇듯 다수의 채널을 감지하기 위해서는 침묵 기간과 같은 시간이 필요하므로 [9]에서는 감지하는 주파수 대역과 해당 대역을 감지하는 주기를 상황에 맞추어 조절하는 기법을 제안하였다. 하지만 [9]에서는 라이선스 사용자를 발견하더라도 주위 인지 라디오 사용자와 공유하지 않으며, 채널을 감지하는 주기를 조절하여 부족한 무선 자원을 효율적으로 사용하는데 초점을 맞추기 때문에 이 기법을 활용할 경우 라이선스 사용자를 빠르게 발견하기는 힘들 것이다.

한편 [10,11]에서는 다수의 인지 라디오 사용자가 주파수를 감지한 결과를 공유하여 좀 더 빠르게 라이선스 사용자를 검출하는 기법을 제안하고 있다. 제안된 기법을 다수의 채널에 적용하면 개별적으로 채널 감지한 결과를 공유하여, 라이선스 사용자는 빠르게 발견할 수 있을 것이다. 그러나 한 인지 라디오 사용자가 라이선스 사용자를 발견한다면 모든 인지 라디오 사용자가 해당 채널을 사용하지 않기 때문에 공간상으로 빈 채널을 활용하기 힘들어 주파수 사용률이 낮아질 것이다. 이처럼 인지 라디오 사용자간의 협동 감지를 통해 라이선스 사용자와 빈 채널을 동시에 빠르게 찾는 기법은 아직까지 전무한 실정이다. 이에 본 논문에서는 다수의 인지 라디오 사용자가 클러스터(cluster)를 이룬 후 주기적으로 침묵 주기를 갖고 채널을 감지하며, 채널 감지 결과를 클러스터 내의 사용자들과 공유하고 채널을 효과적으로 감지하기 위해 활용하는 기법을 제시한다. 이러한 기법을 도입함으로써 인지 라디오 ad hoc 네트워크는 라이선스 사용자가 사용하고 있지 않은 많은 무선 주파수를 빠르게 확보할 수 있을 것이다.

이를 위해 본 논문에서는 [12,13]에서 제안된 클러스터 생성 기법을 활용하여 네트워크를 클러스터(cluster)로 나눈 후 클러스터 헤드(cluster head) 또는 마스터(master)가 라이선스 사용자의 위치 정보와 주파수 상황 정보를 관리하도록 한다. 각 인지 라디오 사용자는 한 번에 한 채널을 감지(sensing)하고 그 결과를 마스

터에게 알리며, 마스터는 감지 결과를 종합하여 어느 지역에서 어떤 채널을 사용하는 라이선스 사용자가 활성화되어 있는지 알아낸다. 이러한 방법으로 알아낸 라이선스 사용자의 지역성을 바탕으로 마스터는 각 인지 라디오 사용자마다 감지할 채널을 각기 지정하며, 지정된 채널을 해당 사용자의 감지 채널이라고 한다. 이처럼 각 인지 라디오 사용자의 상황에 맞게 감지 채널을 지정함으로써 라이선스 사용자의 활동을 좀 더 빠르게 검출하면서도 많은 빈 주파수 영역을 확보할 수 있을 것이다. 이와 같은 협동 감지 기법을 활용하면 인지 라디오 사용자는 적은 시간과 값싼 장비로도 자신을 둘러싼 지역의 채널 상황을 정확히 인지하고 사용하여 라이선스 사용자와 인지 라디오 사용자를 동시에 만족시킬 수 있을 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 제안하는 감지 채널 선택 기법에 대해 알아본다. 3장에서 시뮬레이션 모델을 설명한 후 4장에서 시뮬레이션 결과를 알아본다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 제안하는 감지 채널 선택 기법

2.1 라이선스 사용자 모델

무선 주파수 대역은 총 N 개의 채널로 나뉘어 있으며 각각의 대역폭은 $\{B_1, B_2, \dots, B_N\}$ 이다. i 번째 라이선스 사용자는 i 번째 채널에 대한 독점권을 가지고 P_i 의 전송 전력으로 신호를 송신한다. i 번째 라이선스 사용자가 통신을 시작하여 중단할 때까지의 기간은 평균이 $1/\mu_i$ 인 지수 분포에 따라 결정되며, 통신 중단 후 다시 재개할 때까지의 기간은 평균이 $1/\lambda_i$ 인 지수 분포에 따른다고 가정한다. 라이선스 사용자는 전송을 시작할 때마다 새로운 위치에서 전송을 시작하되 전송을 중단할 때까지 움직이지 않는다고 가정한다.

