



Cognitive Radio의 Resource Allocation

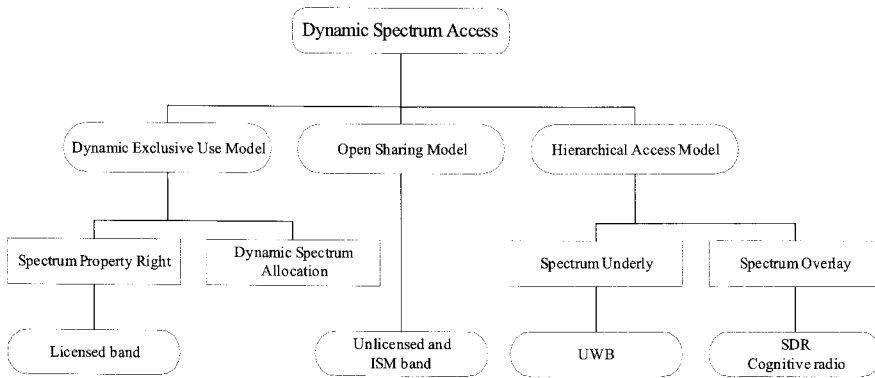
이병주 (이노와이어리스) · 이승형 (광운대학교)

I. 서론

현재 급속도로 발전하는 다양한 형태의 무선 통신 기술들은 일상생활 전반에 밀접하게 관계하고 있다. 이에 따라 다양한 무선통신 기술들이 연구 개발되고 있다. 음성통신을 위한 2세대와 3세대 이동통신은 데이터통신과 융합 되어 개발되고, 데이터통신을 위한 무선통신 기술들도 다양한 방향으로 연구가 진행되고 있다. 현재 LTE, WiMax와 같은 차세대 무선 통신 시스템은 보다 빠르게 많은 양의 데이터를 전송하는 것을 목표로 한다. 이렇게 급속도로 발전하는 무선통신 기술은 기존 기술과 공존 문제로 인하여 다른 주파수 영역을 사용하게 되고, 현재 거의 모든 영역의 주파수 대역이 할당되어 있다. 무선통신에서 주파수는 한정된 자원으로 자원의 할당 및 효율적인 사용이 매우 중요하다. 주파수 사용에 효율적인 방법을 위해 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔고 새로운 방법이 모색되고 있다.

이러한 주파수 사용의 문제에 대해서 해결하기 위해 CR(cognitive radio)이라는 개념이 제시되었다. CR은 특정 영역의 주파수가 특정 서비스에 할당되어 있지만 실제로 사용되지 않고

비어있는지를 감지하여 이를 효율적으로 공유하여 사용할 수 있는 방법이다. 대부분의 개인 근거리 무선통신은 허가 없이 사용할 수 있는 ISM 밴드를 사용한다. ISM밴드는 산업, 과학, 의료들의 분야에서 공통적으로 사용되는 비 허가 주파수 영역을 말한다. 이 영역의 주파수는 전 세계가 공통적으로 허가 없이 사용할 수 있으며 그 사용 가능 영역이 한정된다. 새로운 무선 통신 시스템을 표준화하고 구현하여 서비스하기 위해서는 새로운 영역의 신규 주파수 할당이 어렵다. 또한 허가 없이 무료로 사용할 수 있는 ISM 밴드 부분은 많은 서비스로 주파수의 사용이 포화되었고 이종 통신 시스템 간에 주파수 간섭이 야기되고 있다. 이러한 환경에서 새로운 방법의 주파수 사용방법이 모색되어 cognitive radio 기술이 주목 받게 되었다. ISM 밴드의 사용이나 신규 주파수 등록보다는 기존에 TV 방송이나 다른 용도로 할당되어 있는 주파수 영역을 공유하는 것이 보다 효율적인 방법이 될수 있다^[3]. 이 주파수 대역은 지역이나 시간에 따라서 그 사용률 혹은 사용여부가 변화한다. 해당 주파수의 경우 기존 사용자에게 간섭을 주지 않는 범위 안에서 주파수 공유를 통하여 여러 시스템간에 효율적인 주파수 중



〈그림 1〉 Dynamic Spectrum Access Network의 구성도

복 사용을 가능케 하는 것이 CR가 적용가능하다. 본고에서는 CR기술을 사용하여 효율적으로 주파수자원을 공유하여 이동 및 무선통신 단말이 효율적으로 주파수를 사용하는 방법에 대해서 소개한다.

