

# Spectrum 활용을 위한 Cognitive Radio에 대한 연구

이상현, 강희조

목원대학교 컴퓨터공학부

## 목 차

- |                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| I. 서론                    | IV. 스펙트럼 센싱에서의 고려사항 |
| II. Cognitive Radio의 필요성 | V. IEEE 802.22 WRAN |
| III. 스펙트럼 센싱 기술          | VI. 결론              |

## I. 서론

현재 일상생활에서 더욱 많은 사용이 요구되어 가는 다양한 형태의 무선 통신 기술들은 빠르게 발전되어 가고 있다.

특히 이동통신, WLAN, 디지털 방송 및 위성통신을 비롯하여 RFID/USN(Radio Frequency IDentification/Ubiquitous Sensor Network), WiBro(Wireless Broadband) 등 무선을 이용하는 서비스가 급증하고 있다. 이렇듯 급속한 발전을 이루고 있는 무선통신서비스의 다양화와 이용증가로 자원이 한정되어 있는 주파수자원에 대한 수요는 급증하면서 그 가치는 점차 높아지고 있다. 이와 같이 중요한 전파 자원을 효율적으로 이용하기 위하여 선진 국가에서는 국가적인 차원에서 이를 효율적으로 이용하기 위한 기술을 개발하고, 이를 토대로 전파 정책을 수립하기 위한 활동이 활발하게 진행되고 있다.

최근 FCC의 SPTF(Spectrum Policy Task Force)에서 발표한 내용에 따르면 스펙트럼 고갈 현상은 절대적인 주파수 자원이 부족해서 생기는 문제가 아니라 주파수 자원을 할당하는 방법상의 문제 때문인 것으로 나타났다[1]. 기존의 주파수 할당 방식을 사용하게 되면 장소나 시간에 따라 할당된 주파수 대역이 사용되지 않는 경우가 발생하고 이로 인해 결과적으로 스펙트럼 이용 효율이 낮아진다는 사실이 실제 측정을

통해 최근 확인된 것이다.

이러한 문제에 대해서 J. Mitola는 주파수가 할당되어 있지만 실제로 사용되지 않는 유휴 주파수를 감지해서 이를 효율적으로 공유하여 사용할 수 있는 cognitive radio(CR)을 제시하였다[2].

본 고에서는 다양한 무선자원을 능동적으로 인지하여 동적으로 변화하는 사용자의 요구 및 상황에 적합하도록 유휴 무선자원을 지능적으로 활용하는 제반 기술인 Cognitive Radio를 이용하여 스펙트럼을 효율적으로 활용할 수 있는 방안 및 발전 방향, 그리고 IEEE 802.22 표준화 동향을 알아본다.

## II. Cognitive Radio의 필요성

무선 통신 분야의 큰 이슈 중의 하나는 효율적인 주파수 자원의 활용이다. 대부분의 개인용 근거리 무선기기들은 허가 없이 (unlicensed) 공용 주파수 대역을 사용하고 있다. 그림 1은 현재 사용되고 있는 unlicensed 주파수 대역을 나타내고 있다.

Unlicensed 주파수 대역은 한정되어 있고 그 외의 주파수 대역은 다른 용도로 이미 할당되어 있다. 따라서 수 GHz이하의 주파수 대역에서 신규 주파수 할당도 어렵고 unlicensed 주파수 대역 또한 제한되어 있어서 서로 다른 시스템간의 간섭이 야기되고 있다. 하지만 그림 2의 (a)에서와 같이 미국 캘리포니아 버클

리 지역에서 주파수 사용 현황을 보면 상황은 조금 달라진다. 그림 2에서 보이는 바와 같이 2GHz 이상에서는 많은 주파수가 사용되지 않으며, 1GHz이하의 TV (television) 주파수에서도 부분적으로 사용이 되지 않는 주파수 대역들이 있다[3].