2.2 인지 라디오 시스템

본 논문은 각 인지 라디오 사용자가 자신이 감지한 채널들의 상태를 다른 인지 라디오 사용자에게 알릴 수 있도록 클러스터 구조의 인지 라디오 ad hoc 네트워크를 가정한다. 클러스터는 M 개의 인지 라디오 사용자로 구성되며 그 중 한 사용자가 마스터의 역할을 맡는다. 마스터는 클러스터 내 모든 인지 라디오 사용자로부터 감지 정보를 수신하여 클러스터 내 라이선스 사용자의 상황을 파악하며, 이를 통해 각 인지 라디오 사용자가 감지할 채널을 선택하여 알린다. 이렇게 어느 채널을 어떤 인지 라디오 사용자가 언제 감지할 것인지를 마스터가 결정하므로 한 클러스터 내에서 좀더 효과적으로 전체 채널을 감지할 수 있어 보다 효율적인 협동 감지가 가능할 것이다. 또한 이처럼 마스터가 인지 라디오 사용

자의 감지 채널을 결정하므로, 마스터는 일종의 감지 채널 스케줄러(scheduler)라고 할 수 있다.

한편, 인지 라디오 사용자는 채널 내의 신호 세기가 역치값 γ 를 넘으면 라이선스 사용자가 있다고 판단한다. 이와 같은 라이선스 사용자 검출 방식을 에너지 검출 [14]이라고 한다. 에너지 검출을 할 경우 특정 채널에 다른 인지 라디오 시스템이 있다면 라이선스 사용자로 착각하여 해당 채널을 사용하지 못할 수도 있다. 그럴 때에는 특징 검출[14]을 통해 라이선스 사용자인지 정확히 판별할 수도 있다. 그러나 특징 검출에는 에너지 검출보다 많은 시간이 걸리고, 다른 인지 라디오 시스템을 라이선스 사용자로 착각한다 하더라도 인지 라디오 시스템이 사용할 채널은 충분히 많으므로 본 논문에서는 에너지 검출을 사용한다.

라이선스 사용자의 전송 전력은 거리에 따라 크게 감소하므로 라이선스 사용자가 전송을 시작하더라도 클러스터 내 일부 인지 라디오 사용자는 해당 라이선스 사용자를 검출하지 못할 수 있다. 본 논문에서는 인지 라디오 사용자가 라이선스 사용자를 검출하지 못할 경우, 라이선스 사용자와의 거리가 멀어 사실상 인지 라디오 사용자의 전송이 라이선스 사용자에게 영향을 주지 않을 것이라 가정한다. 인지 라디오 사용자는 에너지 검출 시 사용하는 γ 의 조절로 라이선스 사용자를 검출할 수 있는 영역을 정할 수 있으므로, γ 를 적절히 조절하여 인지 라디오 사용자가 라이선스 사용자에게 미치는 영향을 극히 미미한 정도로 낮출 수 있다. 따라서 위와 같은 가정은 현실적으로 큰 무리가 없을 것으로 예상된다.

클러스터에는 하나의 제어 채널이 있어 감지한 채널에 대한 정보를 주고받는다 가정한다. 제어 채널은 [8]에서 제안된 기법을 활용하여 확보하거나 ISM 대역 중 한 대역을 사용할 수도 있을 것이다. 본 논문에서는 이 두 가지 방법 중 한 방법을 선택하여 제어 채널을 확보한다. 또한 마스터와 클러스터 내 인지 라디오 사용자간에 직접 통신이 이루어질 필요는 없으며 직접 송수신할 수 없는 거리라면 다중 홉(hop)을 거쳐 제어 정보를 주고받는다. 클러스터에 속한 어떠한 인지 라디오 사용자라도 마스터가 될 수 있으며 시스템 동작 중에 다른 인지 라디오 사용자에게 마스터의 역할을 위임할 수 있다. 즉, 본 논문에서 제안하는 기법은 마스터가 존재하는 모든 종류의 ad hoc 네트워크에 적용할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 채널을 효과적으로 감지하기 위해 감지 장비를 따로 갖춘 인지 라디오 사용자뿐만 아니라 단 하나의 송수신 장비를 가지는 인지 라디오 사용자에도 적용할 수 있는 기법을 제안한다. 그러므로 인지 라디오 사용자는 송수신 중에 채널을 감지할 수 없다고 간주한

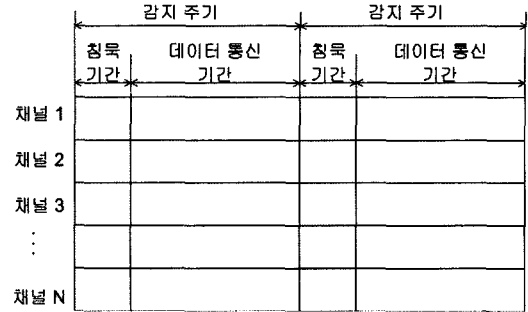


그림 1 감지 주기의 구조

다. 또한 한 사용자가 채널에서 라이선스 사용자 검출을 위한 에너지 검출 중일 때 인근 사용자가 해당 채널에서 데이터를 송신한다면 해당 사용자는 수신된 에너지로 인해 라이선스 사용자가 있다고 잘못 판단할 수 있다. 이러한 송수신 장비 제한과 데이터 송신에 따른 잘못된 감지 결과 방지를 위해 클러스터는 주기적으로 전송을 중지하고 채널을 감지하는 침묵 기간을 가진다. 또한 연속된 두 침묵 기간 사이의 간격을 감지 주기(sensing interval)라고 하자. 그림 1에 감지 주기와 침묵 기간간의 관계가 나와 있다. 감지 주기의 시작과 기간, 그리고 침묵 기간의 길이는 마스터가 주기적으로 전송하여 클러스터 내 노드가 동기를 맞출 수 있도록 한다.

