

무선 인지 Ad-hoc 네트워크에서 센싱 zone 기반의 분산적 공정 센싱 방법

정희원 최 재 각*, 종신회원 유 상 조*

Distributed Fair Sensing Scheme based on Sensing Zone in Cognitive Radio Ad-hoc Networks

Jae-Kark Choi* *Regular Member*, Sang-Jo Yoo* *Lifelong Member*

요 약

CR 네트워크에서 기존의 단일 노드를 기반으로 하는 센싱 방법은 PU 보호를 위한 센싱 요구조건을 만족시키기 위해 주기적이고 빈번한 센싱을 요구한다. 그러나 각각의 노드는 동작 채널을 결정하기 위해 넓은 대역의 스펙트럼을 관찰해야 하기 때문에, 이 같은 단일 노드에 의한 지속적인 센싱 동작은 센싱 오버헤드를 크게 증가시키게 되어, 확보한 동작 채널에서의 정상적인 송수신 (normal operation) 기회를 감소시키는 것은 물론, 센싱 오버헤드로 인해 노드의 수명이 짧아지는 등의 많은 문제점을 야기할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 본 논문에서는 동일한 센싱 결과가 예측되는 센싱 zone 기반의 분산적 공정 센싱 방법을 제안하고, 제안된 센싱 동작이 PU 시스템을 보호하기 위한 센싱 요구조건을 만족하도록 하는 프레임 구조를 설계하였다. 또한 이렇게 설계된 프레임 구조를 바탕으로 시뮬레이션 실험을 수행하였으며, 그 결과 제안된 방법이 PU 시스템 보호를 위한 요구조건을 만족시키면서 동시에 기존의 개별적 센싱 방법에 비해 센싱 오버헤드를 크게 감소시킬 수 있음을 보였다.

Key Words : Cognitive Radio, Spectrum Sensing, Sensing Zone, Distributed Spectrum Sensing

ABSTRACT

Secondary users should sense the licensed spectrum bands in order to protect the primary users from interference. However, periodic and frequent sensing for immediate detection of primary users usually gives rise to much sensing overhead, and thus will quickly drain the battery as well as deteriorate the performance of a secondary user. To overcome such problems, we focus on the method reducing sensing overhead of each secondary user and propose a distributed fair sensing scheme that the multiple users within a certain area, so-called sensing zone, sense the spectrum bands in a fairly distributed manner and share the results among the users within respective sensing zone. The design of the frame structure for the proposal is also demonstrated while considering the sensing requirements for protecting primary users. The performance results by numerical analyses and computer simulations show that our proposed sensing scheme significantly reduces the sensing overhead of each user compared to the conventional sensing scheme and also satisfies the given sensing requirements for primary user protection.

※ 본 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0079228).

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2010-C1090-1011-0007).

* 인하대학교 정보통신대학원 (jkc@inha.edu, sjyoo@inha.ac.kr)

논문번호: KICS2009-11-595, 접수일자: 2009년 11월 30일, 최종논문접수일자: 2010년 2월 18일

I. 서 론

전통적으로 무선 통신 시스템은 고정된 스펙트럼 대역을 할당 받아 이를 기반으로 동작하는 방식을 취하였다. 최근 무선 통신 기술의 집약적인 발전과 더불어 무선 통신 서비스에 대한 수요는 급격히 증가하고 있지만, 이러한 서비스를 수용하는 무선 통신 시스템들에게 고정적으로 할당할 수 있는 스펙트럼 대역에는 한계가 있다. 이에 한정된 주파수 자원의 효율적 사용을 위해 최근 무선 인지 (CR: Cognitive Radio) 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. CR 기술은 Joseph Mitola III에 의하여 제안되었으며^[1], 현재 스펙트럼 센싱 기술, 스펙트럼 결정 기술, 스펙트럼 공유 기술, 그리고 스펙트럼 이동 기술 등의 다양한 분야에 걸쳐 활발한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다^[2-3]. 또한 IEEE 802.22 WRAN (Wireless Regional Area Networks) 워킹 그룹에 의해 미국 내 TV 대역에 대한 무선 인지 기술 표준화^[4]가 진행 중이다.

CR 기술의 핵심은, 특정 대역에 대한 권한 (license)을 부여 받지 않은 부사용자 (SU: secondary user) 시스템이 해당 대역을 이용하여 통신을 수행하는데 있어서, 해당 대역에 대한 권한을 부여 받은 주 사용자 (PU: primary user) 시스템에게 최대한 간섭 (interference)을 주지 않도록 하는 것이다. 따라서 SU는 PU를 보호하는 한편 비상시 즉각적으로 동작 채널을 바꾸기 위해 넓은 스펙트럼 대역에 대한 센싱을 빈번하게 수행해야 한다. PU 보호를 위한 센싱 요구조건은 최대 탐지 지연시간 (channel detection time), PU 탐지 확률 (probability of detection), 그리고 잘못된 탐지 확률 (probability of false alarm) 등의 사전 정의된 값들로 결정될 수 있다^[4]. CR에서 동작하는 SU의 센싱 방법에 관한 기존의 연구들은 그 목적에 따라 매우 다양하게 진행되고 있다. 단일 SU의 센싱 시 채널의 물리적 특성 (e.g., multi-path, shadowing, fading 등)에 의한 센싱 오류 극복을 위한 협력적 채널 센싱 방법에 관한 연구들은 센싱 정확도 향상에 도움을 준다^[5-6]. [7]에서는 각 SU가 센싱 결과를 미리 할당된 time-slot을 통해 전송함으로써 PU가 출현한 채널에 대한 정보를 인접 노드 간에 공유하도록 한다. 그러나 이들 방법들은 SU간의 동기화를 요구한다. [8]에서는 RTS-CTS 메커니즘을 이용한 분산적 CR MAC에 관한 연구를 수행하였고, [9]에서는 SU의 센싱 결과 전파를 통한 효율적인 센싱 메커니즘에 관한 연구를 수행하였다. 이들 방법들은 SU 간 동기화의 부담을 해소함으로써 보다 ad-hoc 네트워크 특성에

적합하다고 할 수 있지만, 센싱을 수행하는 각각의 SU가 개별적인 센싱을 지속적으로 수행하는 것을 기본으로 하고 있어, SU의 센싱 오버헤드를 감소시키기에는 어려움이 있다.