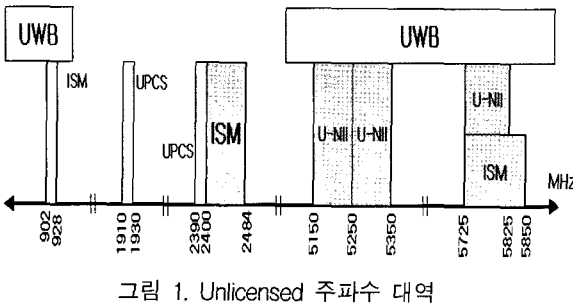
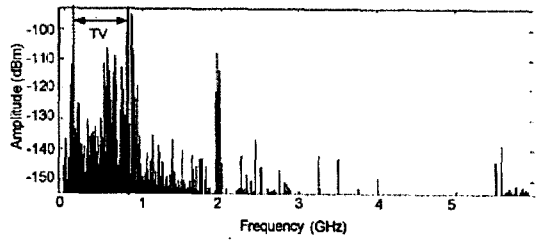


그림 1. Unlicensed 주파수 대역

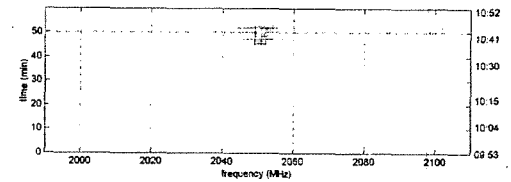
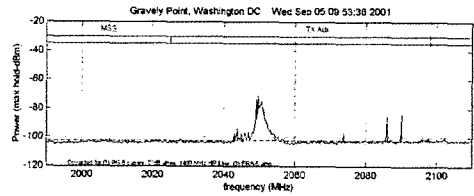
그림 2의 (b)는 Washington DC 지역에서 주파수 사용현황을 알아본 그래프이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 지역적으로 사용되지 않는 주파수 대역과 함께 시간적으로도 사용되지 않는 부분의 존재를 알 수 있다.

FCC(Federal Communications Commission)에서는 이러한 주파수의 실제 사용률에 대한 연구를 진행하여, 일시적으로나 지역적으로 변화하는 평균 주파수 사용률을 조사해본 결과 약 15%에서 85%정도의 사용률을 보이고 있었다. 그래서 FCC에서는 2003년 12월에 주파수 사용 효율을 올리하고자 NPRM (Notice of Proposed Rule Making)을 통하여 비어 있는 주파수에 대한 중복 사용 가능성에 대한 내용을 발표하였다. 이로서 주파수 부족 문제를 많이 완화할 수 있는 계기가 되었다. 이 때, 주파수 공용 사용의 조건은 요금을 지불하고 주파수 대역을 사용하는 우선 사용자(primary user)에게는 간섭을 주지 말아야 한다.

CR 기술은 기존의 주파수 사용자에게 간섭을 주지 않고 비어 있는 주파수를 검색하여 이를 사용하는 기술로서, 일반적인 무선 통신 시스템에 주파수 검출 기능 및 이에 대한 운용 기술 등이 추가된 새로운 개념이라고 할 수 있다. CR 기술에 필수적으로 사용되는 추가된 고유한 기법으로 스펙트럼 센싱(Spectrum Sensing)과 동적 주파수 선택(Dynamic Frequency Selection)이 있다[4],[5].



(a) California



(b) Washington DC

그림 2. 주파수 이용도

### III. 스펙트럼 센싱 기술

CR은 주변 환경 정보를 알고 그에 적응적으로 대처할 수 있는 Software Define Radio의 확장 개념이며, 언제, 어디서나 통신이 가능하도록 함으로써 부족한 무선 자원의 활용성을 극대화하는 기술이다[6]-[8]. 일반적으로 정합 필터를 이용한 방법, 에너지 검출기를 이용하는 방법 그리고 스펙트럼 상관 기반의 신호 인지 기법 등이 있다.

#### 3.1 정합 필터 기반의 센싱 방법

그림 3은 코히런트 검출(coherent detection)방식을 기반으로 하는 일반적인 무선 통신 시스템 수신단에서 사용되는 정합 필터의 구조를 도시하고 있다. 정합 필터는 수신 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 최대화하여 원래 신호를 복조하는 최적의 신호 검출 방

식으로 잘 알려져 왔다. 하지만 신호 인지를 고려했을 경우, CR 시스템은 PU 사용자 신호를 정확히 인지하기 위해 PU 사용자 시스템에 적용되는 세부적인 기술 규격을 사전에 미리 알고 있어야 한다. 이와 더불어, 그림 3에서처럼 정확한 동기화 및 채널 등화 등이 반드시 요구되는 사항들이기 때문에, 정합 필터를 사용하여 CR를 위한 신호 검출 과정을 수행하게 될 경우, 우수한 신호 센싱 성능이 예상되는 반면에 에너지 검출 방법에 비해 센싱 수신기가 다소 복잡한 단점을 가진다.