II. Cognitive Radio의 개념

DSA(Dynamic Spectrum Access) 네트워크는 무선 통신 시스템에서 주파수 자원의 사용을 동적 혹은 공유하는 형태의 통신시스템을 포괄하는 큰 개념이 된다. Dynamic Exclusive Use Model의 경우 주파수를 고정된 형태로 할당하는 허가된 주파수(licensed band)의 사용과 허가된 주파수 중에서 dynamic하게 주파수 자원을 할당하는 Dynamic spectrum allocation이 있다. Open sharing Model의 경우 ISM 밴드의 사용이 대표적인 예이다. 최근 WPAN, WLAN, WMAN은 2.4GHz 또는 5GHz의 비 허가 ISM 주파수 사용을 표준으로 택하고 있다. ISM 밴드는 산업, 과학, 의료들의 분야에서 공통적으로 사용되는 비 허가 주파수 영역으로 현재 많은 무선

네트워크가 ISM 밴드를 사용한다. Hierarchical Access Model의 경우 우선사용자(primary user)와 허가받지 않은 사용자가 같은 주파수를 공유하여 사용하는 방법이다^[2]. UWB 기술의 경우 우선사용자에게 간섭을 주지 않도록 낮은 전송출력으로 광대역의 대역폭을 사용하는 기술로 고속의 데이터 전송을 가능케 하는 기술이다. 또한 SDR(software defined radio)와 cognitive Radio 기술의 경우 우선사용자의 주파수 사용이 없는 경우 해당주파수를 공유하는 사용하는 방법이다. SDR과 CR의 가장 큰 차이점은 SDR의 경우 주파수의 센싱과 이동에 대한 특별한 알고리즘 및 기술없이 주파수의 사용을 software의 정의에 의해 이루어지게 된다. 이에 비해 CR의 경우 주파수의 센싱과 이동에 있어서 주변의 환경 및 우선순위 사용자의 주파수 사용여부를 인지하여 동작하는 보다 intelligent한 기술이 포함된다.

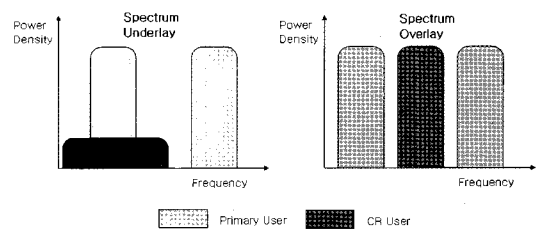
Cognitive Radio은 무선 통신 환경에서 유한한 자원의 효율적인 사용 및 전송 효율을 높일 수 있는 기술이다. 주파수의 효율적인 사용을 위해서 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔고 새로운 방법이 모색되고 있다. 이런 주파수 사용의 문제에 대해서 J. Mitola는 cognitive radio라는

개념을 제시하였다^[1]. Cognitive radio는 특정 영역의 주파수가 할당되어 있지만 할당 받은 주파수가 포화상태인 경우 사용되지 않고 비어있는 다른 주파수를 감지하여 이를 효율적으로 공유하여 사용할 수 있는 방법을 의미한다.

최근 개발되는 대부분의 무선 통신 기술은 새로운 주파수 할당의 문제 때문에 비 허가 주파수 대역인 ISM 밴드를 목표로 개발된다. 이 때문에 이 주파수 대역은 많은 무선네트워크로 인한 간섭과 충돌이 일어나고 있다. 또한 이 ISM 밴드의 경우 그 영역이 한정되어 있어 고속의 데이터 전송을 위한 광대역 통신에는 불리하다. 또한 이를 위해 새로운 주파수를 허가 받아 사용하는 것에 큰 비용의 지불이 필요하다.

Cognitive radio는 우선순위 사용자에게 할당된 채널이 특정 시간, 특정 지역에서 사용되지 않는다면 우선순위 사용자(primary user)에게 주파수의 간섭없이 해당 주파수 자원을 사용하는 기술이다. Cognitive radio 기술은 크게 우선순위 사용자와 동시에 해당 주파수를 사용하는 spectrum underlay 기법과 우선순위 사용자가 주파수 영역을 전혀 사용하지 않는 경우에만 주파수를 사용하는 spectrum overlay 기법이 있다. <그림 2>는 spectrum underlay 기법과 spectrum overlay 기법의 비교이다.