그림 1에 나와 있는 감지 주기의 구조에 따라, 침묵 기간은 감지 주기의 시작에서 시행되며 각 인지 라디오 사용자는 침묵 기간 동안 하나의 채널을 감지한다고 가정한다. 침묵 기간이 끝나면 모든 인지 라디오 사용자는 같은 감지 주기 내에 자신이 감지한 채널에 대한 정보를 마스터에게 전달하고 마스터는 그 정보를 통해 클러스터 내의 채널 상태를 파악한다. 덧붙여 마스터는 2.3절에서 설명할 감지 채널 선택 기법에 따라 각 인지 라디오 사용자가 다음에 감지해야 할 채널을 선택하여 다음 감지 주기가 시작되기 전에 각 인지 라디오 사용자에게 알린다.

2.3 감지 채널 선택 기법

마스터는 매 감지 주기마다 개별 인지 라디오 사용자가 감지할 채널을 선택한 후 알리는 일종의 스케줄러로, 만약 마스터가 이전의 감지 정보를 기반으로 각 인지 라디오 사용자의 상황에 맞게 감지 채널을 선택하여 지정한다면 더욱 효과적으로 많은 채널을 감지할 수 있을 것이다. 특히 라이선스 사용자가 전송을 시작하더라도 그 송신 전력에는 한계가 있으므로 전체 인지 라디오 시스템의 일부에만 영향을 미치게 될 수 있다는 점을 활용해야 할 것이다. 즉, 같은 채널을 감지한다 해도 인지 라디오 사용자의 위치에 따라 라이선스 사용자의 검출 여부는 달라지므로, 파악된 라이선스 사용자의 위치

에 기반하여 클러스터 내 인지 라디오 사용자가 감지할 채널을 선택한다면 효과적으로 라이선스 사용자를 보호할 수 있을 것이다.

이때 라이선스 사용자의 위치는 미리 알려져 있지 않으므로 인지 라디오 사용자의 감지 결과에 따라 그 위치를 파악해야 할 것이다. 다시 말해 라이선스 사용자의 전송 영역에 속하는 인지 라디오 사용자만이 라이선스 사용자를 검출할 수 있을 것이므로, 한 채널에 대한 각기 다른 감지 결과를 통해 마스터는 인지 라디오 사용자와 라이선스 사용자의 위치 관계와 라이선스 사용자를 보호하기 위해서 해당 채널의 사용을 금지해야 할 인지 라디오 사용자들을 파악할 수 있을 것이다.

이러한 정보를 이용하여 마스터는 라이선스 사용자와 인접한 인지 라디오 사용자의 감지 채널을 해당 채널로 선택함으로써 라이선스 사용자의 전송 영역을 효과적으로 보호할 수 있다. 이때 해당 채널에서 라이선스 사용자를 검출하지 못했던 인지 라디오 사용자의 경우, 앞으로 그 라이선스 사용자를 검출하지 못할 확률이 높다. 그러므로 마스터는 같은 감지 주기 내에서 이 인지 라디오 사용자는 다른 채널을 감지하도록 지정하여 동일한 침묵 기간동안 한 클러스터가 다수의 채널을 감지할 수 있게 한다. 한편 라이선스 사용자가 통신을 중단한다면 마스터는 이후 라이선스 사용자가 어느 지역에서 통신을 재개할지 알 수 없으므로, 라이선스 사용자의 위치 정보를 잃게 된다. 그러므로 라이선스 사용자가 사용하고 있지 않는 채널에 대해서 마스터는 모든 인지 라디오 사용자가 동일 침묵 기간동안 한 채널을 감지하도록 지정하여 해당 채널이 비어있는지 여부를 확인해야 한다.

마스터는 클러스터 내 인지 라디오 사용자의 채널 정보를 수집하여 한 채널에서 전송 중인 라이선스 사용자를 감지할 수 있는 인지 라디오 사용자들을 파악할 수 있다. 채널 i 에서 라이선스 사용자를 검출한 인지 라디오 사용자의 집합을 C_i 라고 하자. C_i 는 인지 라디오 사용자의 감지 정보를 모두 파악하고 있는 마스터만이 안다. 만약 채널 i 가 비어있다면, 즉 채널 i 를 사용하는 라이선스 사용자가 전송을 하지 않고 있다면 C_i 는 공집합이다. 따라서 마스터가 채널 i 를 감지하기로 결정하였을 때 C_i 가 공집합이라면 모든 인지 라디오 사용자가 채널 i 를 감지해야 한다. C_i 가 공집합이 아니라면 채널 i 를 사용하는 라이선스 사용자의 위치를 클러스터에서 파악하고 있다는 뜻이다. 그러므로 C_i 에 속한 한 인지 라디오 사용자가 감지하는 것만으로도 충분히 그 채널의 상태를 파악할 수 있다.

j 번째 인지 라디오 사용자가 전송할 때 방해할 수 있는 라이선스 사용자의 채널 집합, 즉 현재 라이선스 사

용자가 채널을 사용하고 있으며 j 번째 인지 라디오 사용자가 이를 감지할 수 있는 채널의 집합을 E_j 라고 하자. 또한 j 번째 인지 라디오 사용자가 감지할 수 있다고 마스터가 보고받은 라이선스 사용자의 채널 집합을 F_j 라고 하자. j 번째 인지 라디오 사용자가 어떠한 라이선스 사용자도 검출하지 못했다면 E_j 와 F_j 는 공집합이다.