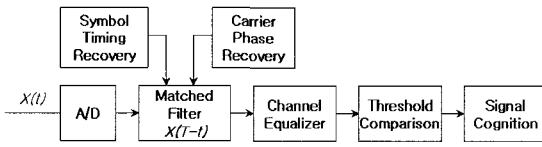


그림 3. 정합 필터 기반의 신호 검출 구조

### 3.2 에너지 검출 기반의 센싱 방법

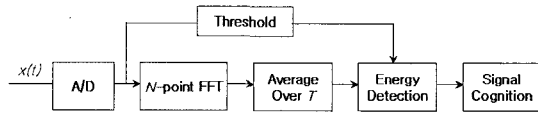


그림 4. 에너지 검출기 기반의 신호 인지를 위한 시스템 구조

그림 4는 앞 절의 코히런트 검출 방식과는 대조적으로 단순한 신호 에너지 검출을 통한 넌코히런트 검출(noncoherent detection) 방식 기반의 검출 과정을 고려할 수 있는데, 이 경우 수신 신호에 대해 FFT(Fast Fourier Transform) 연산 및 평균을 취한 후, 그 에너지를 구하여 특정 임계치와 비교하는 방법을 통해 해당 주파수 채널 내에 존재하는 신호의 검출을 수행하게 된다. 그렇지만 이러한 에너지 검출 기반의 센싱 방법은 매우 간단한 시스템 구조를 요구하는 반면에, 크게 두 가지의 심각한 단점을 수반하게 된다. 첫째 PU 사용자 신호의 정확한 검출을 위해 요구되는 센싱 임계치는 통신 초기 미지의 혹은 매시간 변화하는 잡음 레벨에 매우 민감하고, 해당 채널 내에 존재하는 간섭 신호의 영향 또한 피할 수 없게 되며, 심각한 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading)을 겪는 상황일 경우에도 역시 적정 센싱 임계치의 설정이

어려워진다. 둘째 에너지 검출만을 통해서는 PU 사용자 신호, 간섭 신호, 잡음 성분 간의 구분이 난해하다는 단점을 갖게 된다.

### 3.3 스펙트럴 상관 기반의 센싱 방법

일반적으로 PU 사용자의 변조 신호에 대한 특성을 살펴보면, 단일 반송파 시스템의 경우에서 정현파, UWB(Ultra Wideband) 시스템의 경우에서 펄스 열(pulse train), 대역 확산 시스템의 경우에는 확산 부호 또는 도약 시퀀스, OFDM 시스템의 경우에서 CP(Cyclic Prefix) 등과 같이 고유의 주기성을 갖는 성분들을 포함하고 있다. 이러한 주기적인 성분들은 전형적으로 수신기에서 반송파 위상(phase), 펄스 타이밍(pulse timing), 다중 경로 도착(arrival) 등의 파라미터 추정을 위해 의도적으로 사용된다. 따라서 비록 전송 데이터는 stationary 랜덤 프로세스(random process) 성격을 가지고 있으나, 변조된 신호는 그 평균과 자기 상관 함수(auto-correlation) 등이 통계적으로 주기성을 갖게 되므로 cyclo-stationary한 특성을 나타내게 된다. 일반적으로 stationary 랜덤 프로세스의 신호 분석을 위해서는 자기 상관 함수와 전력 스펙트럼 밀도 함수(power spectral density)를 이용하게 되지만, 이러한 cyclo-stationary 신호는 그 주기적 특성으로 인해 주파수 성분간의 상관성이 존재하게 되어 다음과 같은 스펙트럴 상관 함수(spectral correlation function)를 이용할 수 있게 된다.

