

주파수 홉핑 기반 인지무선 애드 혹 네트워크에서 동적 스펙트럼 센싱 및 채널 액세스 방안

원종민*, 유상조°, 서명환*, 조형원*

Dynamic Spectrum Sensing and Channel Access Mechanism in Frequency Hopping Based Cognitive Radio Ad-hoc Networks

Jong-Min Won*, Sang-Jo Yoo°, Myunghwan Seo*, Hyung-Weon Cho*

요약

무선통신의 발전에 따라 주파수 자원 가치는 더욱 커지고 있다. 또한 정보화 사회 발전에 따라 주파수 자원의 수요가 공급에 비하여 매우 크기 때문에 주파수 부족 현상이 심각한 실정이다. 따라서 사용하지 않는 주파수 자원을 효율적으로 이용하기 위한 기술로서 최근 Cognitive Radio (CR) 기술이 각광 받고 있다. 본 논문에서는 주파수 홉핑 기반 인지무선 애드 혹 네트워크에서 새로운 out-of-band 주파수 센싱 기법과 동적 채널 액세스 방법에 대해 제안한다. 제안된 방법에서 CR 멤버노드들은 현재 홉핑 시간의 초반부에 다음 홉핑 채널에 대한 센싱을 수행하고, 제안된 주사용자 감지 신호 방송 기법에 따라 각 노드는 현재 채널에 대한 홉핑 시간 연장여부를 결정한다. 주사용자가 발견되어 잠정적으로 사용하지 않았던 채널이 다시 사용가능한 상태가 되면 해당 채널을 원래의 홉핑 패턴에 포함시키는 채널 복구절차를 수행한다. 본 논문에서는 제안된 동적 주파수 센싱과 홉핑 채널 연장 메커니즘에 대해 다양한 무선 환경에서의 성능평가를 수행하였다. 제안된 방식은 기존 방식에 비하여 채널 효율을 높이고 신뢰할 수 있는 채널 관리를 수행할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Cognitive Radio, Dynamic Frequency Hopping, Channel Extension, Channel Recovery, Military Networks, CR ad-hoc

ABSTRACT

Frequency resource value is growing more and more with the development of the wireless communication. With the advent of the current information society comes a serious shortage of frequency resource, as the amount of supply is far from meeting its demands. Thus, cognitive radio (CR) technique is receiving more attention as a way to make use of the temporarily unoccupied frequency resource. In this paper we propose a novel out-of-band spectrum sensing and dynamic channel access scheme for frequency hopping-based cognitive radio ad-hoc networks. At the beginning of each current channel hopping time, member nodes perform spectrum sensing for the next hopping channel. Based on the proposed collision free primary detection notification, member nodes can determine whether they should execute a hopping time extension procedure of the current

* 본 연구는 한화탈레스의 지원으로 이루어진 연구임.

° 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT 연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2015-H8501-15-1019)

♦ First Author : Inha University School of Information and Communication Engineering, onejm0710@gmail.com, 학생회원

° Corresponding Author : Inha University School of Information and Communication Engineering, sjyoo@inha.edu, 종신회원

* Hanwha Tales TICN R&D Center, myunghwan.seo@hanwha.com, hyungweon.cho@hanwha.com, 정회원

논문번호 : KICS2015-08-262, Received August 24, 2015; Revised October 13, 2015; Accepted October 26, 2015

channel or not. When the primary detected hopping channel is re-idled, the hopping pattern recovery procedure is performed. In this paper we evaluated the performance of the proposed dynamic sensing and hopping channel extension mechanism for the various wireless network conditions. As a result, we show that the proposed method can increase channel utilization and provide reliable channel management operation.

I. 서 론

급속히 발전하는 다양한 형태의 무선 통신 기술들은 일상 생활에서 더욱 밀접하게 사용되고 있다. 차세대 무선 통신 시스템은 보다 많은 데이터를 보다 빠르고 싸게 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서 기존에 비해 많은 주파수 자원을 필요로 하고 있으나, 현재 거의 모든 사용가능 주파수는 기존 시스템에 이미 할당 되어 있는 실정이다. 이로 인하여 현재 기존에 사용하지 않던 새로운 대역에서의 통신기술 연구와 함께 주파수 자원의 효율적 사용에 대한 연구가 활발해 진행되고 있다.

현재 대부분 국가의 주파수 할당 정책은 최소한의 대역폭을 가지고 이용률을 극대화하면서 보다 많은 가입자를 수용하기 위한 방안으로 주파수를 활용하고 있으며, 주파수 자원의 한계를 극복하기 위한 방안으로 신기술 개발을 지속적으로 연구하여 주파수 자원의 효율성을 극대화하기 위해 노력하고 있다.

1991년 J.Mitola에 의해 제시된 인지 무선(cognitive radio: CR)은 무선통신기기가 주변의 주파수를 관측하고 이 정보를 토대로 비어있는 주파수 대역을 지능적으로 사용하는 기술로서 현재 연구되고 있는 차세대 무선 이동 통신 기술과 더불어 많은 응용 분야에 사용될 수 있는 개념의 기술이다^{1,2}. 인지 무선의 제약조건은 주사용자(primary user)에게 해로운 간섭(interference)을 주지 않는 범위 내에서 부사용자가 주파수 자원을 동시에 사용하는 것이다. 만약 주사용자가 주파수 대역을 점유하고 있을 때 부사용자에서 주파수 대역 사용을 시도하게 될 경우 주사용자는 부사용자의 신호로 인해 간섭을 받게 되어 성능 저하를 일으키게 되며, 반대로 주사용자가 주파수 대역을 점유하지 않고 있을 때 부사용자에서 주사용자의 신호를 검출하였다고 판단할 경우 부사용자가 주파수 대역의 사용 기회를 놓치게 되므로 이용효율이 저하된다³⁻⁶. 특히 기회적(opportunistic) 주파수 활용 기법을 사용하는 오버레이(overlay) CR 모델에서는 주사용자가 자신에게 할당된 주파수를 일시적으로 사용하지 않을 때 부사용자(secondary user)가 일시적으로 해당 스펙트럼을 사용하다가, 주사용자가 사용을 재개 하면 부사용자는 해당 주파수를 사용하지 않게 된다.

부사용자는 이러한 제약조건을 만족시키기 위해 잠재적으로 나타날 수 있는 주사용자에 대한 주기적인 센싱을 해야 한다⁷.