SU의 원활한 센싱 동작은 PU를 효율적으로 보호할 수 있지만, 과도한 센싱 오버헤드로 인한 에너지 소모 및 처리량의 감소 등의 문제가 발생할 수 있다. 센싱 결과가 동일한 임의의 영역 내에서 동작중인 SU들은 각각 개별적인 센싱을 수행하는 것 보다, 되도록 직접적인 채널 센싱의 횟수를 줄이고 해당 영역 내에서 센싱을 수행한 다른 SU와 센싱 결과를 공유함으로써 과도한 센싱 오버헤드를 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 WRAN과 같이 PU의 전송 반경이 매우 큰 환경에서, ad-hoc 네트워크의 SU들이 분산적으로 공정하게 센싱을 수행하고 그 결과를 상호간에 공유하도록 하여 센싱 오버헤드를 줄이는 것을 목적으로 하는, 센싱 zone 기반의 분산적 공정 센싱 방법 (DFSZ: Distributed Fair Sensing Scheme based on Sensing Zone)을 제안하였다. 이하에서 노드는 SU를 의미한다. DFSZ에서는 임의의 노드가 센싱을 수행하는 경우, 센싱 결과가 동일할 것으로 예측되는 인접한 노드들이 센싱을 수행하지 않고 해당 노드로부터 센싱 결과를 전달받아 간접적으로 PU의 존재 여부를 판단할 수 있도록 한다. Ad-hoc 네트워크의 특성상 중앙의 조정자 역할을 하는 기지국 (base station)이 존재하지 않기 때문에, 각각의 노드는 확률적으로 자신의 센싱 zone을 대표하는 대표 센싱 노드가 된다. 대표 센싱 노드는 일정 기간 동안 채널 센싱을 반복적으로 수행하고 매번 센싱을 마칠 때 마다 센싱 결과를 센싱 zone 내의 다른 노드들에게 전파한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 제안하는 분산적 센싱 동작을 개괄적으로 설명하며, 3장에서는 센싱 zone 기반의 분산적 공정 센싱 방법을 자세히 다룬다. 4장에서는 제안된 분산적 공정 센싱 방법의 프레임 구조를 설계하고, 5장에서는 제안된 방법의 성능을 평가한다. 6장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 분산적 센싱 동작 개요

본 장에서는 ad-hoc 네트워크에서 동작하는 SU들의 분산적 센싱의 목적을 설명하고, 관련 동작을 개괄적으로 소개한다. 위치적으로 상호간에 동일한 센싱 결과를 갖는 SU들이 존재할 때 이러한 SU들이 각기 개별적으로 채널을 센싱하는 것은 각 SU의 센싱 오버

헤드 측면에서 효율적이지 못하다. 반면 이러한 SU들이 교대로 채널을 센싱하고 그 결과를 다른 SU들과 공유한다면, 각 SU의 센싱 오버헤드는 감소할 것이다. 본 논문에서 제안하는 분산적 센싱 방법은 이와 같이 동일한 센싱 결과를 갖는 일정 지역 내에 다수의 노드들이 분포하고 있을 때, 임의의 노드가 대표로 센싱을 수행하는 동안 해당 노드와 인접한 다른 노드들은 정상 동작 (normal operation)을 수행하도록 한다. 센싱을 수행한 노드는 센싱 결과를 인접 노드들에게 전파함으로써 PU의 출현 여부를 공유한다. 각각의 노드는 이러한 센싱 동작을 수행함으로써, 기존에 비해 센싱 오버헤드를 감소시킬 수 있게 된다. 이때, 대표로 센싱을 수행할 노드는 인접 노드들과의 협상 과정 없이 각 노드의 자체적인 판단에 의해 분산적(distributed)으로 결정되는 것을 특징으로 한다. 본 논문에서는 다른 노드들을 대신하여 대표로 센싱을 수행하는 노드를 대표 센싱 노드 (representative sensing node), 대표 센싱 노드가 채널 센싱을 담당하는 구간을 센싱 라운드 (sensing round), 그리고 PU의 출현 탐지를 위해 대표 센싱 노드가 전체 채널을 센싱하는데 소요되는 시간을 센싱 시간 (sensing time)이라 정의하고, 각각을 RSN, SR, 그리고 T_S 로 표기한다. 한번의 SR 내에는 여러 번의 T_S 가 포함될 수 있다.

동일한 센싱 결과를 갖는 n 개의 노드가 존재한다고 가정하자. 이상적인 분산적 센싱은, 연속된 n 번의 SR 중 모든 노드가 각각 한 번의 SR 동안 RSN이 되어 센싱을 수행하고 이를 $(n-1)$ 개의 SU들과 공유함으로써 각각의 센싱 오버헤드를 기존의 $1/n$ 로 감소시키는 것이라 할 수 있다. 그림 1은 두 노드 SU_i 와 SU_j 로 구성된 CR 네트워크의 분산적 센싱 동작 개요를 나타낸 것이다. 이와 같이 이들 두 노드가 교대로 센싱을 수행한다면, 각 노드의 센싱 오버헤드는 기존의 절반정도로 감소할 것이다. 그림 1에 관한 자세한 내용은 3.2절에서 설명한다.

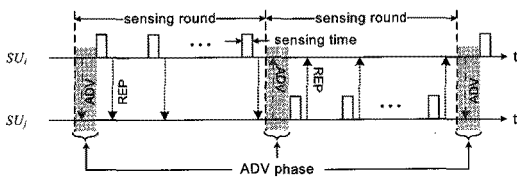


그림 1. 분산적 센싱 동작 개요

III. 센싱 zone 기반의 분산적 공정 센싱 방법

본 장의 3.1절에서는 분산적 센싱을 위한 센싱

zone을 정의하고 이를 바탕으로 하는 분산적 RSN의 결정 방법을 설명한다. 3.2절에서는 분산적 센싱의 동작 알고리즘을 설명한다. 3.3절에서는 분산적 RSN 결정이 공정하지 못하게 발생하는 문제점을 도출하고 이를 극복하기 위한 분산적 RSN 결정 시기의 결정 방법을 제시한다.