Spectrum underlay 기법은 우선순위의 사용 주파수와 동일한 대역의 주파수를 사용하여 CR 사용자가 통신을 한다. 이때 우선 사용자의 통신에 간섭이나 충돌이 없도록 충분히 낮은 전송 출력으로 통신하는 것을 원칙으로 한다. 이 경우 CR 사용자는 우선사용자가 충분히 낮은 간섭을 겪게 되는지 측정하고 적용하여야 하며 이에 대한 구현의 복잡도가 증가하게 된다. 이에 비해 Spectrum overlay 기법은 우선사용자의 주파

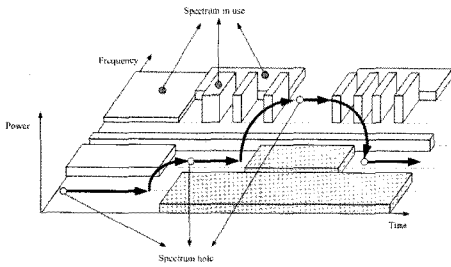


<그림 2> CR의 주파수 사용 방법인 Spectrum Underlay와 Spectrum Overlay 방법의 비교

수 사용이 없을 경우 해당 주파수를 사용하게 된다. 이 경우 우선 사용자의 주파수 사용이 감지되는 경우 해당 주파수 사용을 멈추고 다른 주파수를 센싱하여 이동하는 방법을 사용한다. 이때 우선순위 사용자는 CR 사용자에게 채널의 사용 여부를 알릴 필요가 없기 때문에 CR 사용자는 주기적으로 우선사용자의 채널 사용을 센싱하는 과정이 필요하다. 이를 채널 센싱이라고 하며 대부분의 CR 구현은 overlay 기법을 사용하여 구현한다.

III. Cognitive Radio의 주파수 자원 사용

CR의 핵심인 채널 센싱의 경우 우선순위 사용자가 사용하지 않는 채널 자원인 spectrum hole을 찾아서 이동하는 방법을 사용한다. <그림 3>은 CR에서 spectrum overlay 방법으로 주파수 자원을 공유하고 주파수의 이동을 보여준다. 그림에서 상자형태로 보여주는 것은 우선순위 사용자의 주파수의 사용을 보여준다. 상자의 가로축 길이는 우선순위 사용자가 주파수를 사용하는 시간을 나타내며, 상자의 폭은 우선순위 사용자가 사용하는 주파수의 대역폭을 나타낸다. 상자의 높이는 우선순위 사용자의 송수신 출력을



〈그림 3〉 Spectrum hole의 센싱과 주파수의 이동

나타낸다. CR 사용자는 우선순위 사용자가 사용하지 않는 주파수의 영역을 탐색하여 사용하다가, 우선순위 사용자의 주파수 사용이 감지되면 이동할 주파수를 탐색하여 해당 주파수로 이동하게 된다. 이때 사용하는 기술은 아래 목록과 같다.

주파수 센싱 (spectrum sensing) - 주파수의 센싱은 무선 채널의 환경으로부터 받은 정보에 따라 해당 주파수의 사용여부 혹은 primary user 혹은 다른 CR 사용자의 전송출력을 측정하