인지 무선에서 동적 주파수 hopping은 아직 많이 연구되지는 않았지만 신뢰성 있는 통신이 중요한 분야에서 최근 관심이 증대되고 있다. 특히 군통신 시스템에서 주파수 hopping 방식은 오랜 기간 사용되어 왔는데, 주파수 관리 및 빠른 채널 스위칭으로 인한 센싱의 어려움에도 불구하고, 재밍 공격(jamming attack)과 협대역 간섭(narrow-band interference)에 강한 장점을 갖고 있다⁸.

인지 무선 네트워크에서 주파수 hopping 방식은 IEEE 802.22 WRAN(Wireless Regional Area Network) 표준화 과정에서 처음으로 제시되었다. IEEE 802.22 인지 무선 기술은 TV 방송에 할당되어 지역적으로 사용되지 않는 주파수에 대해 공유하는 것을 목표로 한다. hopping 방식을 사용하는 메커니즘을 통해 여러 개의 WRAN cell을 조정하여 주파수 이용률을 높이고 신뢰할 수 있는 채널 센싱 결과를 얻을 수 있다⁹. 간섭이 없는 센싱과 충돌 없는 hopping을 위하여 이웃한 cell과 협력적 hopping을 동반한 위상 변조 방법 또한 제안되었다¹⁰. 참고문헌 [11]에서는 WLAN 시스템과의 공존을 위해 주기적인 센싱과 일시적인 WLAN 활동을 예측을 통해 패킷 충돌을 피하는 인지 무선 주파수 hopping 방법이 제안되었다. 이는 일시적으로 사용되지 않는 채널로 hopping을 함으로써 패킷 충돌을 줄일 수 있다. 참고문헌 [12]에서는 분배된 채널 협상 단계와 각각의 부사용자를 위한 hopping 기반 채널 동작으로 구성된 2단계의 채널 동작구조가 제시되었고, 부사용자의 수가 실제 채널의 수보다 많은 상황을 고려하기 위해 가상 채널 개념이 도입되었다.

본 논문에서는 동적 주파수 hopping 방식에서 기존의 광대역 센싱에 국부적인 out-of band 센싱^{11,3}을 결합하여 채널 연장과 복원을 이용한 보다 더 개선된 채널 관리방안을 제안한다. 본 논문의 주요 기여사항은 i) 각 hopping 시간의 초반부에 다음 hopping 채널에 대한 out-of-band 센싱을 통해 주사용자 감지 지연시간과 CR 사용자의 서비스 단절시간을 줄이고 ii) 제안된 충돌 없는 센싱 정보 공유 기법을 이용한 채널연장을 통해 채널 사용 효율을 향상시키는 것이다.

주사용자에 대한 간섭을 피하기 위해 애드 혹 클러스

터는 클러스터 멤버노드들 간에 공통 사용 채널을 선택하고 주파수 hopping 패턴을 결정한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 각각의 채널 hopping 시간에 데이터 전송을 하거나, 바로 다음 hopping 채널에 대한 짧은 센싱을 통해 효과적으로 주사용자를 감지할 수 있다. 그 후 다음 hopping 채널의 주사용자 감지에 대한 알림이 이어진다. 이 정보를 모든 멤버노드에게 알리기 위해 본 연구를 통해 특별히 설계된 알림 신호를 사용하여 멤버노드들 뿐만 아니라 이웃하는 클러스터와의 알림 충돌을 줄일 수 있다. 알림 결과에 따라 클러스터는 자동적으로 현재의 hopping 채널을 연장할지 혹은 다음 hopping 패턴으로 hopping을 진행할지를 결정하게 된다. 이러한 빠르고 동적인 채널 연장을 통해 부사용자 시스템은 주파수 대역을 보다 더 효율적으로 사용하고 주사용자 시스템에 대한 간섭을 줄일 수 있다. 마지막으로 본 논문에서는 주사용자가 등장했다가 사라져 사용가능한 hopping 채널에 대해 전체 hopping 패턴 초기화 과정 없이 다시 사용될 수 있는 hopping 패턴 복원과정을 제안하였으며 이를 통해 전송지연과 오버헤드를 줄일 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 시스템 모델과 센싱 구조에 대해 설명한다. 제안된 NFAI(next frequency availability indication) 절차가 3장에 기술 되었으며, 4장에서는 동적 hopping 채널 연장과 복원 방법에 대해 기술한다. 5장에서는 다양한 측면에서 제안된 방법의 성능 분석 및 평가를 수행하였고, 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론을 기술하였다.

II. 시스템 모델과 센싱 구조

2.1 시스템 모델 및 설계 요구사항

본 논문에서의 인지무선 애드 hoc 네트워크에서는 하나의 클러스터 헤드와 여러 개의 멤버노드가 클러

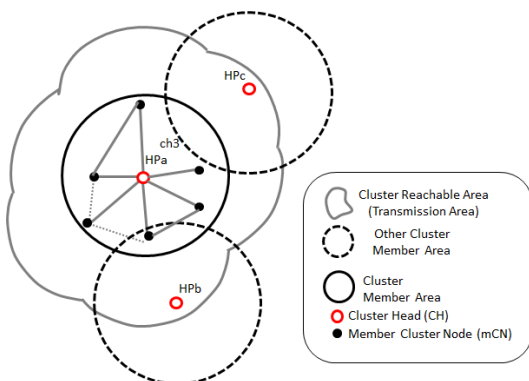


그림 1. 주파수 hopping 기반 인지무선 애드 hoc 네트워크 구조
Fig. 1. FH-based CR ad-hoc network topology.

스터 헤드 범위 안에 존재한다고 가정한다^[14,15].

그림 1과 같이 여러 개의 클러스터들은 인접한 지역에 겹쳐서 배치될 수 있다. 클러스터 헤드는 애드 hoc 인지 무선 클러스터 형태를 구성하고 각 멤버노드의 사용가능한 채널 상황보고를 토대로 클러스터 내 사용가능한 전체 채널 집합을 구성하고 데이터 전송을 위한 hopping 채널과 hopping 패턴을 결정한다. 각각의 클러스터의 hopping 패턴은 따로따로 생성되기 때문에 hopping 패턴 생성과정에서 인접한 클러스터와의 조율은 없다고 가정한다. hopping 패턴 생성방법에 대한 자세한 내용은 본 논문에서 다루지 않는다.

2.2 순차적인 out-of-band 센싱 구조

인지 무선 네트워크에서 기존의 센싱 방식은 각각의 멤버노드들이 주사용자를 감지하기 위해 주기적으로 광대역 센싱 (wideband sensing)을 수행하였다. 이러한 광대역 센싱은 전체 대역에서 사용가능한 채널들을 얻을 수 있지만, 비교적 긴 센싱 시간을 필요로 한다. 이는 부사용자에게 있어서 센싱 시간동안 각각의 노드들이 데이터를 전송할 수 없기 때문에 긴 서비스 단절을 초래한다.