마스터는 모든 채널을 정기적으로 감지하기 위해 채널 i 을 k 번째 감지 주기까지 얼마나 자주 감지했는가를 나타내는 $s_i(k)$ 를 도입한다. $s_i(k)$ 는 식 (1)과 같이 가중치 α 를 사용하는 지수 이동 평균(exponential moving average)을 사용하여 계산한다.

$$s_i(k+1) = s_i(k) \times (1 - \alpha) + h_i(k) \times \alpha. \quad (1)$$

이때, $h_i(k)$ 는 k 번째 감지 주기에서 채널 i 를 감지했는지를 나타낸다. 만약 C_i 가 공집합이고 모든 인지 라디오 사용자가 채널 i 를 감지했거나, C_i 가 공집합이 아니고 C_i 에 속하는 인지 라디오 사용자가 채널 i 를 감지했다면 1이다. 그 이외의 경우에 $h_i(k)$ 는 0이다.

이제 감지할 채널을 선택하는 기법을 알아보자. 마스터는 모든 채널이 거의 일정한 비사용률로 감지될 수 있도록 $s_i(k)$ 가 가장 작은 채널 i 를 선택한다. 이때 C_i 가 공집합이라면 모든 인지 라디오 사용자가 채널 i 를 감지한다. 만약 C_i 가 공집합이 아니라면 채널 i 이외에도 다른 채널을 같은 감지 주기에서 감지할 수 있을 것이다. 이때 라이선스 사용자를 적게 발견한 인지 라디오 사용자에게 먼저 감지할 채널을 할당해 나간다면 다른 채널을 감지할 인지 라디오 사용자를 찾기 쉬워질 것이다. 따라서 C_i 에 속한 인지 라디오 사용자 중 다른 채널에서 라이선스 사용자를 가장 적게 발견한 인지 라디오 사용자를 선택한다. 이와 같은 방식으로 채널을 감지할 인지 라디오 사용자를 선택하면 한 클러스터는 동시에 많은 채널을 감지할 수 있을 것이다.

마스터는 채널 i 를 감지할 인지 라디오 사용자를 정한 후 다른 인지 라디오 사용자가 감지할 채널을 채널 i 이외의 채널 중에서 선택한다. 이때에도 각 채널을 정기적으로 감지하면서도 많은 채널을 동시에 감지할 수 있도록 적절한 채널을 선택한다. 따라서 채널 i 를 감지할 인지 라디오 사용자를 선택하는 것과 동일한 방법으로 먼저 채널을 선택한 후 해당 채널을 감지할 인지 라디오 사용자를 정한다. 즉, 마스터는 일단 채널 i 를 제외한 채널 중 $s_m(k)$ 가 가장 작은 채널 m 을 선택한다. 이 과정은 이번 침묵 주기에서 채널 i 를 감지할 인지 라디오 사용자가 이미 선택되어 있으므로 C_m 이 공집합일 경우, 다시 말해 채널 m 이 비어있어 클러스터 내 모든 사용자가 해당 채널을 감지해야 한다면 채널 m 은 이번 감

지 주기에서 감지하기에는 적합하지 않다. 그러나 C_m 이 공집합이 아니라면 C_m 에 속한 인지 라디오 사용자 중 F_j 가 가장 적은 원소를 가지는 j 번째 사용자를 택해 채널 m 을 감지하도록 한다. 이러한 과정을 반복하여 모든 사용자에게 감지할 채널을 지정했거나 모든 채널에 대해 감지할 사용자를 선택하는 과정을 거쳤다면 마스터는 감지 채널을 선택하는 과정을 끝낸다.

예를 들어, 현재 인지 라디오 ad hoc 네트워크가 사용할 수 있는 채널이 총 3개이고 채널 1을 가장 적게 감지했고 채널 3은 다른 채널에 비해 자주 감지하여 $s_1(k) < s_2(k) < s_3(k)$ 라고 가정하자. 또한 3개의 인지 라디오 사용자가 존재하고 채널 1에서 사용자 1과 2가, 채널 3에서는 사용자 2가 라이선스 사용자를 검출하였으나 채널 2에서는 아무 것도 검출하지 못해 $C_1 = \{1, 2\}$, $C_2 = \emptyset$, $C_3 = \{2\}$, 즉 $F_1 = \{1\}$, $F_2 = \{1, 3\}$, $F_3 = \emptyset$ 이라고 가정하자. 마스터는 채널 1의 $s_1(k)$ 가 가장 작으므로 이번 감지 주기에서 채널 1을 감지할 사용자를 선택하려 한다. $C_1 = \{1, 2\}$ 이므로 채널 1을 감지할 사용자로 사용자 1이나 2를 선택할 수 있다. 그러나 사용자 2는 채널 3에서도 라이선스 사용자를 감지하였으므로, 마스터는 한 침묵 기간동안 많은 채널을 감지하기 위해 채널 1을 감지할 사용자로 인지 라디오 사용자 1을 선택한다. 다음으로 마스터는 채널 2를 감지할 사용자를 선택하려 하나, C_2 가 공집합이기 때문에 이번 침묵 기간에서 감지할 수 없다. 따라서 마스터는 채널 2를 감지할 사용자는 지정하지 않고, 다음으로 채널 3을 감지할 사용자를 선택하게 된다. $C_3 = \{2\}$ 이므로 사용자 2가 채널 3을 감지하게 될 것이다. 이로써 모든 채널에 대해 감지할 사용자를 선택하는 과정이 끝난다.