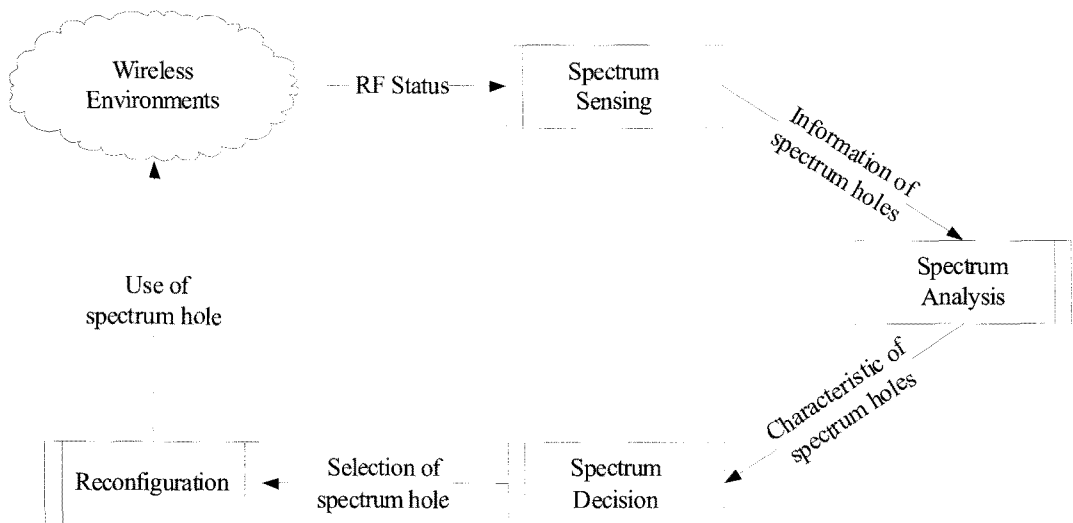
여 해당 주파수에 대한 정보를 수집하게 된다.

주파수 분석 (spectrum analysis) - 주파수 센싱을 통해서 획득한 정보를 바탕으로 해당주파수 영역에서 spectrum hole의 존재 여부 및 우선순위의 사용자의 주파수 사용에 대해 분석한다.

주파수 결정 (spectrum decision) - 주파수 분석을 통해 분석된 spectrum hole의 목록을 구성하고 해당 spectrum hole의 사용을 결정한다.

주파수 재설정 (reconfiguration) - 주파수 결정을 통해서 확인된 주파수의 사용을 위해 CR 사용자의 무선 주파수 사용을 위한 parameter 및 설정을 재설정한다.

위의 기술은 CR 기술을 사용하여 주파수를 탐색, 분석, 결정, 재설정, 사용하는 주기를 나타내며, 해당 주기는 우선 순위 사용자의 출현으로 이해서 주파수의 재설정이 필요한 경우에 일어난게 된다. 이와 같이 CR 사용자는 우선순위 사용자의 해당 주파수 사용에 대한 지속적인 센싱 및 우선순위 사용자의 검출 기술을 요하게 된다. 우



〈그림 4〉 CR 기술의 주파수 이동을 위한 사이클

선순위 사용자를 검출하기 위해서 CR 사용자는 주기적으로 모든 송신을 멈추고 우선순위 사용자의 송신신호를 탐색하는 silent 구간을 갖게 된다. 이는 CR 네트워크를 관리하는 노드에 의해서 이루어지며 silent 구간의 주기와 길이는 해당 노드에 의해서 결정된다. 우선순위 사용자를 검색하는 기술은 다음과 같다.

1. 에너지 검출 방법 (Energy detection)

에너지 검출 방법은 특정 주파수 대역에서 수신된 신호의 에너지 레벨을 측정하여 우선순위 사용자 혹은 다른 CR 사용자의 존재 유무를 판단하는 기법이다. CR 사용자는 특정 주파수 영역을 센싱하여 수신된 신호를 분석한다. 이때 수신된 신호에는 우선순위 사용자 신호뿐만 아니라 노이즈도 섞여있게 된다. 노이즈의 영향을 고려하기 위해 일반적으로 에너지 검출은 평균이 0 인 백색 가우스 잡음(white Gaussian noise)이 함께 수신된다고 가정하여 계산된다. 에너지 검출을 사용하는 경우 CR 사용자는 수신된 신호의 에너지가 미리 정해진 threshold 을 넘지 못하면 해당 대역이 비어있다고 판단하며, 반대로 수신 에너지가 threshold을 넘으면 우선순위 사용자 혹은 다른 CR 사용자가 존재한다고 판단한다. 에너지 검출방법은 비교적 구현이 간단하며, 우선순위 사용자에 대한 사전에 정보 없이 검출할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 에너지 검출은 신호의 존재 유무만 판단할 수 있어 우선순위 사용자와 다른 CR 사용자를 구분해 낼 수 없다는 단점이 있다.