3.1 센싱 zone 기반의 분산적 RSN 결정 방법

분산적 센싱을 위해서는 임의의 노드로부터 위치적으로 동일한 센싱 결과를 갖는 영역을 정의할 필요가 있다. 임의의 노드의 전송거리를 d_{max} 라 하고, 임의의 노드로부터 반경 $z^*(\geq d_{max})$ 이내의 영역에 위치한 모든 노드들의 센싱 결과가 동일하다고 가정하면, ad-hoc 네트워크에서 임의의 노드로부터 동일한 센싱 결과를 갖는 노드들은 (1)과 같이 z 홉 거리 이내에 위치한 노드들임을 알 수 있다.

$$z = \max_h \text{subject to: } d_{max} h \leq z^*, h \in \mathbb{N} \quad (1)$$

\mathbb{N} 은 자연수의 집합을 의미한다. 본 논문에서는 임의의 노드로부터 z 홉 거리에 달하는 영역을 센싱 zone이라 정의하였다. 각각의 노드를 기준으로 결정되는 센싱 zone의 특성상, 인접한 두 노드의 센싱 zone은 그림 2와 같이 서로 다를 수 있다.

임의의 노드는 매 SR의 시작시마다 자신의 센싱 zone 내에서 확률에 의해 스스로를 RSN으로 결정한다. 임의의 노드에 대한 매 SR의 시작 시간은 T_{nSR} 이라 표기하고 이에 관한 내용은 3.3절에서 설명한다. 2장에서 언급한 이상적인 분산적 센싱은 결국 n 개의 노드들이 서로 공정하게 센싱을 나누어 수행하는 것이라 할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 LEACH^[10]에서의 확률적 결정 방법을 응용하여 분산적 RSN의 결정에 이용하였다. Ad-hoc 네트워크가 일반적으로 1홉 이웃 노드들을 파악하고 있는 점을 이용하면, 임의의 노드가 k 개의 1홉 이웃 노드를 가질 때 해당 노드를 포함한 z 홉 거리 내의 노드의 수 N_z 는 다음과 같

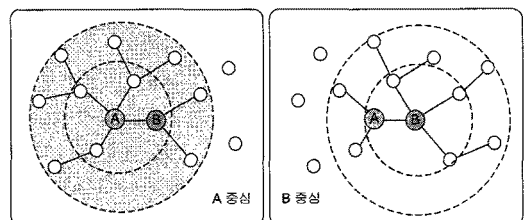


그림 2. 각 노드의 센싱 zone ($z=2$)

이 표현될 수 있다.

$$N_z = z^2 k + 1 \left(\because \pi(d_{\max})^2 : k = \pi(z \cdot d_{\max})^2 : N_z \right) \quad (2)$$

임의의 노드가 자신의 RSN 여부를 판단하는 시점으로부터, 자신을 제외하고 이전까지 RSN으로서 센싱을 수행했던 노드의 개수를 r 이라 하면, 노드는 다음의 확률로 자신의 RSN 여부를 결정하게 된다.

$$p_s = \begin{cases} 0, & \text{if it has been an RSN in the last } (r \bmod N_z) \text{ SRs,} \\ 1/\{N_z - (r \bmod N_z)\}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 zone 기반의 분산적 센싱 동작 구조

분산적 센싱 동작 알고리즘은 각각의 노드가 분산적으로 스스로를 RSN으로 결정하고 이웃 노드들에게 이를 광고하는 ADV(advertisement) 메시지를 전송하는 RSN 광고 구간 (ADV phase), RSN이 채널 센싱을 수행하는 센싱 구간 (SEN phase), 그리고 RSN이 자신과 센싱 결과가 동일한 것으로 예측되는 인접 노드들에게 센싱 결과를 전달하기 위해 REP(report) 메시지를 전송하는 공유 구간 (REP phase) 등으로 구성된다. 이상의 세 가지 단계로 구성된 분산적 센싱 동작 알고리즘은 매 SR의 시작시마다 반복적으로 수행된다. ADV 및 REP 메시지는 센싱 zone (z 홉 거리) 내로 전파 (propagation)되기 위해, 잔여 홉 수 정보를 포함하고 있다. 이하에서는 ADV 및 REP 메시지 내의 잔여 홉 수 정보를 h_R 이라 한다. ADV 및 REP 메시지를 생성한 노드는 전송되는 메시지가 센싱 zone 내로 전파되도록 하기 위해, h_R 을 $z-1$ 로 초기화 한다. ADV 혹은 REP 메시지를 수신한 노드는 $h_R > 0$ 인 경우, 수신한 메시지를 재전송하며, 이때 재전송 되는 메시지 내의 잔여 홉 수는 $h_R \leftarrow h_R - 1$ 로 갱신된다. $h_R = 0$ 인 메시지를 수신한 노드는 재전송을 수행하지 않는다. 이하에서는 각 단계에서의 동작 및 메시지 송수신시 처리과정을 설명한다.

3.2.1 RSN 광고 구간 (ADV phase)

3.1의 분산적 결정에 의해 스스로 RSN이 되고자 하는 SU는 새로운 SR의 시작 시 센싱 zone 내의 노드들에게 ADV 메시지를 전송한다. 그러나 스스로 RSN이 되려던 노드라 하더라도 ADV를 전송하기 이전에 다른 노드로부터 ADV를 수신하는 경우에는 자신의 ADV 메시지 전송을 포기하고 RSN이 되지 않는다. ADV 메시지는 기본적으로 RSN의 ID, 메시지의 잔여 홉 수 h_R , 그리고 다음 SR의 시작 시간 T_{NSR}

등의 정보를 포함하고 있다. RSN 광고 구간 동안 인접 노드로부터 ADV를 수신한 노드는 자신이 현재 유지하고 있는 T_{NSR} 보다 수신한 메시지 내의 T_{NSR} 이 더 큰 경우, 자신의 T_{NSR} 을 갱신하고, h_R 에 따라 ADV 메시지를 재전송 한다. SU들은 T_{NSR} 이 되면, 3.1절의 분산적 RSN 결정 과정을 수행한다.

3.2.2 센싱 구간 (SEN phase)

RSN 광고 구간에서 ADV 메시지를 전송한 노드는 RSN으로서 매번의 센싱 구간 마다 T_S 동안 PU 채널에 대한 센싱을 수행한다.