알고리즘 1은 마스터가 k 번째 감지 주기에서 감지할 채널을 선택하고 해당 채널을 감지할 인지 라디오 사용자를 정하는 방법을 보여준다. $|F_j|$ 는 F_j 의 원소수를 반환하며, $u_j(k)$ 는 k 번째 감지 주기 때 j 번째 인지 라디오 사용자가 감지할 채널을 나타낸다.

감지 주기가 시작되면 모든 인지 라디오 사용자는 침묵 기간을 가지며 이전 감지 주기에서 마스터가 지정한 채널이 있을 경우 해당 채널을 감지한다. 그 후 인지 라디오 사용자는 같은 감지 주기 내에 제어 채널을 통해 감지 결과를 마스터에게 전달한다. 이때 E_j , F_j 와 C_j 가 갱신되는 과정을 다음에서 살펴보자.

먼저 채널 i 에서 라이선스 사용자가 전송을 시작했다고 하자. 채널 i 는 비어 있었으므로 클러스터 내 모든 인지 라디오 사용자가 채널 i 를 감지했으며 그 중 여러 인지 라디오 사용자가 라이선스 사용자를 검출할 수 있었

다. 라이선스 사용자를 검출한 j 번째 인지 라디오 사용자는 자신의 E_j 에 i 를 삽입한 후 마스터에게 이를 알린다. 이와 같이 마스터는 채널 i 에서 라이선스 사용자를 검출했다고 알려진 모든 인지 라디오 사용자를 C_i 에 삽입한다. 또한 마스터는 각 F_j ($\forall j \in C_i$)에 i 를 삽입한다.

다음으로 채널 i 를 사용하던 라이선스 사용자가 전송을 중단했을 경우를 알아보자. C_i 에 속한 인지 라디오 사용자들 중 한 인지 라디오 사용자가 채널 i 를 감지하고 라이선스 사용자의 공백을 알아낸다. 이 인지 라디오 사용자는 자신의 E_j 에서 i 를 삭제한 후 마스터에게 채널 i 가 비었다는 사실을 보고한다. 그러면 마스터는 각 F_j ($\forall j \in C_i$)에서 i 를 삭제한 후 C_i 를 공집합으로 만든다.

```

S ← {1, 2, ..., N};
R ← {1, 2, ..., M};
l = min_{i ∈ S} s_i(k);
if C_l ≠ ∅
    while S ≠ ∅ and R ≠ ∅
        m = min_{i ∈ S} s_i(k);
        S ← S - {m};
        if C_m ≠ ∅
            a ← min_{j ∈ C_m ∩ R} |F_j|;
            u_a(k) ← m;
            h_m(k) ← 1;
            R ← R - {a};
        end if
    end while
else
    for all j in R
        u_j(k) ← l;
        h_j(k) ← 1;
    end for
end if
    
```

알고리즘 1 감지 채널 선택 알고리즘

이렇게 마스터가 인지 라디오 사용자에게서 받은 정보를 통해 클러스터의 채널 정보를 파악한다. 그 후, 제어 채널을 통해 클러스터에 속한 모든 인지 라디오 사용자에게 현재 채널의 상황과 알고리즘 1을 통해 선택한 각 인지 라디오 사용자의 감지 채널을 알린다. 그러면 각 인지 라디오 사용자는 다음 침묵 기간 동안 감지할 채널을 확인하고, E_j 에 속한 채널 중 빈 채널로 전환된 채널이 있다면 E_j 에서 삭제한다.

침묵 기간이 지나면 나머지 감지 주기 동안 인지 라디오 사용자는 자신의 E_j 에 속하지 않은 채널을 이용하여 데이터를 전송한다. 즉 j 번째 인지 라디오 사용자의

가용 채널은 E_j 의 여집합이다.