본 논문에서 제안하는 순차적인 out-of-band 센싱 구조에서는 현재의 hopping 채널로 바뀌고 난 후에 각각의 노드들이 현재의 채널을 사용하여 데이터 전송을 하기에 앞서, 다음 hopping 채널에 대한 국부적 센싱 (local sensing)을 수행한다. out-of-band 센싱은 주파수 센싱이 현재의 데이터전송 채널이 아닌 다음 hopping 채널에 대해 행해지는 것을 의미한다.

기존 주기적 광대역 센싱과 제안된 방법 모두 CR 시스템은 초기 설정과정에서는 전대역 센싱을 수행하여 사용가능한 채널조합을 구하고 이를 이용하여 hopping 시퀀스를 발생시키는 것은 동일하나, 이후 기존 방법은 주기적으로 전체 hopping 채널 조합에 대해 광대역 센싱을 수행하고 제안된 방법은 매 hopping 시간의 초반부에 다음 채널 만에 대해 센싱을 수행한다는 차이점이 있다.

그림 2에서 알 수 있듯이 제안된 센싱 방법은 주어진 시간에 다음 hopping 채널에 대한 센싱만을 수행하기 때문에 기존의 방식에 비해 센싱 시간이 더욱 짧은 것을 확인할 수 있다.

그림 2에서 T_I 는 센싱 간격 (sensing interval) 이고 T_S 는 센싱 시간 (sensing time), T_H 는 hopping 시간 (hopping time), T_C 는 hopping 사이클 (hopping cycle) 을 의미한다. N_h 가 hopping 채널의 개수라고 할 때, hopping

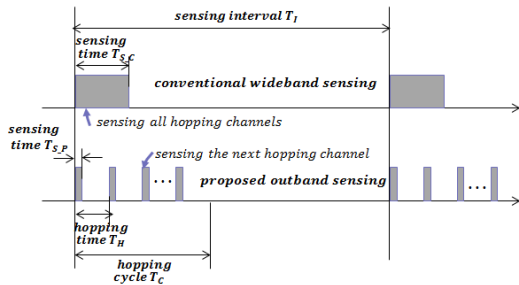


그림 2. 제안된 out-of-band 센싱
Fig. 2. Proposed out-of-band sensing.

사이클은 $(N_h \times T_H)$ 로 표현 될 수 있다. 단일 채널에 대한 센싱 시간이 T_S^C 일 때, 센싱 시간 T_S 는 실제 서비스 단절시간인 T_{SD} 와 같고 기존의 방식과 제안된 방식에서 이를 각각 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$T_{SD} = T_S = \begin{cases} \sum_{k=1}^{N_h} T_S^C, & \text{for the conventional} \\ T_S^C, & \text{for the proposed} \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 기존방법은 홉핑채널 모두에 대해 주기적인 광대역 센싱을 수행하므로 CR 시스템의 서비스 단절 시간은 단일채널 센싱시간에 홉핑 채널 수를 곱한 것과 같다. 반면 제안된 기법은 매 홉핑시간에 다음 채널에 대한 센싱만을 실시하므로 서비스 단절시간은 단일 채널 센싱시간과 같다.

기존 주기적 광대역센싱의 센싱간격이 $T_I = kT_C$ 일 때, 평균 주사용자 신호 감지 지연 (average primary signal detection delay) T_{PD} 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$T_{PD} = \begin{cases} kT_C/2 = k(N_h \times T_H)/2 & \text{for the conventional} \\ T_H/2 & \text{for the proposed} \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)에서 주사용자 등장 시점이 센싱 간격 시간동안 uniform 분포일 때, 주사용자 평균 감지 지연시간은 센싱 간격의 1/2이 된다. 기존 광대역 센싱방법에서는 주기적 센싱 간격 설정 파라미터 k , 홉핑채널 수 및 홉핑시간에 영향을 받으며 제안된 방법에 비해 긴 주사용자 평균 감지 지연을 가지게 된다.

그림 3과 같이 제안된 방식에서 광대역 센싱은 오직 클러스터 초기화 과정에서 사용가능한 홉핑 채널들을 얻기 위해 행해지거나 주기적인(혹은 비주기적

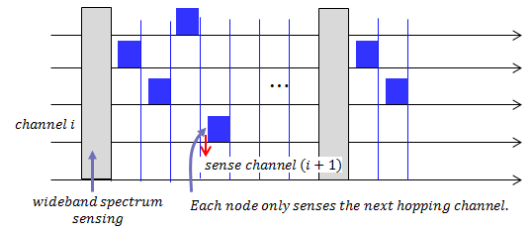


그림 3. 순차적인 out-of-band 센싱 절차
Fig. 3. Sequential out-of-band sensing procedure.

인) 채널 재구성을 위해서만 행해진다.

III. NFAI (Next Frequency Availability Indication) 동작

일반적인 애드 혹 인지무선 네트워크에서 국부적 센싱 후에 멤버노드들은 어떤 채널이 사용가능 채널 리스트에 포함되어야 하는지를 결정하거나 센싱한 채널에 대한 센싱 결과를 보고하기 위해, 각 CR 노드들의 국부적 센싱 결과를 서로 교환해야 한다. 기존의 방법에서 이러한 센싱 결과 교환은 보통 센싱 보고 메시지를 전송함으로써 행해진다. 이는 노드의 수가 많을 경우 메시지 전송 충돌이 발생할 수 있기 때문에 신뢰할 수 있는 센싱 결과 공유를 보장할 수 없다. 또한 메시지 형태의 보고와 메시지 전송 충돌을 줄이기 위한 백오프 (backoff) 메커니즘은 상대적으로 긴 센싱 보고 기간이 필요하다. 이는 짧은 시간에 행해지는 주파수 홉핑 시간에서 많은 시간을 센싱과 센싱보고에 사용함으로써 데이터 전송을 위한 자원을 낭비하게 되고 네트워크의 처리율을 떨어뜨리는 결과를 초래한다.

본 논문에서는 충돌이 없는 NFAI (Next Frequency Availability Indication) 방법을 제안한다. 기존의 메시지 전송방식 대신에 특별히 설계된 신호가 NFAI 단계 동안 전송된다. 그림 4와 같이 하나의 채널 홉핑 시간은 3가지 단계(out-of-band 센싱, NFAI 그리고 데이터 전송부분)로 구성된다.