3.2.3 공유 구간 (REP phase)

RSN은 매 센싱 구간의 종료시마다 센싱한 채널들에 대한 센싱 결과 정보와 자신의 ID, 그리고 메시지의 잔여 홉 수 h_R 를 포함하는 REP 메시지를 생성하여 이를 전송하며, 센싱 zone 내의 REP 메시지의 전파과정은 RSN 광고 구간에서의 동일하다.

센싱 구간 이후에는 반드시 공유 구간이 뒤따르며, 한 번의 SR은 여러 번의 센싱 구간을 포함할 수 있다. 처음으로 CR 네트워크에 진입한 노드는 한 번의 SR에 달하는 시간 동안 ADV 메시지의 수신을 대기 한 후, 수신한 ADV 메시지가 없으면 3.1의 센싱 zone 기반의 분산적 RSN 결정을 시작함으로써 스스로 분산적 센싱 동작을 시작한다.

3.3 T_{NSR} 의 결정 방법

앞서 설명한 바와 같이, T_{NSR} 은 다음 SR의 시작 시간을 나타내며, 이는 곧 노드가 분산적 RSN 결정 과정을 수행하는 시간을 의미한다. 3.1절에서 설명한 센싱 zone 기반의 분산적 RSN 결정 방법은 (3)에 의해 임의의 센싱 zone 내에서 확률적으로 RSN이 결정되도록 한다. 임의의 노드 SU_a 는 수신된 ADV (또는 REP) 메시지들을 전송한 RSN들로 구성된 집합 Z_a 를 유지한다. SU_a 의 T_{NSR} 을 $T_{NSR}(a)$ 라 한다. $\{SU_b, SU_c\} \subset Z_a$ 이고, $T_{NSR}(b) \neq T_{NSR}(c)$ 인 경우, SU_b 와 SU_c 가 분산적 RSN 결정 과정을 통해 각각 ADV 메시지를 전송하고 SU_a 가 이들로부터의 ADV 메시지를 각각 수신한다면, ADV phase에서의 동작에 의해 $T_{NSR}(a) = \max\{T_{NSR}(a), T_{NSR}(b), T_{NSR}(c)\}$ 가 된다. 그림 3a는 이처럼 복수의 ADV를 수신하는 노드의 T_{NSR} 이 지연되는 상황을 나타낸다. 그림 3a에서 SU_a 는 SU_b 로부터 ADV 메시지를 수신한 후, 자신의 다음 SR 시작시간을 $T_{NSR}(d) = T_{NSR}(i) + T_S + SR$ 로 갱신하였다. 그러나 이후, 또 다른 RSN인 SU_j 로부터 ADV를 수신하게 되어, 자

신의 다음 SR 시작시간을 $T_{nSR}(d)=T_{nSR}(j)=t_2+SR$ 로 재차 갱신하게 된다. 이처럼 ADV 메시지 수신을 통해 갱신되는 T_{nSR} 은 노드의 분산적 RSN 결정 동작을 지연시킬 수 있는데, 이러한 T_{nSR} 의 지연이 반복적으로 발생하게 된다면, 노드는 분산적 RSN 결정 동작을 좀처럼 수행하지 못하게 되어 센싱 zone 내에서의 공정한 RSN 결정을 어렵게 할 수 있다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 새로운 노드로부터 ADV를 수신한 노드가 현재 자신이 공정하게 RSN으로 결정되고 있는지를 스스로 검토한 후, 검토 결과에 따라 공정성에 기여할 수 있는 T_{nSR} 을 선택하도록 한다.

임의의 노드 SU_a 는 Z_a 에 속한 노드들이 평균적으로 RSN을 담당한 횟수와 자신이 RSN을 담당할 횟수를 비교하는 방법으로 자신이 현재까지 공정하게 RSN으로 동작하였는지에 대한 검토를 수행한다. SU_a 는 매번 새로운 ADV 메시지를 수신할 때마다 다음과 같이 자신의 공정성을 검토한다.

$$N_{RSN}(a) < E(N_{RSN}(Z_a)) - \delta, (\delta \geq 0) \quad (4)$$

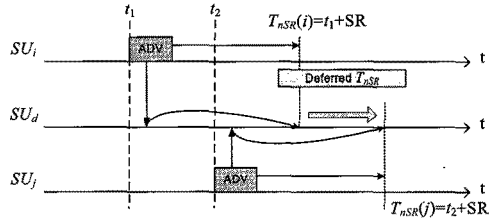
$N_{RSN}(a)$ 와 $E(N_{RSN}(Z_a))$ 는 각각 임의의 노드 SU_a 가 센싱을 수행한 횟수와 Z_a 에 속한 노드들의 평균 RSN 횟수를 의미한다. δ 는 공정성 검토의 민감도 (sensitivity)를 의미하며, $\delta=0$ 이면, 가장 적극적으로 자신의 공정성을 검토한다. 임의의 노드 SU_a 는 임의의 노드 SU_b 로부터의 ADV 메시지를 수신할 때마다 (4)의 조건을 검토하고, 검토 결과에 따라 다음과 같이 자신의 $T_{nSR}(a)$ 를 갱신함으로써 공정한 분산적 센싱에 적합한 $T_{nSR}(a)$ 를 결정한다.

$$T_{nSR}(a) = \begin{cases} \min\{T_{nSR}(a), T_{nSR}(b)\}, & \text{if (4) is TRUE,} \\ \max\{T_{nSR}(a), T_{nSR}(b)\}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

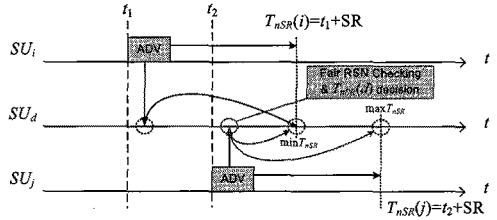
그림 3b는 SU_d 가 (4)와 (5)의 수행을 통해 보다 공정성에 기여할 수 있는 $T_{nSR}(d)$ 를 선택하는 상황을 나타낸다.