3. 시뮬레이션 모델

시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 기법의 성능을 INDEP과 CLUSTER로 표기한 두 기법의 성능과 비교하였다. INDEP은 [5-7,9]에서 제안된 기법처럼 인지 라디오 사용자가 개별적으로 채널을 감지하되 센싱 결과를 서로 공유하지 않는 기법을 간략화한 것으로, 클러스터를 이루지 않으며 모든 인지 라디오 사용자는 k 번째 감지 주기에서 $k \bmod N$ 번째 채널을 감지한다. 이와 달리 CLUSTER는 [10,11]에서 제안한 기법과 유사하게 클러스터를 이루어 감지 결과를 공유하고, 한 사용자라도 특정 채널에서 라이선스 사용자를 검출하면 모든 사용자는 해당 채널을 사용하지 않는다. CLUSTER의 경우 감지한 정보를 공유하기 때문에 k 번째 감지 주기에서 j 번째 인지 라디오 사용자는 $(k+j) \bmod N$ 번째 채널을 감지하여 라이선스 사용자 검출 시간을 줄일 수 있도록 하였다. 또한 CLUSTER는 모든 인지 라디오 사용자가 비어있다고 알려진 채널만을 가용 채널로 간주한다. 한편 본 논문에서 제안한 기법은 PROPOSED로 표기한다.

인지 라디오 시스템은 최대한 라이선스 사용자에게 영향을 미치지 않으면서 자신이 활용할 채널을 많이 확보하는 것이 중요하므로, 라이선스 사용자가 인지 라디오 사용자로부터 받는 영향과 인지 라디오 사용자의 가용 채널을 주요 성능 지표로 삼는다. 라이선스 사용자가 전송을 시작한 후 인지 라디오 사용자가 이를 검출할 때까지 걸리는 시간을 라이선스 사용자 검출 시간이라고 하자. 라이선스 사용자 검출 시간이 짧을수록 라이선스 사용자가 받는 영향을 줄일 수 있다. 또한 개별 인지 라디오 사용자가 사용할 수 있는 가용 채널의 수를 많이 확보할수록 높은 데이터 전송률을 보일 수 있을 것이다.

인지 라디오 사용자는 균등(uniform) 분포에 따라 반경이 250m인 원형의 클러스터에서 무작위로 초기 위치를 선택한다. 또한 라이선스 사용자는 전송을 시작할 때 마다 클러스터 내에서 균등 분포에 따라 무작위로 위치를 정한다. 본 시뮬레이션은 한 클러스터에서 주어진 무선 주파수 대역을 파악하는데 중점을 두고 있으므로 인지 라디오 사용자의 움직임은 고려하지 않는다. 따라서 전파 전파 모델로는 경로 손실(path loss)과 음영 손실(shadowing)만을 고려한다. 음영 손실은 표준 편차가 8dB인 로그 정규 분포를 따른다고 가정하였다. 라이선스 사용자와 인지 라디오 사용자 사이의 거리가 d 라고 할 때 경로 손실은 다음과 같다.

$$L = \frac{K}{d^\alpha} \tag{2}$$

e 은 3이고 K 는 $(\Lambda/4\pi d_0)^2$ 이다. d_0 는 기준 거리로 1m를 사용하였고, Λ 는 전송 신호의 파장 길이를 나타내며 본 논문에서는 약 1GHz 대역의 주파수를 사용한다고 가정하였다.

모든 라이선스 사용자의 전송 전력 P_t 는 0dBm이고 인지 라디오 사용자가 채널을 감지할 때 사용하는 수신 전력의 역치값 γ 는 -95dBm이다. 모든 라이선스 사용자의 λ_s 와 μ_s 는 1/600초이다. 식 (1)의 α 는 0.2를 사용하였고 인지 라디오 사용자의 수는 10개이다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 2에 채널의 수는 20개이고 감지 주기의 길이를 변경할 때 가용 채널의 수가 나와 있다. 모든 기법의 가용 채널 수는 감지 주기의 길이에 거의 영향을 받지 않는다. 가용 채널 수는 개별 인지 라디오 사용자의 주위에 존재하는 라이선스 사용자의 수에 따라 달라지기 때문이다. 특히 PROPOSED는 클러스터 단위로 채널을 감지하더라도 개별 인지 라디오마다 인접한 라이선스 사용자의 수에 따라 사용할 수 있는 가용 채널이 달라지기 때문에 전체 채널의 수인 20개에 근접하는 18개의 채널을 확보할 수 있다. 그러나 CLUSTER는 클러스터에 속한 모든 인지 라디오 사용자가 라이선스 사용자를 검출하지 못한 채널만이 가용 채널이다. 따라서 라이선스 사용자가 한 인지 라디오 사용자에게만 영향을 받는 다 해도 클러스터 전체가 해당 채널을 사용할 수 없다. 그러므로 CLUSTER는 다른 기법에 비해 적은 수의 가용 채널만을 확보할 수 있다. 즉, 클러스터를 이루고 있다 하더라도 라이선스 사용자의 위치 정보를 활용하지 못한다면 실제로 사용할 수 있는 것보다 적은 수의 채널만을 확보할 수 있다.