NFAI 단계는 다음 홉핑 채널에 주사용자의 등장 여부를 나타내기 위해 필요하다. 다음 홉핑 채널에서 주

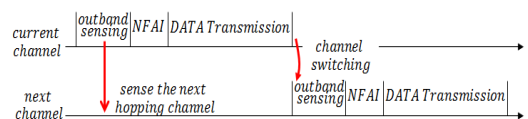


그림 4. 3개의 단계로 구성된 홉핑시간 동작
Fig. 4. Three phase hopping time operation.

사용자의 신호를 감지한 노드는 현재 홉핑 채널의 NFAI 시간에 특정 타입의 신호를 전송한다. 만약 어떤 노드가 out-of-band 센싱 후에 주사용자를 감지하지 못하여 특정 타입의 신호를 보내지 않았다면, 이 노드는 다른 노드들이 보내는 특정 NFAI 신호를 수신한다. 이를 통해 이 노드가 다른 노드로부터 NFAI 신호를 수신한다면, 다음 홉핑 채널이 더 이상 사용할 수 없는 것을 알게 된다.

- 본 논문에서는 2가지 종류의 NFAI를 제안한다.
- i) 단순 펄스 타입의 신호 : 인접하는 다른 인지 무선 클러스터가 없을 때 사용한다.
 - ii) 스프레딩 코드를 이용한 신호 : 같은 지역에 다수의 인지 무선 클러스터가 존재할 때 사용한다. 본 논문에서는 인접하는 클러스터간 홉핑 시간 동기화를 가정한다.

인접하는 인지 무선 클러스터가 없어 단순 펄스 타입의 신호를 사용할 때에는 한 클러스터 내에서 다수의 멤버노드들이 동시에 펄스를 보내기 때문에 여러 노드가 동시에 주사용자 검출 신호를 전송하더라도 신호의 파워만 증가시킬 뿐 멤버노드들 간에 충돌은 발생하지 않는다. 하지만, 그림 5와 같이 다수의 클러스터가 동일지역에 중첩되어 존재할 경우에 단순 펄스 타입의 신호를 사용하게 되면 다른 클러스터의 멤버노드에 의한 펄스 신호가 특정 클러스터에 대해 다음 홉핑 채널에 주사용자가 등장한 것처럼 인식될 수 있다. 그림 5의 예에서와 같이 노드 1이 클러스터 1에

속해있고, 노드 2와 3은 클러스터 2에 속해있다고 가정하자. 두 클러스터 범위에서 중복된 노드 2와 노드 3으로부터 발생한 펄스신호는 클러스터 2의 다음 홉핑 채널인 ch_j 에 주사용자 신호가 등장한 것을 감지한다. 하지만 노드 1의 NFAI 펄스 신호는 클러스터 1의 다음 홉핑 채널인 ch_k 에 주사용자가 등장한 것을 나타낸다. 따라서 단순 펄스 신호를 사용할 경우, 클러스터들은 서로 다른 홉핑 패턴을 갖기 때문에 충돌 없는 동작을 보장할 수 없다.

인접한 다수의 클러스터가 존재할 경우에는, 각 클러스터의 클러스터 헤드가 다음 주파수 사용가능여부 알람을 위해 미리 정의된 스프레딩 코드(예: CDMA 코드) 중에서 임의로 하나의 확산 코드를 선택한다. 따라서 인접하는 클러스터는 높은 확률로 서로 다른 확산 코드를 갖게 된다. 어떤 멤버노드가 NFAI신호를 보낼 때 그 멤버노드가 속한 클러스터의 NFAI 확산 코드에 의해 코딩된 신호가 보내지게 되어 한 클러스터 내에서 멤버노드들 사이뿐만 아니라 서로 다른 클러스터 간의 충돌이 없는 동작을 보장한다.

IV. 동적 홉핑 채널 연장과 복원 절차

4.1 동적 홉핑 채널 연장

주파수 홉핑 방식의 인지 무선 애드 혹 네트워크에서 현재 홉핑채널에 주사용자 신호가 검출되었을 경우 해당 채널은 주사용자에게 간섭을 줄 수 없기 때문에 사용해서는 안 된다. 그림 6과 같이 기존의 주파수 홉핑 인지무선 네트워크에서는 주사용자가 홉핑 채널 중 하나에서 등장하면 발견된 채널의 홉핑 시간에는 단순히 그 채널을 사용하지 않거나(skip) 전체 홉핑 패턴을 재구성했다. 하지만 이는 채널 사용 효율을 낮추고 홉핑 패턴 재설정에 따른 오버헤드를 증가시키는 단점이 있다. 이에 따라 본 논문에서는 동적 홉핑

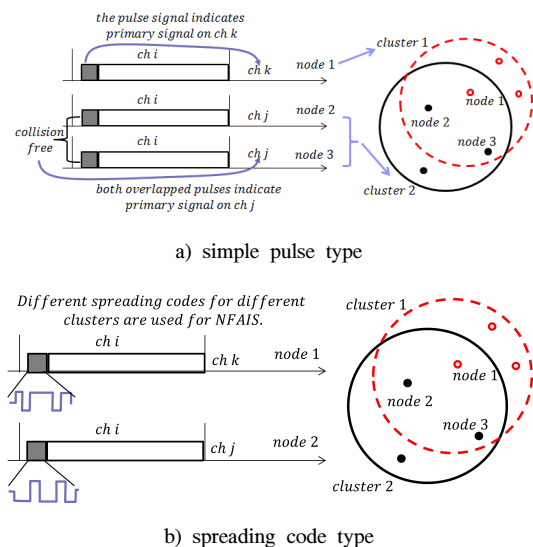


그림 5. 제안된 NFAI 신호 방법
Fig. 5. Proposed NFAI signal method

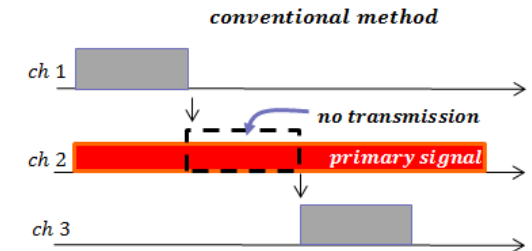


그림 6. 기존의 주 사용자 신호검출에 따른 홉핑 채널 스킵 방법
Fig. 6. Conventional hopping channel skip method due to the primary signal detection.

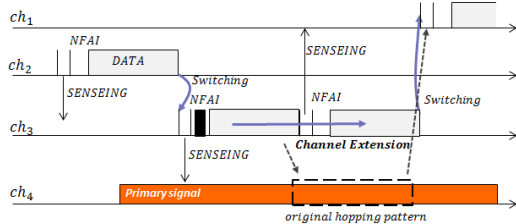
채널 연장과 복원절차를 제안한다.