IV. 센싱 라운드들의 구간 별 구조 및 설계

본 장에서는 분산적 센싱 동작을 수행하는 노드의 채널 센싱 구간 및 ADV, REP 메시지 전송구간을 worst case를 기반으로 구체화하고, 이를 바탕으로 각 구간에서 사용되는 파라미터들을 분석하여 PU 보호를 위한 센싱 요구조건을 만족하도록 하는 SR을 설계하는 것을 보인다. CR 시스템의 설계 시 가장 우선시



(a) 복수의 ADV 수신에 의한 $T_{nSR}(d)$ 지연



(b) RSN 공정성 검사에 의한 $T_{nSR}(d)$ 결정

그림 3. T_{nSR} 지연 문제 및 결정 방법

되는 요소는 PU 시스템을 보호하는 것이다. IEEE 802.22 WRAN에서는 PU가 출현한 경우, SU가 센싱을 통해 이를 인지하기까지의 채널 탐지 시간(channel detection time)이 최대 2s를 넘지 않을 것을 요구한다. 본 논문에서는 이와 동일한 맥락에서 SU가 사전에 정의된 최대 허용 지연 시간 이전에 PU의 출현을 인지할 수 있을 때, PU 시스템의 보호를 위한 센싱 요구조건이 만족된 것으로 가정한다. 이하에서 PU의 보호를 위해 요구되는 최대 탐지 지연 시간은 T_{maxRD} 로 표기한다. 본 장의 이하에서 다루는 센싱 라운드들의 구조 및 설계는 다음의 가정들을 전제로 하고 있다.

- SU들은 각각 자신의 한 홉 이웃 노드를 인지하고 있다.
- PU 시스템은 WRAN의 TV 방송국 시스템과 같이 매우 큰 전송거리를 가지며, 임의의 센싱 zone 영역에 위치한 임의의 두 노드의 채널 센싱 결과는 언제나 동일하다.
- SU들은 CR 네트워크를 위한 공통 채널을 이용하여 메시지를 전송한다.
- 각 SU는 센싱을 통해 PU의 출현을 감지할 수 있다.

본 논문의 센싱 zone 기반 분산적 센싱 동작을 수행하는 CR 시스템은 worst case에서도 PU 시스템의 출현을 T_{maxRD} 이내에 인지할 수 있어야 한다. 가정에 의해 센싱 zone 내의 노드들은 동일한 센싱 결과를 가지며 RSN은 perfect 센싱을 수행하므로, 분산적 센싱 동작에서의 worst case는 연속된 센싱 구간 간의 간격

이 가장 큰 경우이다. 그림 4는 분산적 센싱 동작을 위한 센싱 라운드 구조를 나타낸 것이다. T_S 는 센싱 구간을 나타낸다. 분산적 센싱에서는 그림과 같이 연속된 센싱 구간 간의 간격을 T_{INT} 와 T_{INT}^* 의 두 가지 종류로 구분할 수 있다. T_{INT} 는 단일의 RSN의 연속된 센싱 구간 간의 간격이고, T_{INT}^* 는 서로 다른 RSN 간의 연속된 센싱 구간 간의 간격이다. T_{maxRD} 요구조건을 만족시키기 위해서 T_{INT} 와 T_{INT}^* 는 (6)의 조건을 만족해야 한다.

$$\begin{cases} T_{INT} \leq T_{maxRD} - T_S - \max T_{REP-PHASE}(z) \\ T_{INT}^* \leq T_{maxRD} - T_S - \max T_{REP-PHASE}(z) \end{cases} \quad (6)$$

$\max T_{REP-PHASE}(z)$ 는 RSN이 전송한 REP 메시지가 z 홉 노드까지 전파되는데 소요되는 최대 시간을 의미한다. 그림 5는 그림 4의 ADV phase와 REP phase의 구조를 보다 구체적으로 나타낸 것이다. 본 논문에서의 SU들은 CSMA 기반의 backoff 방식으로 메시지 전송을 시도하며, 이를 위해 IFS (inter-frame space)와 BO(backoff counter)를 사용하였다. 본 장의 이하에서는 수식을 이용하여 그림 5를 분석하기로 한다. 불필요한 충돌이나 broadcast storm problem 등을 최소화하여 시스템을 최대한 안정적으로 운영하기 위해 대부분의 파라미터 값들은 최대값을 갖는 것으로 설정하였다.

임의의 노드는 k 개의 한 홉 이웃 노드를 가지며, 전송할 메시지를 가진 노드는 매 k 번의 전송 기회 마다 한 번의 메시지 전송 기회를 획득하는 것으로 가정한다. 또한 ADV와 REP 메시지 간의 우선순위(IFS_{ADV} , IFS_{REP}) 및 메시지 전송 시간 (T_{ADV} , T_{REP})은 각각 IFS_{MSG} 및 T_{MSG} 로 동일한 것으로 가정한다.

ADV phase는 확률에 의해 스스로를 RSN으로 결정 한 노드가 BO를 수행한 후 ADV 메시지를 전송하는 구간이다. RSN은 최대 $\max T_{ADV}$ 이내에 ADV를 전송한다. 이를 수신한 노드가 수신한 메시지를 재전송할 때 소요되는 최대 시간은 $\max T_{h-ADV}$ 가 된다. RSN으로 센싱을 담당하는 노드는 매 센싱 구간의 종료시 마다 즉시 센싱 결과 정보가 담긴 REP 메시지를 전송한다. $\max T_{h-REP}$ 는 RSN이 REP 메시지를 전송하거나, REP 메시지를 수신한 노드가 이를 재전송할 때 소요되는 최대 시간으로 $\max T_{h-ADV}$ 와 동일한 값을 갖는다. ADV phase 및 REP phase는 센싱 zone 내로 각각의 메시지를 전파해야 하므로, 상기의 과정은 메시지가 z 홉 거리만큼 도달하도록 반복된다. 임의의 노드는 (3)의 확률에 의해 스스로를 RSN으로 결정하기 때문에,