2. 파일럿신호 검출 방법 (Pilot detection)

특정 통신시스템에서 사용자의 동기 및 control 정보르 송신하는 파일럿신호의 정보를통해 우선

순위 사용자의 유무를 검출할 수 있다. 특정 방송 신호의 경우 사용하는 주파수에 파일럿 신호를 포함하고 있어 방송신호의 power spectral density를 통해 우선 순위 사용자가 지속적으로 파일럿 신호를 전송하게 된다. CR 사용자는 이에 대한 정보를 사전에 알고 있는 경우 우선순위 사용자를 검출할 수 있다. 파일럿 검출은 파일럿 신호의 수신 SNR(signal-to-noise ratio)을 최대화하는 정합필터 (matched filter)를 사용하여 이루어진다. 따라서 짧은 시간 동안만 채널 센싱을 하여도 아주 미약한 신호로 통신하는 선 순위 사용자의 존재까지 검출해낼 수 있다. 하지만 파일럿 검출은 CR 사용자가 우선순위 사용자의 파일럿 신호를 정확하게 알고 있을 때에만 적용 가능하다는 한계가 있다. 또한 우선순위 사용자와 CR 사용자간의 정확한 동기가 필요하다는 단점이 있다.

3. 고유값 검출 방법 (eigen-value detection)

고유값 검출은 수신된 신호를 샘플링한 후, 구해진 샘플 값들 사이의 상관성을 사용하여 우선 순위 사용자의 유무를 판단하는 방법이다. 즉, 우선순위 사용자에 의해 송수신되는 신호의 샘플 값들은 일반적으로 상관성을 지니는 반면, 잡음의 샘플 값들은 상관성을 갖지 않는다는 점을 활용한 것이다. 샘플 값들의 상관성은 샘플 공분산(covariance) 행렬의 고유값을 통해 표현된다. 만약 계산된 고유값이 미리 정한 threshold을 넘으면 선순위 사용자가 존재한다고 판단하고, 그렇지않다면 해당 주파수 대역이 비어있다고 판단한다. 고유값 검출은 선순위 사용자 신호의 샘플 값들이 큰 상관성을 갖는 경우라면 에너지 검출에 비해 정확도가 높다는 장점이 있으나, 반대로 상관성이 없는 경우는 에너지 검출보다도 성

능이 떨어진다는 한계를 갖는다. 또한 공분산 행렬을 구한 후, 고유값을 계산해야 하므로, 에너지 검출에 비해 복잡도가 크다.

4. 주기정상성 특성 검출(cyclostationary feature detection)

파이릿신호 검출 방법과 비슷하게 우선 순위 사용자에 의해 생성되는 신호의 고유한 주기정상성을 검출하는 방법이다. 특정 시스템이 사용하는 다중화, 펄스, 변조, 코딩 등에 의해 고유한 특정 주기정상성을 갖게되며, 이는 특정 주파수와 주기 주파수 쌍에서 나타나는 spectrum line 들의 존재를 통해 확인할 수 있다. 만약 CR 사용자가 우선순위 사용자가 전송하는 신호 고유의 주기정상성을 알고 있다면 이를 활용해 해당 선 순위 사용자의 존재 유무뿐만 아니라 종류까지 판단해낼 수 있다. 통신 시스템들에 의해 생성된 신호와 달리 잡음은 주기정상성이 전혀 없으므로, CR 사용자가 주기정상성 특성 검출을 사용한다면 매우 낮은 SNR을 갖는 우선순위 사용자의 신호도 검출할 수 있다. 또한 주기정상성 특성 검출은 검출된 신호를 전송한 시스템의 종류와 특성까지 도출할 수 있다는 큰 장점을 갖는다. 그러나 다른 검출 방법에 비해 훨씬 큰 복잡도를 요구하며 우선순위 사용자의 검출에 필요한 시간이 상대적으로 길다는 것이 단점이다.