제안된 방법에서, 멤버노드가 NFAI 시간에서 특정한 타입의 신호를 감지하면 다음 홉핑 채널에 주사용자가 나타난 것을 의미한다. 따라서 모든 멤버노드들은 주사용자가 등장한 다음 홉핑 채널을 사용할 수 없다. 이 경우에 그림 7-(a)와 같이 현재 홉핑 채널이 다음 홉핑 시간까지 연장된다. 스킵 된 홉핑 채널은 주사용자가 더 이상 등장하지 않아 회복되기 전까지는 사용되지 않는다. 그림 7-(b)와 같이 홉핑 채널은 연속적으로 여러 번 연장될 수 있다.

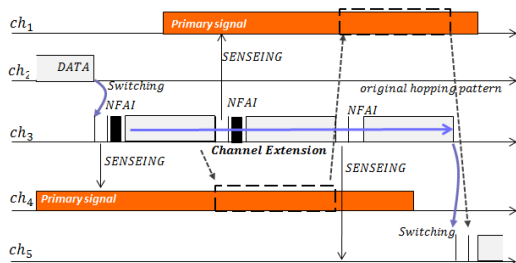
그림 8은 제안된 동적 홉핑 채널 변경과정의 의사코드이다. 채널 연장은 주 사용자와의 충돌확률을 높일 수 있기 때문에 설계 변수인 E_{max} 회까지만 허용된다. 또한 연장기간 중 주사용자 신호와의 간섭으로 데이터 전송유류가 발생하면 연장을 중단하게 된다. 제안된 방법에서 채널 연장 횟수가 E_{max} 에 도달한 경우, 연장채널의 수가 N_{max} 보다 커진 경우 혹은 홉핑 채널 재설정에 따른 비용이 홉핑 패턴 연장에 따른 비용보다 작을 경우에는 클러스터를 위해 새로운 홉핑 패턴이 클러스터 헤드에 의해 생성된다.

4.2 동적 채널 연장과 전역적 홉핑 채널 재구성 비용분석

본 논문에서 제안한 채널 연장 방식에서 주의 할 점은 홉핑 채널 연장을 더 많이 할수록 재밍 공격에



(a) Hopping time extension example.



(b) Multiple hopping time extensions

그림 7. 동적 홉핑 채널 연장 방법
Fig. 7. Dynamic hopping channel extension method.

```

Dynamic Hopping Channel Extension
//  $E_{count}(i)$ : ch i extension count
//  $N_{count}$ : number of extension channels
// For ch i hopping time
if (NFAIS signal exists)
    if ( $E_{count}(i) \leq E_{max}$  and  $N_{count} \leq N_{max}$  and  $C_E < C_R$ )
        //small scale hopping pattern change (LOCAL REPAIR)
        extend the current channel time;
         $E_{count}(i) += 1$ ;
        if ( $E_{count}(i) == 1$ )
             $N_{count} += 1$ ;
        end if
    else
        //large scale hopping pattern change (GLOBAL REPAIR)
        entire hopping pattern change;
    end if
end if
    
```

그림 8. 제안된 동적 홉핑채널 연장 의사코드
Fig. 8. Pseudo code of dynamic hopping channel extension.

대한 취약점이 증가하고 인접한 클러스터와의 홉핑 채널 충돌 확률이 높아지는 것이다. 또한 전역적 홉핑 채널 재구성은 클러스터 헤드가 현재 가용채널을 기준으로 다시 홉핑패턴을 재구성하고 이를 클러스터 내의 모든 노드들에게 전달한 후 주파수 홉핑 동기를 재설정 하여야 한다. 본 논문에서는 채널 연장 비용 C_E 과 홉핑 채널 재설정 비용 C_R 을 정의하고 이를 통해 동적으로 현재 상황을 고려하여 채널 연장이나 홉핑채널 재설정을 수행할 수 있도록 하였다.

그림 7과 같이 채널 연장이 필요한 경우, 채널 연장 비용(C_E)은 홉핑 패턴 재설정 비용(C_R)과 비교된다. 채널 연장에 따른 비용 함수를 나타내면 식(3)과 같다.

$$C_E = \sum_{i \in S_{ext}}^{N_{count}} E_{count}(i) \cdot C_{jam} + N_{collision} \cdot C_{collision} \quad (3)$$

$E_{count}(i)$ 는 i 번째 채널의 연장횟수이고, S_{ext} 는 연장된 채널의 집합이다. $N_{collision}$ 은 채널 연장으로 인해 발생하는 인접 클러스터와의 충돌 횟수이고 C_{jam} 과 $C_{collision}$ 은 각각 재밍과 채널 충돌에 대한비용을 나타낸다. $N_{collision}$ 은 주변 클러스터의 수, 주변 클러스터가 사용하는 채널 수, 주사용자 등장 채널 수에 의해 영향을 받으며 제 V장 모의실험의 그림 13에 채널 충돌 비율에 대한 실험결과가 제시되었다.

반면 전체 채널 재설정에 따른 비용함수를 나타내면 식(4)와 같다.

$$C_R = D_{reconst} \cdot C_{delay} + N_{node} \cdot C_{rconst} \quad (4)$$

$D_{reconst}$ 는 hopping 패턴 재설정에 따른 지연이고, C_{delay} 는 지연에 따른 비용이다. N_{node} 는 클러스터 노드의 개수이고, C_{rconst} 는 hopping 패턴 재설정에 따른 비용이다. 새로운 hopping 패턴을 생성할 때에는 모든 노드가 정보를 공유하고 새로운 패턴 동기화를 위한 패턴 생성 대기시간이 발생한다. 따라서 각각의 클러스터는 $C_E > C_R$ 인 경우에만 전역적 hopping 패턴 재설정을 수행하게 된다. 식(3), (4)의 비용관련 파라미터는 실제 운용에 있어 각 비용파라미터의 중요도에 따라 부 사용자 시스템 운용자에 의해 결정된다. 본 연구의 모의실험에서는 국방관련 연구기관과의 중요도 검토 결과에 의해 파라미터의 상수값을 도출하였고, 다른 상수값에서도 모의실험에 보여진 추세와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

4.3 hopping 채널 복원

제안된 방법에서는 주사용자 신호가 검출되어 잠정적으로 사용하지 않고 채널 연장을 수행하였던 채널

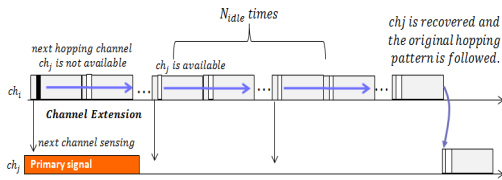


그림 9. hopping 채널 복원과정
Fig. 9. Hopping channel recovery.

```

Dynamic Hopping Channel Recovery
// I_count(i): ch i NFAIS idle count, initially 0
// N_count: number of extension channels
// For ch i hopping time
if (NFAIS signal does not exist)
  if (ch i is an extended channel)
    I_count(i) += 1;
  if (I_count(i) ≤ N_idle)
    no change on the current extension;
  else
    E_count(i) = 0; N_count -= 1; I_count(i) = 0
    no extension and follow the original
    next hopping channel;
  end if
end if
  
```

그림 10. 동적 hopping 채널 복원 의사코드
Fig. 10. Pseudo code of dynamic hopping channel recovery.