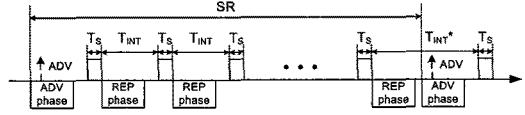


그림 4. 센싱 라운드 구조

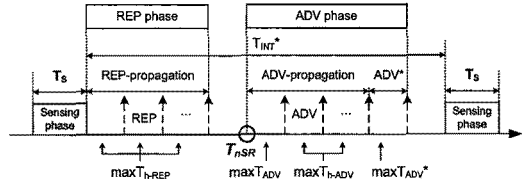


그림 5. ADV phase와 REP phase의 설계

임의의 센싱 zone 내에서 아무런 노드도 자신을 RSN으로 결정하지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 분산적 RSN 결정의 실패를 보상하기 위한 구간을 $\max T_{ADV}^*$ 라 한다. 임의의 노드는 새로운 SR이 시작되는 시점부터 $\max T_{ADV} + (z-1) \times \max T_{h-ADV}$ 에 달하는 구간 동안 ADV 메시지를 수신하지 못하게 되면, 1의 확률로 스스로를 RSN으로 결정하고 ADV 메시지 전송을 위한 backoff counter를 기존의 $\max BO$ 에 비해 매우 큰 $\max BO^*$ 의 범위에서 선택하여 메시지를 전송한다. 자신이 ADV 메시지를 전송하기 전에 다른 노드로부터 ADV 메시지를 수신한 노드는 자신이 RSN이 될 필요가 없음을 인지하고 자신의 ADV를 파기한다. (7)은 이상의 설명을 정리한 것이다.

$$\begin{cases} \max T_{ADV} = \max BO + k(IFS_{MSG} + T_{MSG}) + T_{MSG} \\ \max T_{h-ADV} = \max T_{h-REP} \\ \quad = \max BO + k(IFS_{MSG} + T_{MSG}) \\ \max T_{ADV}^*(z) = \max BO^* \\ \quad (= z \times \max T_{h-ADV} \text{ in this paper}) \\ \max T_{ADV-PHASE}(z) = \max T_{ADV} \\ \quad + (z-1) \max T_{h-ADV} + \max T_{ADV}^*(z) \\ \max T_{REP-PHASE}(z) = z \times \max T_{h-REP} \end{cases} \quad (7)$$

임의의 노드는 자신이 RSN이 되어 직접 센싱을 수행하는 경우 외에는 센싱 zone 내의 다른 노드로부터의 센싱 결과에 전적으로 의존하게 된다. 따라서 RSN의 결정을 위한 ADV phase와 센싱 결과의 공유를 위한 REP phase는 반드시 보장되어야 한다. (6)의 조건식은 이를 반영하여 (8)과 같이 정리된다.

$$\begin{cases} \max T_{REP-PHASE}(z) \\ \leq T_{INT} \leq [T_{maxRD} - T_S - \max T_{REP-PHASE}(z)] \\ \left\{ \begin{aligned} & \max T_{REP-PHASE}(z) + \max T_{ADV-PHASE}(z) \\ & \leq T_{INT}^* \leq [T_{maxRD} - T_S - \max T_{REP-PHASE}(z)] \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (8)$$

마지막으로, SR은 RSN이 된 노드가 몇 번의 센싱 구간을 반복하는가에 따라 (9)와 같이 결정된다. n_{SD} 는 한 번의 SR 내에 포함된 센싱 구간의 횟수 즉, T_S 구간의 개수를 의미한다.

$$SR = n_{SD}T_S + (n_{SD} - 1)T_{INT} + T_{INT}^* \quad (9)$$

V. 성능 평가

본 장에서는 제안된 DFSZ 방법의 성능을 평가하기 위해 수치적 해석 및 시뮬레이션 실험을 수행하고 이를 기존의 개별적 센싱 방법과 비교한다. 표 1은 성능 평가를 위한 주요 파라미터들을 나타낸다.

5.1 수치 분석 결과

본 논문에서는 각각의 노드의 센싱 오버헤드를 단위 시간 당 노드의 채널 센싱 시간 비율 (SOR: sensing overhead ratio)로 정의하였다. 기존의 개별적 센싱 방법에서는 노드가 T_{maxRD} 의 센싱 요구조건을 만족하기 위해, 매 T_{maxRD} 마다 최소 한 번의 센싱 구간을 가져야 한다. 따라서 기존의 센싱 방법에서 요구되는 최소한의 센싱 오버헤드 $SOR_{conv.}$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$SOR_{conv.} = \frac{T_S}{T_{maxRD}} \quad (10)$$

반면, DFSZ에서는 매 SR 마다 센싱 zone 내에 하나의 RSN만이 n_{SD} 번의 센싱을 수행하는 것으로 충분하다 할 수 있다. 센싱 zone 내에 포함된 노드의 개수를 N_z 라 하면, 제안된 방법을 이용한 센싱 오버헤드 $SOR_{prop.}$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$SOR_{prop.} = \frac{n_{SD} \times T_S}{SR \times N_z} \quad (11)$$

그림 6에서는 T_{INT} 와 T_{INT}^* 가 최대값을 갖는 경우, n_{SD} 와 z 의 변화에 따른 $SOR_{prop.}/SOR_{conv.}$ 를 나타내었

표 1. 성능평가 주요 파라미터

Area	1 km2	d_{max}	100m
n_{SD}	2	Slot time (st)	10 us
T_{MSG}	10 st	IFS_{MSG}	4 st
T_{INT}	Max.	$maxBO$	128 st
T_{INT}^*	Max.	n_{PU}	10
T_S (10CHs*1ms)	10 ms	a (on→off)	0.3
T_{maxRD}	1 s	β (off→on)	0.2
δ	1	k	9

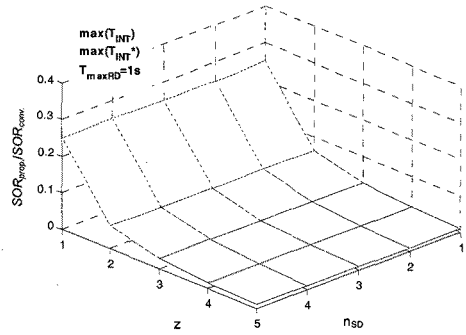


그림 6. n_{SD} 와 z 의 변화에 따른 $SOR_{prop.}/SOR_{conv.}$

다. n_{SD} 의 변화는 (9)에 의해 SR 역시 변화시키기 때문에 $SOR_{conv.}$ 에 큰 영향을 주지는 못한다. 반면, z 의 값의 증가는 임의의 노드의 센싱 zone의 크기를 증가시키게 되어, 보다 많은 노드들이 센싱을 분산적으로 수행할 수 있도록 하여 $SOR_{prop.}/SOR_{conv.}$ 를 크게 감소시킬 수 있다.