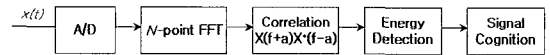


그림 5. 스펙트럴 상관 기반의 스펙트럼 센싱을 위한 시스템 구조

그림 5에서는 이러한 스펙트럴 상관 함수를 이용한 스펙트럼 상관 기반의 신호 인지 과정을 도시하고 있는데, 앞서 그림 4에서의 에너지 검출 기반 방식에서 스펙트럼 상관을 위한 부분이 추가적으로 삽입된 다소 간단한 형태를 지니고 있다.

그림 5에서  $N$ 이 증가할수록 스펙트럼 분해능(resolution)이 세밀해져 주파수 해상도가 우수해지므로 상대적으로 협대역(narrowband) 신호의 인지가 용이해지며, 또한 평균 시간  $T$ 가 길어질수록 잡음 성분

의 상쇄를 통해 잡음 전력의 레벨을 낮출 수 있기 때문에 해당 채널에서의 SNR이 향상되는 장점을 기대할 수 있다.

한편, 주기적 스펙트럼, 즉 스펙트럴 상관 함수 측면에서 살펴보면 변조된 PU 사용자 신호의 시간 관련 파라미터에 해당하는 위상 및 주파수 정보는 그대로 보존되고, 변조 방식에 따라서도, 예를 들면 BPSK와 QPSK의 경우 동일한 PSD(Power Spectral Density)를 갖는 반면에 각각의 스펙트럴 상관 함수는 확실히 구분됨으로, 스펙트럼 상의 높은 자기 상관성을 제공하는 독특한 고유의 스펙트럴 상관 함수 형태를 지니게 된다. 반면에 잡음 성분 및 간섭 신호의 경우에는 스펙트럴 상관이 거의 존재하지 않게 됨으로 인해 매우 낮은 상관값으로 존재하게 된다. 결과적으로, 그림 5에서의 스펙트럴 상관을 이용한 신호 인지를 통해 마지막으로 출력되는 정보는 PU 사용자 채널 내에 존재하는 신호의 수, PU 사용자 시스템의 신호 변조 방식, PU 사용자 시스템의 심벌 전송률, PU 사용자 채널 내 간섭 신호의 유무 등의 특징들을 도출하게 된다.

#### IV. 스펙트럼 센싱에서의 고려 사항

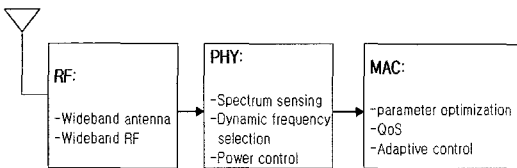


그림 6. CR 시스템의 구조도

CR 기술은 넓은 주파수 대역내의 스펙트럼 환경을 검색하고, 이러한 정보를 이용하여 사용자에게 개인의 통신 요구 사항을 최선으로 만족시키기 위한 무선 링크를 제공한다. 무선 인지 시스템은 일반적인 무선 통신 시스템에 센싱, 인지, 적응(sensing, cognition, adaptation) 등과 같은 기술을 추가함으로써 설계될 수 있다. 그림 6은 CR 시스템의 대략적인 구조도를 나타내며, 그림 7은 CR 시스템에서 효율적인 스펙트럼 센싱을 위한 PHY 계층과 MAC 계층 간의 상호 연관 기능을 나타낸다[9].

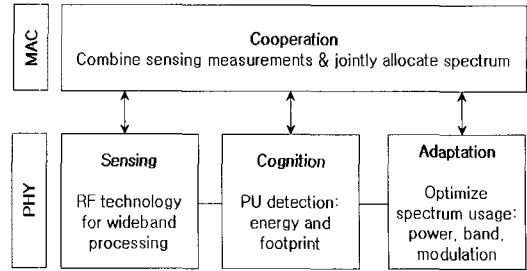


그림 7. 스펙트럼 센싱을 위한 계층 간의 상호 연관 기능

실제로 그림 7에서와 같이 PU 사용자 신호의 센싱 그리고 스펙트럼 풀링을 위한 스펙트럼 센싱을 위해서는 센싱 수신기와 MAC과의 상호 결합 기능을 통해 효율적인 채널 관리 및 다수의 CR 사용자에 의한 분산 스펙트럼 센싱 등이 가능하게 된다.