에 대해 더 이상 주사용자 신호가 검출되지 않음을 국부적 out-of-band 센싱을 통해 인지하게 되면 기존 hopping 패턴으로 복원할 수 있다. 이 경우 무선통신망에서는 잡음, 페이딩 및 선투도잉 등의 영향으로 센싱이 정확히 수행되지 못할 수 있기 때문에 주사용자의 보호를 위해 그림 9의 예에서와 같이 해당채널을 즉각적으로 복원하지 않고 N_{idle} 만큼 주사용자가 발견되지 않을 때에 기존 hopping 패턴이 복원된다. 그림 10은 제안된 hopping 채널 복원과정의 의사코드를 보여준다.

V. 모의실험 및 성능평가

본 장에서는 제안된 동적 주파수 hopping 방식을 채널 효율, 채널 충돌 비율, hopping 채널 관리 비용의 측면에서 모의실험을 수행하였고 그 성능 평가 결과를 기술한다.

본 연구에서는 매트랩 GUI를 이용하여 시뮬레이터를 개발 하였다. 그림 11과 같이 시뮬레이터는 다양한 네트워크 토폴로지와 채널 환경을 반영할 수 있게 설계되었고 제안된 프로토콜의 동작과정을 평가할 수 있도록 구현되었다.

첫 번째 성능평가로 채널 사용 효율을 분석하였다. 채널 사용 효율 측면에서 기존의 방식은 현재의 hopping 채널에서 주사용자의 신호가 발견되었을 때 클러스터 멤버노드는 단순히 현재 채널을 사용하지 않고 스킵한 다음 hopping 채널시간을 기다린다. 따라서 전체 채널 효율은 주사용자가 발견된 채널의 수에 반비례한다. 제안된 방법에서는 hopping 채널 연장 방식으로 채널 효율을 높일 수 있었다. 본 연구에서 정의한 채널 사용 효율은 식 (5)와 같다.

$$U_c = \frac{N_h - N_{uh}}{N_h} \quad (5)$$

N_h 는 전체 hopping 채널수를 뜻하고, N_{uh} 는 사용하지 못하는 hopping 채널수를 뜻한다. 기존의 방식은 N_{uh} 에 초기 hopping 패턴에서 주변 클러스터와 중복되어 사용하지 못하는 채널 수 뿐만 아니라, 주사용자가 hopping 채널에 등장한 경우까지 포함하지만 제안된 방식에서는 채널 연장이 이루어지기 때문에 초기 hopping 패턴에서 주변 클러스터와 중복되어 사용하지 못하는 채널 수와 채널연장으로 인한 인접 클러스터와의 중복만 고려한다. N_{uh} 를 정의하면 식 (6)과 같다.

$$N_{uh} = \begin{cases} |S_{PDC} \cup S_{CC_i}| & \text{for the conventional} \\ |S_{CC_i} \cup S_{CC_E}| & \text{for the proposed} \end{cases} \quad (6)$$

|| 는 해당 원소의 개수를 뜻하고, S_{PDC} 는 주사용자가 감지된 채널의 집합, S_{CC_i} 와 S_{CC_E} 는 각각 초기 hopping 패턴 중복 채널 집합과 채널 연장에 의해 인접하는 클러스터와 충돌하는 채널의 집합을 의미한다.

그림 12는 hopping 채널의 수가 30이고 주사용자가 감지된 채널의 개수(NPDC: Number of Primary Detected Channels)가 1부터 5까지 변화에 따른 채널 효율을 보여준다. 기존의 방법과 제안된 방법 모두 클러스터가 증가함에 따라 채널 겹침 현상이 증가하기

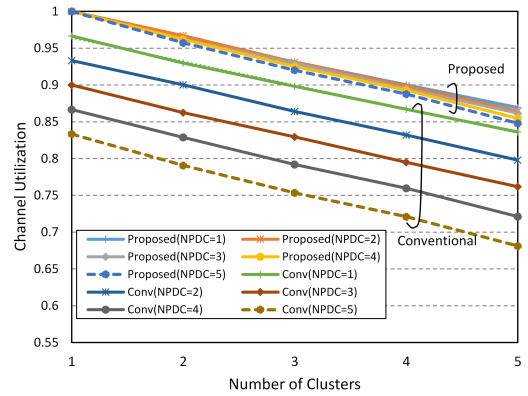


그림 12. 채널 효율 비교
Fig. 12. Channel utilization comparison.

때문에 채널 효율은 떨어진다. 하지만, 채널 연장 방식을 사용한 제안된 방식은 기존의 방식보다 실험 환경의 파라미터 범위내 비교에서 보다 높은 효율을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 13은 제안된 방식에서 인접 클러스터와의 채널 충돌 비율을 나타낸다. 주사용자가 감지된 채널수가 증가할수록 hopping 채널 연장 또한 증가하여 이웃하는 클러스터와의 hopping 패턴 충돌을 증가시킨다. 그림에서와 같이 hopping 채널의 개수 (NFC)가 20개이고 클러스터의 개수는 5개이며 주사용자의 등장횟수가 0일 때 채널 충돌 비율은 약 0.18임을 알 수 있다. 이는 채널 연장으로 인한 충돌이 아닌 초기 hopping 패턴의 설정에 있어 인접 클러스터와 중복되는 채널 설정으로 인한 충돌 비율을 보여준다. 주사용자의 등장횟수가 5일 때는 채널 연장에 따른 영향으로 인해 채널 충돌 비율이 0.24까지 증가한다. 또한 주사용자 등장횟수가 정

(a) Initial parameter setup module

(b) CR ad-hoc dynamic channel management module

그림 11. 주파수 hopping기반 CR 애드 후크 네트워크 시뮬레이터
Fig. 11. Frequency hopping based CR ad-hoc network simulator.