5.2 시뮬레이션 결과

이하에서는 표 1의 주요 파라미터를 이용한 시뮬레이션 실험 결과를 설명한다. 실험에서는 실험 영역 ($1km^2$) 내에 SU들을 랜덤하게 분포하였으며, 각 노드의 전송거리 $d_{max}=100m$ 로 설정하였다. 시뮬레이션은 슬롯 타임 (st: slot time) 단위로 동작하는데, 1 st=10us를 의미한다. T_{INT} 및 T_{INT}^* 값은 (8)에서의 최대값으로, SU가 하나의 채널을 센싱하는데 소요되는 시간은 1ms로 설정하였다. PU의 동작 채널의 개수 (n_{PU})는 총 10개이며, 각각의 채널에서 PU 시스템의 ON-OFF 동작 모델은 지수 분포 (exponential distribution)를 따른다. a 는 PU의 ON → OFF 변화율 (transition rate)을, β 는 OFF → ON 변화율을 의미하며, 실험에서는 각각 0.3, 0.2로 설정하였다. 공정한 RSN 결정을 위한 (4)의 파라미터는 $\delta=1$ 로 설정하였으며, 이는 센싱 zone 내에서 다른 노드의 평균 RSN 동작 횟수보다 자신이 한 번 이상 적게 RSN을 수행한 경우, (5)에 의해 T_{nSR} 을 결정하도록 한다. 프레임 설계 시 사용되는 1 홉 이웃 노드의 개수 $k=9$ 로 설정하였다. 각각의 시뮬레이션 결과들은 600번의 SR을 하나의 세트르 하여, 10세트 간의 평균을 측정하는 것이다.

그림 7과 그림 8은 분산적 센싱에서 공정성 검토의 필요성을 나타내는 실험 결과이다. 이후에서 공정성 검토과정이 없는 분산적 센싱 방법을 DSZ

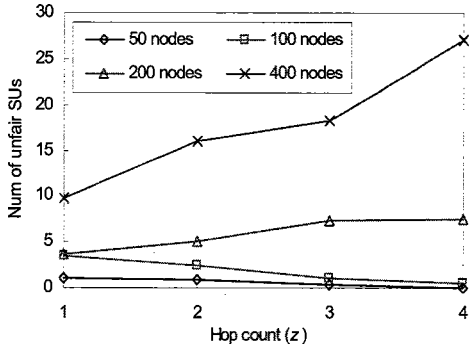


그림 7. DSZ의 공정하지 못한 노드의 개수

(Distributed Sensing Scheme based on Sensing Zone)로 표기하기로 한다. 그림 7의 공정하지 못한 노드 (unfair SU)는 시뮬레이션 실험을 수행하는 동안 한 번도 스스로를 RSN으로 결정하지 않은 노드를 의미한다. 그림 7의 DSZ에 관한 실험에서는, 노드 밀도가 큰 경우, 센싱 zone의 크기가 커짐에 따라 공정하지 못한 노드가 상대적으로 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 임의의 두 센싱 zone의 겹치는 영역에 위치한 노드가 많으며, 채널 접근 지연 (medium access delay)에 의한 메시지의 센싱 zone 내 확산이 원활하지 않기 때문이다. 반면 노드 밀도가 작은 경우에는, 센싱 zone의 크기가 커짐에 따라 공정하지 못한 노드의 수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 노드의 분포가 적절한 경우에는 센싱 zone의 크기가 증가할수록 보다 목적에 부합된 DSZ동작을 기대할 수 있음을 의미한다.

그림 8에서는 각 노드가 RSN이 되는 횟수를 분산 (variance)한 결과를 보여준다. δ 파라미터를 적용하지 않은 DSZ의 경우에는 그림 7에서의 결과와 대체로 비슷함을 알 수 있다. 반면, δ 파라미터를 적용한 DFSZ($\delta=1$)에 대한 실험 결과는 실험에서 제공한 모

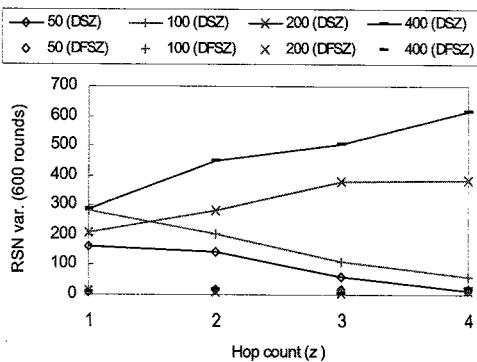


그림 8. DSZ와 DFSZ의 공정성 비교

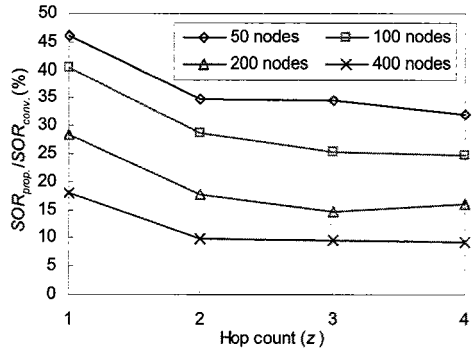


그림 9. DFSZ의 SOR_{prep}/SOR_{conv} .

든 환경에 대해서 분산이 거의 0에 가까운 결과를 보인다. 따라서 공정성을 고려한 DFSZ가 그렇지 않은 DSZ에 비해 네트워크 상황에 보다 유연하게 적응함을 알 수 있다. 이후에서는 $\delta=1$ 을 적용한 DFSZ에 대한 실험 결과만을 다룬다.

그림 9의 결과는 노드밀도가 증가할수록 단위 센싱 zone 당 노드의 수가 증가하여 보다 활발한 분산적 센싱이 수행됨을 나타낸다. 그러나 수치 분석 결과의 그림 6의 분포 양상과는 다르게 홉 수가 증가하더라도 센싱 오버헤드가 크게 감소하지 않고 안정되는 양상을 보임을 알 수 있다. 이는 이웃 노드와의 메시지 교환을 통한 협상절차가 없이 스스로의 판단노드와해 확률적으로 RSN이 되는 DFSZ의 특성상, 단위 센싱 zone 당 하나 이상의 노드가 ADV 메시지를 전송한 후 RSN으로서 센싱을 수행하는 경우가 발생하기 때문이다.