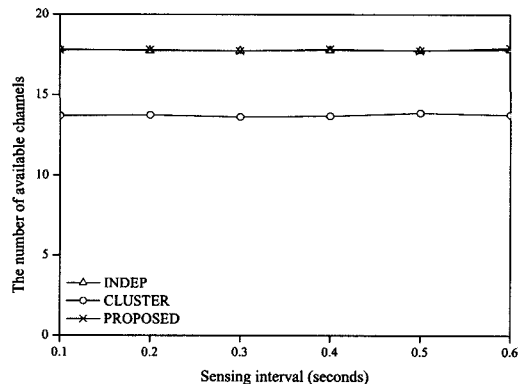


그림 2 감지 주기에 따른 가용 채널의 수

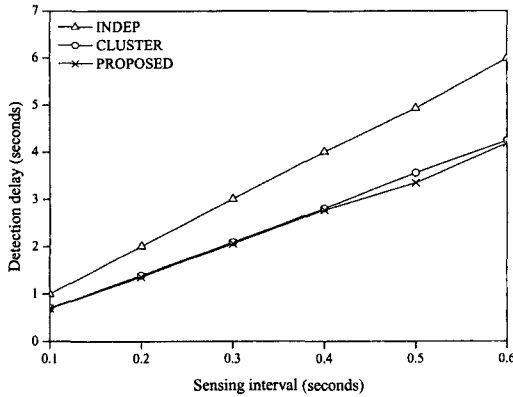


그림 3 감지 주기에 따른 라이센스 사용자 검출 시간

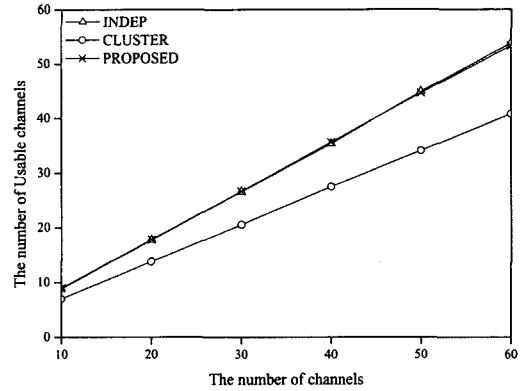


그림 4 채널의 수에 따른 가용 채널의 수

그림 3을 통해 감지 주기에 따른 라이센스 사용자 검출 시간의 변화 추이를 살펴보자. CLUSTER는 모든 인지 라디오 사용자가 분산적으로 채널을 감지하기 때문에 라이센스 사용자 검출 시간이 짧다. 제안하는 기법인 PROPOSED는 동작 중인 라이센스 사용자에 대해서는 인지 라디오 사용자의 수만큼 동시에 감지할 수 있지만 빈 채널에 대해서는 모든 인지 라디오 사용자가 같은 채널을 동시에 감지해야 하기 때문에 CLUSTER에 비해 라이센스 사용자 검출 시간이 길어질 수도 있다. 하지만 PROPOSED는 라이센스 사용자의 위치를 파악하여 채널 감지에 사용하기 때문에 효과적으로 전체 채널을 감지할 수 있어 CLUSTER와 유사한 정도로 라이센스 사용자 검출 시간을 줄일 수 있다. 그러면서도 PROPOSED는 인지 라디오 사용자의 위치에서 사용할 수 있는 채널을 파악할 수 있으므로 CLUSTER에 비해 많은 가용 채널을 확보할 수 있다.

감지 주기의 길이를 0.2초로 고정된 후, 채널의 수가 많아질 때에도 제안하는 기법이 비교 대상 기법에 비해 많은 가용 채널을 확보하는 동시에 라이센스 사용자를 빠르게 검출할 수 있는지 알아보자. 그림 4에 이러한 상황에서 전체 채널의 수에 따른 가용 채널의 수가 나와 있다.

PROPOSED는 라이센스 사용자의 지역성을 활용하여, 공간적으로 비어있는 채널을 사용할 수 있기 때문에 지역성을 활용하지 못하는 CLUSTER에 비해 많은 가용 채널을 확보할 수 있다. 자신의 채널 상황만을 고려하는 INDEP도 라이센스 사용자의 지역성에 영향을 받기 때문에 PROPOSED와 유사한 정도로 가용 채널을 확보할 수 있다.

동일한 상황에서 라이센스 사용자 검출 시간이 그림 5에 나와 있다. 채널이 많아질수록 INDEP는 모든 채널을 감지하는데 드는 시간이 길어지므로 검출 시간도 선

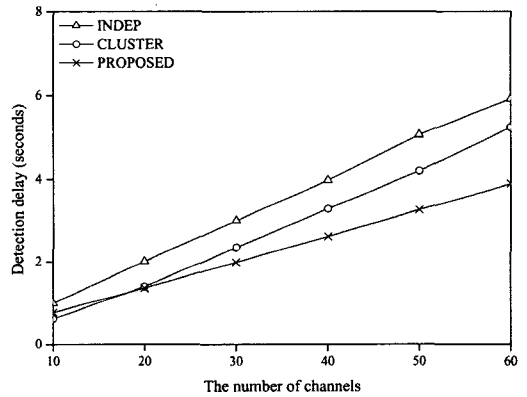


그림 5 채널의 수에 따른 라이센스 사용자 검출 시간

형적으로 증가한다. CLUSTER는 인지 라디오의 수만큼 동시에 여러 채널을 감지하지만 한 인지 라디오 사용자의 입장에서는 채널을 순서대로 감지하기 때문에 채널의 수가 많아지면 라이센스 사용자 검출 시간도 같이 증가한다. 그에 반해 제안하는 기법인 PROPOSED는 감지가 필요한 채널을 선택하여 동시에 많은 채널을 감지하기 때문에 다른 기법들에 비해 매우 적은 시간 안에 라이센스 사용자의 전송을 발견할 수 있다. 따라서 PROPOSED는 감지해야 하는 채널이 늘어나더라도 다른 기법에 비해 효과적으로 라이센스 사용자를 보호하면서도 많은 가용 채널을 확보할 수 있다.