무선 인지 기술은 주파수 자원을 할당받은 우선순위가 낮은 CR 사용자의 경우에 항상 PU 사용자의 사용 여부를 고려해야 하기 때문에 기본적인 요구 사항으로 CR 사용자는 PU 사용자에 대해 간섭을 일으켜서는 안 된다. 이와는 반대로, PU 사용자의 네트워크는 스펙트럼 공유를 위하여 무선인지 네트워크 기반을 변화시킬 필요가 없다. 그러므로 CR은 지속적인 스펙트럼 센싱을 통해서 PU 사용자의 존재 유무를 독립적으로 검출할 수 있어야 한다. 이 때 PU 사용자는 신호의 종류에 따라 서로 다른 센싱 임계값(sensing threshold) 및 센싱 주기(sensing period)를 요구한다.

스펙트럼 센싱에 있어 중요하게 고려해야 할 사항은 원칙적으로 무선 인지 시스템의 센싱 수신기는 hidden 터미널 문제를 예방하기 위해서 우수한 성능으로 PU 사용자를 인지해내야만 한다. 그렇지만 다수의 CR 사용자가 공존해야 하는 상황에서는 그림 8에서와 같이 산, 빌딩 등의 장애물로 인한 새도우 현상 및 열악한 다중 경로 페이딩 특성 등에 의해 심각한 hidden 터미널 문제가 일어날 수 있다.

그림 8에서와 같이 PU 사용자에게 신호가 전송되면 먼저 정상적인 CR 사용자 #1과 #2의 경우 스펙트럼 센싱에 의해 현재 해당 채널 내에 신호가 존재한다는 것을 알게 되고, 스펙트럴 상호 상관을 이용하여 그 신호의 정체가 PU 사용자의 신호임을 인지하게 되어 현재 해당 채널 내에서 PU 사용자들이 통신 상태

에 있음을 인식하게 된다. 그렇지만 hidden 터미널 문제에 처한 CR 사용자 #3의 경우 새도우 현상에 의해 PU 사용자의 수신 신호 감도가 약화되어 스펙트럼 센싱에 의한 해당 채널 내 신호 검출에 실패하게 되고, 스펙트럼 상호 상관 기반의 신호 인지 역시 실패하게 되어 실제 PU 사용자들에 의해 통신 중인 채널을 사용 가능한 채널로 오판하게 된다. 결과적으로 hidden 터미널 문제로 인해 CR 사용자 #3의 신호는 PU 사용자 시스템에 치명적인 간섭 영향으로 작용하게 된다. 다소나마 hidden 터미널 문제를 해결하기 위해 CR 사용자들간의 유기적으로 센싱 정보를 교환하는 프로토콜 구축과 페이딩, 차폐 효과 등의 열악한 채널 환경에서도 PU 사용자에 대한 신호 검출 확률을 높이기 위한 분산 스펙트럼 센싱 방법 등이 강구되어야 할 것이다.

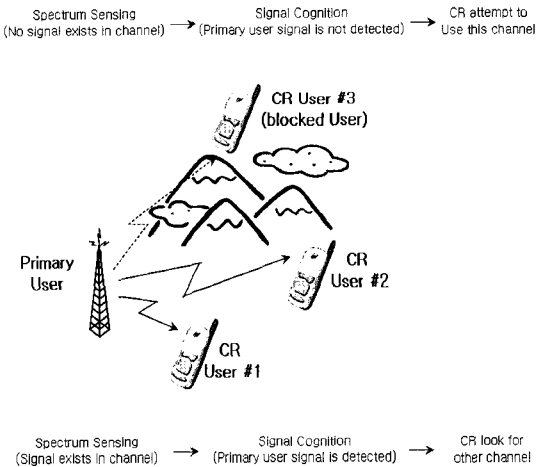


그림 8. 무선 인지 시스템에서 발생하는 hidden 터미널 현상

무선인지 시스템에서 PU사용자의 sensitivity level에 관한 정보를 이용하여 특정 임계값과의 비교를 통해 원래 사용자를 찾아내는 일차원적인 방법으로는 실제 측정된 신호가 PU 사용자 신호 인지 아니면 간섭 신호 인지 또는 잡음 성분 인지의 구분이 불가능하다. 이를 위해 채널 검출 과정에서 얻어진 결과를 기반으로 해당 채널을 점유하고 있는 신호의 특성을 정확하게 인지 및 분류하여 효과적인 미세/특징 신호