그림 10의 결과는 실험을 수행한 모든 환경에서 PU 보호를 위한 센싱 요구조건이 만족되는 것을 보이는데, 이는 DFSZ의 프레임 구조와 설계 자체가 T_{maxRD} 를 기준으로 하기 때문이다. 그림 11의 결과는

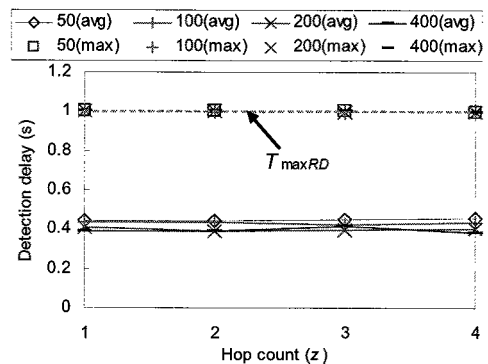


그림 10. DFSZ의 PU 탐지 지연 시간

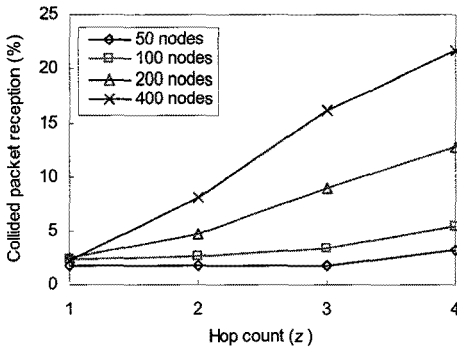


그림 11. z의 증가에 따른 충돌 패킷 수신률

z의 값이 커질수록 수신 중인 메시지가 충돌에 의해 손실되는 비율이 증가하는 것을 나타낸다. 이는 공통 채널 내에 메시지 오버헤드가 증가하기 때문인데, DFSZ에서는 ADV와 REP 메시지들이 단순히 센싱 zone 내로 브로드캐스트되기 때문에 이러한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 센싱 오버헤드의 감소를 위해 무조건 z를 크게 하는 것은 효율적인 공통 채널의 사용을 어렵게 하는 요인이 될 수도 있음을 의미한다.

VI. 결 론

본 논문에서는 무선 인지 Ad-hoc 네트워크에서 주 사용자 시스템의 보호를 위한 요구조건을 만족시키는 동시에, 부사용자의 빈번한 센싱 동작에서 비롯되는 센싱 오버헤드를 줄이기 위한, 센싱 zone 기반의 분산적 공정 센싱 방법을 제안하였다. 각각의 부사용자는 자신과 동일한 센싱 결과가 예상되는 일정 반경 이내의 영역을 자신의 센싱 zone으로 정의하고, 각자의 센싱 zone 내에서 분산적이고 공정하게 센싱을 수행한 후 센싱 결과를 공유한다. 주사용자 시스템의 보호를 위한 요구조건으로는, 주사용자가 견딜 수 있는 간섭 시간인 (tolerable interference time) 최대 탐지 지연 시간 T_{maxRD} 를 이용하였으며, 센싱 zone 기반의 분산적 공정 센싱 동작과 T_{maxRD} 요구조건을 만족하도록 하는 시스템 요구조건을 설계하였다. 또한 부사용자가 단순히 분산적인 센싱을 적용하는 경우에 발생할 수 있는 문제점으로서 부사용자 간의 공정하지 못한 센싱 현상을 지적하고, 공정성 검토 방법을 적용하여 이를 효과적으로 해결할 수 있음을 보였다. 수치 분석과 시뮬레이션 실험을 이용한 성능 평가를 통해, 제안된 센싱 zone 기반의 분산적 공정 센싱 방법이 주사용자 보호를 위한 요구조건을 만족시키는 동시에 기존의

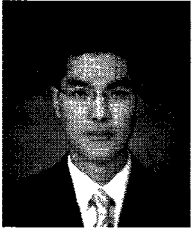
개별적 센싱 방법에 비해 센싱 오버헤드를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Mitola III, "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications," in *Proc. IEEE MoMuC 1999*, November 1999, pp. 3-10.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. Vuran, and S. Mohanty, "Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: a Survey," *Computer Networks*, Vol.50, Nn.13, 2006, pp.2127-2159.
- [3] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, and K. R. Chowdhury, "CRAHNs: Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *Ad Hoc Networks*, Vol.7, No.5, 2009, pp.810 - 836.
- [4] <http://www.ieee802.org/22/>
- [5] G. Ganesan and Y. G. Li, "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," in *Proc. IEEE DySPAN 2005*, November 2005, pp.137-143.
- [6] R. Chen, J. M. Park, and K. Bian, "Robust Distributed Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 2008*, April 2008, pp.1876-1884.
- [7] H. Su and X. Zhang, "Cross-Layer based Opportunistic MAC Protocols for QoS Provisionings Over Cognitive Radio Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.26, No.1, 2008, pp.118 -129.
- [8] S. J. Yoo, H. Nan, and T. I. Hyon, "DCR-MAC: Distributed Cognitive Radio MAC Protocol for Wireless Ad-hoc Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.9, No.5, 2009, pp.631-653.
- [9] J. A. Han and W. S. Jeon, "Efficient Cooperative Channel Sensing in Cognitive Radio Ad Hoc Networks," in *Proc. IEEE PIMRC 2008*, September 2008, pp.1-5.
- [10] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks," in *Proc. HICSS 2000*, January 2000, pp.3005-3014.

최 재 각 (Jae-Kark Choi)

정회원



2006년 2월 인하대학교 전자공학과(공학사)
2008년 8월 인하대학교 정보통신대학원(공학석사)
2008년 9월~현재 인하대학교 정보통신대학원 박사과정
<관심분야> Cognitive Radio, Seamless handover, MAC

유 상 조 (Sang-Jo Yoo)

중신회원



1988년 2월 한양대학교 전자통신학과(공학사)
1990년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사)
2000년 8월 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)
1990년 3월~2001년 2월 KT 연구 개발본부
2001년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 부교수
<관심분야> 초고속 통신망, 무선 MAC 프로토콜, 인터넷 QoS, Cross-layer 프로토콜 설계, Cognitive Radio Network