IV. Cognitive Radio 기술의 자원 할당 방법

1. IEEE 802.22 WRAN 기술

IEEE 802.22 WRAN은 지역적으로 사용되고

있지 않은 방송 대역을 사용하여 상대적으로 통신 환경이 열악한 도시 외곽 지역에서 무선 데이터 서비스를 지원하기 위해 제안되었다^[4]. IEEE 802.22과 다른 무선 네트워크 표준의 가장 큰 장점은 CR(Cognitive Radio)기술과 네트워크 상태를 인지하는 learning algorithm을 활용하여 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하는 것이다. 현재 IEEE 802.22에서는 WG 산하 Tiger team을 결성하여 우선 TV 사용 주파수 현황을 감지하기 위한 스펙트럼 센싱 기술에 관해 활발히 논의하고 있으며 에너지 감지나 정합 필터를 이용한 TV 신호의 센싱, 수신 신호와의 상관(correlation) 등을 통하여 TV 주파수 밴드의 사용 유무를 감지하는 제안서들이 제출되어 있다. WRAN은 광활한 지역에서 무선 인터넷 접속이 가능하게 하기 위하여, VHF/UHF의 TV 대역(54~862MHz) 중 사용되지 않는 채널을 활용하여 비대칭 디지털 가입자 회선(ADSL)이나 케이블 모뎀과 동급의 서비스를 목적으로 하고 있다. IEEE 802.22는 FCC에서 발행한 “Unlicensed operation in the TV broadcast bands(FCC 04-186)”를 토대로 2005년 1월부터 2005년 9월까지 functional requirements 문서를 작성하였다. 이 FRD에 따르면 서비스 커버리지는 33km 이고, CPE (Customer Premise Equipment)의 최대 전력은 4 watt, 그리고 서비스 availability F(50, 99.9)를 만족하도록 제안서를 작성하도록 되어 있다.

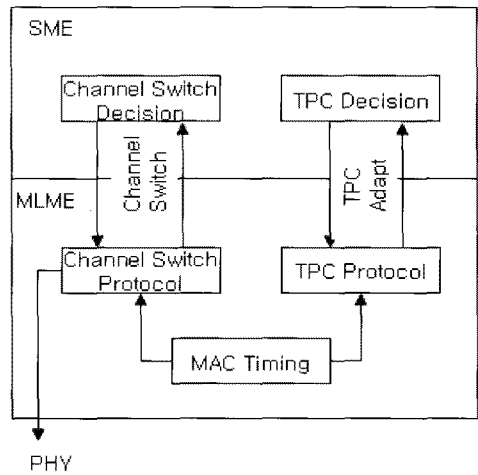
<표 1>은 IEEE 802.22의 요구사항에 대한 정리이다. 제안된 IEEE 802.22 WRAN의 요구사항의 주요내용은 OFDMA를 기반으로 하여, TV channel 단위로 사용하되 필요시에는 fractional bandwidth를 이용하도록 되어 있다. 또한 duplex 방식으로는 TDD를 mandatory로 하되 가용 채

도록 한다^[5]. IEEE 802.11h는 기존 WLAN의 MAC에 채널 센싱 및 채널 변경과 같은 주요 CR 기술을 추가하였다. DFS(Dynamic Frequency Selection)을 통해서 사용하는 주파수의 대역을 동적으로 이동할수 있으며, 이동하는 기준은 CR과 마찬가지로 해당 주파수의 우선 사용자의 여부에 따라서 이동하게 된다. 또한 TPC(transmission power control)을 통해서 802.11h의 단말이 송신 출력을 적절하게 조정하게 된다. 이는 우선순위 사용자에게 간섭이나 충돌을 일으키지 않게 송신출력을 조절하는 기술이다. IEEE 802.11h에는 기존의 WLAN과 마찬가지로 AP(access point)가 있는 BSS(basic service set) 모드와 AP가 없는 ad-hoc 모드를 지원한다. 그러나 ad-hoc 모드일 경우에도 하나의 노드가 AP의 역할과 마찬가지로 CR에 필요한 채널센싱을 위한 silent 기간의 결정이나 주파수 이동을 책임진다. 802.11h도 기존의 WLAN 시스템과 마찬가지로 모든 단말들이 한 채널에 머물면서 서로 데이터를 주고받게된다. 하지만 채널 센싱을 통해 해당 채널에서 우선순위 사용자를 검출한다면 사용 채널을 변경한다. 이때 AP나 채널 사용을 책임지는 단말은 모든 단말이 동일한 채널로 이동하여 데이터 통신을 지속할 수 있도록 명령한다.

IEEE 802.11h의 DFS의 경우 3가지 방법에 의해서 무선 주파수의 사용여부가 검출된다.