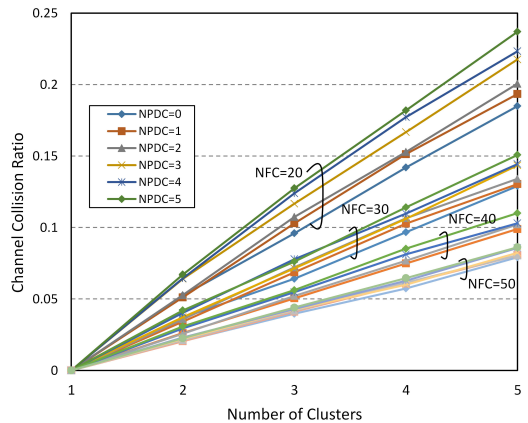


그림 13. 채널 충돌 비율
Fig. 13. Channel collision ratio.

해졌을 때 hopping 채널의 수가 증가할수록 인접 클러스터와의 채널 충돌 비율은 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 14는 주사용자의 등장 횟수가 3으로 고정된 상태에서 클러스터의 수가 1부터 5까지 증가하고, 멤버노드의 수가 20에서 50까지 변할 때 식(3)의 채널 연장 비용과 식(4)의 hopping 패턴 재설정 비용을 이용하여 생성한 그래프이다. 채널 연장에 따른 비용 C_E 가 hopping 패턴 재설정에 따른 비용 C_R 보다 커질 때 클러스터의 hopping 패턴은 재설정 된다. 그림 14에서 $C_{jam}=1$, $C_{collision}=20$, $D_{reconst}=3$, $C_{delay}=1$, $C_{reconst}=0.2$ 로 설정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 클러스터의 개수가 증가할수록 인접한 클러스터와의 채널 충돌이 증가하기 때문에 C_E 또한 증가하게 된다. 특히, 이 그래프에서 멤버노드의 수가 20이고 클러스터의 개수가 3개 이하일 때에는 채널 연장에 따른 비용이 hopping 패턴 재설정에 따른 비용보다 작아 더욱 유리한 것을 확인할 수 있다.

또한 그림 15에서 알 수 있듯이 채널 재구성의 경우 클러스터에 있는 멤버 노드 수에 따라 재구성 비용

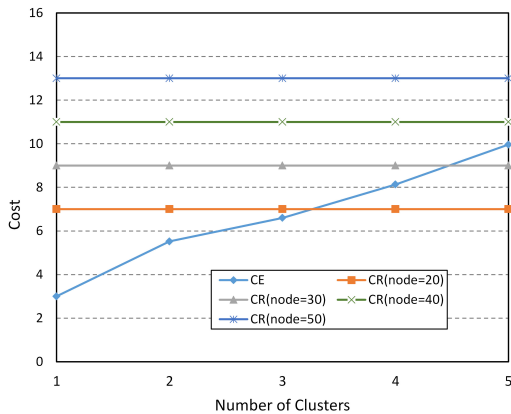


그림 14. 채널 연장과 채널 재구성 비용 비교
Fig. 14. Channel extension and reconstruction cost comparison

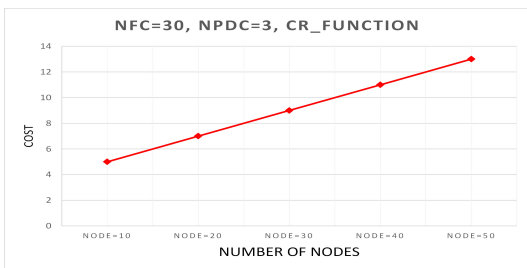


그림 15. 채널 재구성 비용 증가
Fig. 15. Channel reconstruction cost.

이 선형적으로 증가한다. 그림 15는 식 (4)에서 유도된 실험결과로 패턴 재구성비용에 있어 다양한 추가적인 변수의 고려가 추후연구로 진행되어야 할 것이다.

그림 16은 식(1)을 이용하여 기존의 방식과 제안된 방식의 서비스 단절시간을 비교한 그래프이다. 단일 채널에 대한 센싱 시간 $T_S^C=1$ 일 때, 기존의 방식은 hopping 채널의 수가 증가함에 따라 서비스 단절시간 또한 선형적으로 증가하는 반면, 제안된 방식은 단일 채널 센싱 시간 T_S^C 로 일정한 것을 알 수 있다.

마지막으로 그림 17은 식(2)를 이용하여 기존의 방식과 제안된 방식의 평균 주사용자 신호 감지 지연을 비교한 그래프이다. 기존의 방식에서 hopping 사이클 T_C

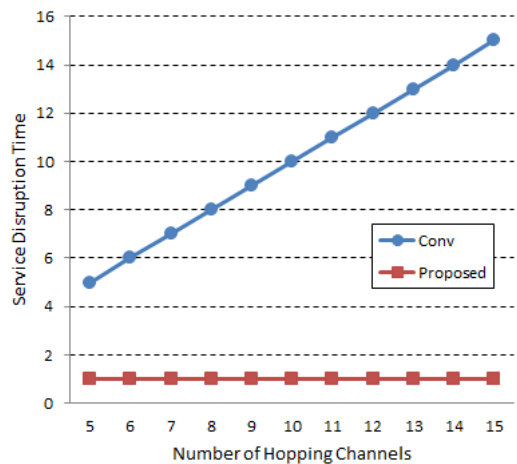


그림 16. 서비스 단절시간 비교
Fig. 16. Service disruption time comparison.

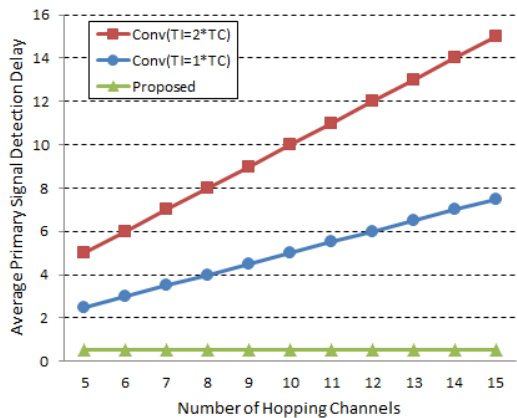


그림 17. 평균 주사용자 신호 감지 지연 비교
Fig. 17. Average primary signal detection delay comparison.