이처럼 제안하는 기법은 파악된 라이센스 사용자의 위치 정보를 적극 활용하여 되도록 많은 인지 라디오 사용자가 다양한 채널을 정확하게 감지할 수 있게 한다. 이를 통해 인지 라디오 ad hoc 네트워크는 채널 상황을 정확하게 인지할 수 있어 라이센스 사용자의 권한을 보호하면서도 가용 채널을 최대한 확보할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 인지 라디오 ad hoc 네트워크에서 각 노드들이 협동적으로 라이선스 사용자를 검출하는 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 각 인지 라디오 사용자가 클러스터를 기반으로 서로 감지한 정보를 공유함으로써 채널의 상황을 정확히 인지할 수 있고 라이선스 사용자 검출 시간도 줄일 수 있었다. 또한 간접적으로 파악한 라이선스 사용자의 위치 정보를 활용하여 지역적으로 사용 가능한 무선 주파수를 찾아냄으로써 라이선스 사용자는 효과적으로 보호하면서도 인지 라디오 사용자가 활용할 수 있는 무선 주파수는 최대한 확보할 수 있었다. 따라서 제안하는 기법은 정확한 채널 정보를 요구하는 인지 라디오 네트워크에 적용되어 라이선스 사용자와 인지 라디오 사용자를 동시에 만족시킬 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] FCC Spectrum Policy Task Force, "FCC Report of the Spectrum Efficiency Working Group," Nov. 2002, http://www.fcc.gov/sptf/files/SEWGFinalReport_1.pdf
- [2] L. Sydanheimo, M. Keskilampi, and M. Kivikoski, "Performance issues on the wireless 2.4 GHz ISM band in a multisystem environment," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, Vol.48, No.3, pp. 638-643, Aug. 2002.
- [3] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol.23, No.2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [4] S. L. Wu, C. Y. Lin, Y. C. Tseng, and J. P. Sheu, "A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks," in *Proc. IEEE I-SPAN '00*, Dec. 2000.
- [5] L. Ma, X. Han, and C. Shen, "Dynamic open spectrum sharing MAC protocol for wireless ad hoc networks," in *Proc. IEEE DySPAN '05*, Nov. 2005.
- [6] M. Thoppian, S. Venkatesan, R. Prakash, and R. Chandrasekaran, "MAC-layer scheduling in cognitive radio based multi-hop wireless networks," in *Proc. IEEE WoWMoM '06*, June 2006.
- [7] M. E. Steenstrup, "Opportunistic use of radio-frequency spectrum: a network perspective," in *Proc. IEEE DySPAN '05*, Nov. 2005.
- [8] S. Krishnamurthy, M. Thoppian, S. Venkatesan, and R. Prakash, "Control channel based mac-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks," in *Proc. IEEE MILCOM '05*, Oct. 2005.
- [9] D. Datla, R. Rajbanshi, A. M. Wyglinski, and G.

J. Mindenm, "Parametric adaptive spectrum sensing framework for dynamic spectrum access networks," in *Proc. DySPAN '07*, May. 2007.

- [10] E. Visotsky, S. Kuffner, and R. Peterson, "On collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sharing," in *Proc. IEEE DySpan*, Nov. 2005.
- [11] Shridhar Mubaraq Mishra, Anant Sahai, and Robert W. Brodersen, "Cooperative Sensing among Cognitive Radios," in *Proc. IEEE ICC*, June 2006.
- [12] Y. -Z. P. Chen and A. L. Liestman, "Approximating minimum size weakly-connected dominating sets for clustering mobile ad hoc networks," in *Proc. ACM MobiHoc '02*, June, 2002.
- [13] J. Y. Yu and P. H. J. Chong, "3hBAC (3-hop between adjacent clusterheads): a novel non-overlapping clustering algorithm for mobile ad hoc networks," in *Proc. IEEE PACRIM '03*, Aug. 2003.
- [14] D. Cabric, S. M. Mishra, R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," in *Proc. IEEE ASILORMAR '04*, Nov. 2004.



한 정 애

2003년 서울대학교 공과대학 컴퓨터공학과 학사. 2005년 서울대학교 공과대학 컴퓨터공학과 석사. 2005년~현재 서울대학교 공과대학 컴퓨터공학과 박사 과정. 관심분야는 resource management in wireless networks, cognitive radios



전 화 속

1983년 서울대학교 공과대학 컴퓨터공학과 학사. 1985년 서울대학교 공과대학 컴퓨터공학과 석사. 1989년 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과 공학박사. 1989년~1999년 2월 한성대학교 컴퓨터공학과 부교수. 1999년 3월~현재 서울대학교 컴퓨터공학과 정교수. 관심분야는 이동통신망, 통신망 프로토콜 설계, 통신망 성능평가, WLAN