기본측정- 다른 BSS의 신호, 다른 OFDM 심볼의 검출, 레이더의 신호, 알수없는 신호 등을 검출

CCA (Clear channel assessment) 측정- 전체 측정 시간동안 채널이 busy인 경우 의 비율의 측정



〈그림 6〉 IEEE 802.11h의 DFS와 TCP 구조

RPI (received power indicator) 히스토그램 측정 - 측정구간동안 안테나를 통해서 수신한 측정 파워의 히스토그램의 분석

위와 같이 측정된 결과를 바탕으로 channel switch decision이 결정되고, 실제 channel의 이동은 channel switch protocol에 의해 이루어진다. AP는 802.11h 네트워크는 상대적으로 채널 사용률이 낮은 5GHz 대역을 활용함으로써 간섭 없이 데이터를 전송할 수 있으나, 앞서 설명한 채널 센싱과 채널 변경으로 인해 서비스 품질이 떨어질 수 있으므로 효율적인 채널 관리 및 채널 변경 기법의 개발이 요구된다.

V. 결론

본 고에서는 cognitive radio 기술의 개념 및 cognitive radio기술에서 주파수 자원의 탐색 및 할당을 하는 방법에 대해서 살펴보았다. 현재 부족한 주파수 자원의 효율적인 할당 및 이용을 위

해서 cognitive radio 기술이 주목받고 있다. Cognitive radio 기술은 주파수의 할당 및 사용이 채널 센싱에 의해서 이루어지며, 우선순위 사용자의 검출 및 주파수 이동 기술이 중요하다. 주변 통신 환경을 인지하고 인지된 상황을 반영하여 주파수 자원의 탐색, 분석, 결정, 재설정을 통해서 효율적인 주파수 사용은 향후 도래할 유비쿼터스 통신 시대를 실현시킬 수 있는 핵심적인 기술이다. 지속적인 기술 개발 및 연구를 통해서 앞으로 선진 기술 시장의 중추적인 역할을 할 수 있도록 많은 투자와 연구 개발이 계속적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] J. Mitola, Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications, Workshop Mobile Multimedia Communications, pp.3-10, 1999.
- [2] L. Xu, R.Tonjes, W.Hansmann, M. Frank, and M. Albrecht, DRiVE-ing to the Internet: Dynamic radio for IP services in vehicular environments, IEEE international Conference of Local Computer Network, Nov., 2000.
- [3] S. Mishra, A. Sahai, and R. Brodersen, Cooperative Sensing among Cognitive Radios, IEEE ICC 2006, 2006.
- [4] IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks, <http://www.ieee802.org/22/>.
- [5] IEEE 802.11 Working Group on Wireless Local Area Networks, <http://www.ieee802.org/11/>.
- [6] Daji Qiao, Sunghyun Choi, IEEE 802.11h: Technology and Application, White paper
- [7] 황준호, 신요안, 이원철, 유명식, 인지 라디오 접목 네트워크 기술 동향 분석,
- [8] 김창주, "Cognitive Radio 기술 및 응용", 한국전자과학회지 전자파기술, 제17권, 제2호, pp.3-8, 2006년 4월
- [9] 한정애, 정상수, 전화숙, Cognitive Radio 네트워크의 개요, 한국정보과학회 논문지, Vol.22, No.2, 2008
- [10] 엄중선, 고평진, 임선민, 김상원, 송명선, Cognitive Radio, TTA Journal No.114, 2008.

저자소개



이 병 주

2002년 광운대학교 컴퓨터공학과 학사

2004년 광운대학교 전파공학과 석사

2008년 광운대학교 전파공학과 박사

2008년 12월 ~ 현재 (주)이노와이어리스 선임연구원

주관심 분야 : Cognitive Radio, LTE

저자소개



이 승 형

- 1988년 연세대학교 전자공학과 학사
- 1990년 연세대학교 전자공학과 석사
- 1999년 The University of Texas at Austin, 공학박사
- 2000년 ~ 현재 광운대학교 전자공학과 교수
- 2002년 ~ 현재 한국이더넷포럼 무선 TAG 위원장
- 2003년 ~ 현재 정보통신기술협회 표준화 전문가
- 2004년 ~ 현재 OSIA 협동이사
- 2009년 ~ 현재 한국통신학회 통신네트워크연구회 운영위원장
- 2009년 ~ 현재 한국정보과학회 논문지(IN)편집위원장
- 1999년 ~ 2000년 삼성종합기술원 전문연구원
- 1990년 ~ 1995년 국방과학연구소 연구원

주관심 분야 : WPAN, WLAN, WMAN, CR