는 홉핑 채널의 개수 N_H 와 홉핑 시간 T_H 의 곱으로 표현되며 센싱 간격 T_s 는 홉핑 사이클 T_C 와 센싱 간격 설정 파라미터 k 의 곱으로 표현된다. 그림 17에서 $T_H = 1$, k 를 1과 2로 각각 설정하였을 때, 기존의 방식은 홉핑 채널의 수가 증가함에 따라 평균 주사용자 신호 감지 지연도 선형적으로 증가한다. 반면, 제안된 방식은 홉핑채널의 증가에도 불구하고 일정한 주사용자 신호 감지 지연을 유지한다. 그림 16과 그림 17을 통해 제안된 방식이 기존의 방식보다 서비스 단절 측면과 평균 주사용자 신호 감지 지연 측면에서 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

현재 미국 및 유럽에서는 군사용 통신망이 기존의 음성 위주의 트래픽에서 영상 및 멀티미디어 데이터를 지원하는 구조로 바뀌에 따라 주파수 부족문제를 해결하기 위한 인지무선 기반의 새로운 통신망에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 애드혹 인지 무선 네트워크에서 새로운 동적 주파수 홉핑 채널 관리방안을 제안하였다. 빠르고 신뢰할 수 있는 주사용자의 보호를 위해 out-of-band 단일 채널 센싱 구조를 제안하였다. 기존의 광대역 센싱 방식과 달리 제안된 국부적 out-of-band 센싱 방식은 서비스 단절 시간을 줄이고 주사용자 시스템을 성공적으로 보호할 수 있었다. 또, 클러스터 멤버들과 센싱 결과를 공유하기 위해 충돌 없는 NFAI 구조를 제안하였고 홉핑 채널 연장을 통해 전체 홉핑 패턴 재설정 빈도를 줄일 수 있었다. 본 논문에서 제안한 방법이 기존의 방법과 비교해서 더 높은 채널 효율을 보였다.

제안한 동적 주파수 홉핑 채널 관리 방안은 향후 군용 인지무선 기반 무선 시스템 운용에 있어서 안정성, 신뢰성, 효율성을 재고할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J. Mitola, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in *Proc. IEEE Workshop on Mob. Multimedia Commun.*, pp. 3-10, San Diego, CA, Nov. 1999.
- [2] J. Mitola III, "Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio," Ph.D. Dissertation, Royal Inst. Technol., Sweden, May 2000.
- [3] Y. Liang, Y. Zeng, E. C. Y. Peh, and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, Apr. 2008.
- [4] E. Biglieri, A. J. Goldsmith, L. J. Greenstein, N. B. Mandayam, and H. V. Poor, *Principles of Cognitive Radio*, Cambridge University Press, 2013.
- [5] A. M. Wyglinski, M. Nekovee, and Y. T. Hou, *Cognitive Radio Communications and Networks : Principles and Practice*, Academic Press, 2010.
- [6] N. Kim and Y. Byun "A threshold optimization method for decentralized cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 02, pp. 253-263, Feb. 2015.
- [7] J. Choi and S. Yoo "An efficient routing protocol considering path reliability in cognitive radio ad-hoc networks," *J. KICS*, vol. 39B, no. 11, pp. 730-742, Nov. 2014.
- [8] E. S. Hennessey, K. M. Hopkinson, and M. D. Silvius, "Opportunistic access in frequency hopping cognitive radio networks," *Wireless Telecommun. Symp.*, pp. 1-6, Washington, DC, Apr. 2014.
- [9] H. Wendong, D. Willkomm, M. Abusubaih, J. Gross, G. Vlantis, M. Gerla, and A. Wolisz, "Cognitive radios for dynamic spectrum access -dynamic frequency hopping communities for efficient IEEE 802.22 operation," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 5, pp. 80-87, 2007.
- [10] D. Willkomm, M. Bohge, D. Hollos, J. Gross, and A. Wolisz, "Double hopping: a new approach for dynamic frequency hopping in cognitive radio network," *IEEE PIMRC 2008*, pp. 1-6, Cannes, France, Sept. 2008.
- [11] S. Geirhofer, J. Z. Sunb, L. Tong, and B. M. Sadler, "Cognitive frequency hopping based on interference prediction: theory and experimental results," *ACM SIGMOBILE Mob. Computing and Commun. Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 49-61, 2009.

- [12] G. Zhang, A. Huang, H. Shan, J. Wang, Tony Q. S. Quek, and Yu-Dong Yao, "Design and analysis of distributed hopping-based channel access in multi-channel cognitive radio systems with delay constraints," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 32, no. 11, pp. 2026-2038, Nov. 2014.
- [13] K. Kang and S. Yoo, "Efficient spectrum sensing based on evolutionary game theory in cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 39B, no. 11, pp. 790-802, Nov. 2014.
- [14] M.-G. Kim, J.-K. Choi, S.-J. Yoo, Y.-U. Jang, K. Jeong, and K.-E. Lee, "Fast and reliable dynamic common channel setup and reconstruction method for the point-to-point communications in military CR networks," *J. KICS*, vol. 37C, no. 11, pp. 1112-1128, Nov. 2012.
- [15] S.-W. Kim, J.-K. Choi, and S.-J. Yoo, "Uplink relaying scheme for efficient frequency usage in cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 36, no. 4, pp. 356-368, 2011.

원 종 민 (Jong-Min Won)



2016년 2월 : 인하대학교 정보통신공학과 (공학사) 졸업예정
 <관심분야> Cognitive Radio Network, 무선센서네트워크, 통신 시스템

유 상 조 (Sang-Jo Yoo)



1988년 2월 : 한양대학교 전자통신학과(공학사)
 1990년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사)
 2000년 8월 : 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)
 1990년 3월~2001년 2월 : KT 연구개발본부

2001년 3월~현재 : 인하대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> 무선 네트워킹 프로토콜, Cross-layer 프로토콜 설계, Cognitive Radio Network, 무선 센서네트워크, 미래인터넷

서 명 환 (Myunghwan Seo)



2002년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 학사
 2004년 2월 : 한국과학기술원 전자공학과 석사
 2009년 2월 : 한국과학기술원 전자공학과 박사
 2009년 1월~현재 : 한화탈레스 전문연구원

<관심분야> Mobile Ad-hoc Network, Wireless Mesh Network, Network Synchronization, Military Wireless Communications

조 형 원 (Hyung-Weon Cho)



1992년 2월 : 광운대학교 전자공 재료학과 학사
 1994년 2월 : 광운대학교 전자공 재료학과 석사
 2012년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 박사
 1997년 7월~현재 : 한화탈레스 수석연구원

<관심분야> Military Wireless Communications, 통신 시스템, 네트워크 설계 및 최적화