검출(fine/feature detection) 과정을 수행하기 위한 신호 처리 방법이 요구되는데, 특징 검출(feature detection) 방법 그리고 PU 신호가 파일럿 신호, 비콘 신호, 그리고 프리앰블 등을 포함하고 있으면 정합 필터를 이용한 방법을 사용하고, 일반적으로 센싱 성능은 다소 낮더라도 센싱 수신기의 복잡성과 처리 속도 측면에서 우수한 성능을 보이는 에너지 검출 방법 등이 주파수 채널의 상태에 따라 결합된 방식으로 센싱 방법이 제시되어야 할 것이다.

## V. IEEE 802.22 WRAN

2003년 12월에 FCC NPRM에서 주파수 공용 사용 가능성이 언급된 이후, 이를 현실적인 시스템으로 개발하려는 노력이 2004년 8월부터 시작되어 2004년 11월에 IEEE 802.22 WRAN 첫 모임을 가졌다. 이에 따라 표 1의 표준화 일정에 맞추어 현재 표준화가 진행되고 있으며, 지금까지 기능 요구 문서(RFD)가 작업되어 2005년 9월 회의에서 승인된 바 있다.

한편, 2005년 11월 회의에서는 RFD의 요구사항을 만족하기 위한 PHY 및 MAC 규격 기고를 접수한 바 있고, 이에 참여하는 다수 기관들 간의 경쟁 및 상호 협력을 통해 단일 규격을 도출하기 위한 표준화 작업 본격적으로 진행될 예정이다.

IEEE 802.22 WRAN의 사용 대상은 유선 인터넷의 설치가 어려운 미국이나 캐나다의 도시 외곽 지역이나 개발도상국이며, 정지 중인 사용자한테 패킷(Packet) 데이터를 전송한다는 측면에서 보면 IEEE 802.22 WRAN의 사용자는 IEEE 802.16의 WiMax에서의 대상과 유사한데, 목표 시장에서 다소 차이가 있다. IEEE 802.22 WRAN은 인구 밀도가 IEEE 802.16 WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)에서 보다 낮은 지역에서 사용된다. 이런 면에서 보면 현재 무선 단말기 제조업체나 무선 통신 사업자들에게는 시장 규모가 현재 사용되고 있는 시장보다 상대적으로 작아서 많은 관심을 끌지 못할 것으로 예상되지만 CR이라는 새로운 개념의 통신 방식이 처음으로 표준화가 진행되고, 이의 개량된 형태가 차세대 무선 통신 기술과 접목하여 사용될 수 있기 때문에 많은 회사들이 관심을 가지고 있다.

표 1. IEEE 802.22 WRAN WG의 표준화 일정

날짜	회의 종류	주요 내용
2004.11.	Plenary	IEEE 802.22 Kick-off meeting Working Group policy and procedures
2005.1.	Interim	Draft Functional Requirements
2005.3.	Plenary	Editing of Functional Requirements
2005.5.	Interim	Editing of Functional Requirements
2005.7.	Plenary	Editing of Functional Requirements
2005.9.	Interim	Functional Requirements 확정 및 Call for Proposals Proposals/Contributions
2005.11.	Plenary	Consolidation/Selection
2006.1.	Interim	WG Draft Standard Process Start
2007.1.		Sponsor ballot
2007.6.		Submittal to RevCom
2008.1.		Final Approval/Publication
2008.12.		Closing

IEEE 802.22의 장점 중의 하나는 현재 사용되고 있는 방송 주파수 대역을 그대로 사용할 수 있다는 점이다. 그러나 BS(Base Station)의 CR 구현을 위한 추가 복잡도, 그리고 VHF 대역을 사용할 경우의 수신기의 안테나 크기 문제, 공용 주파수 사용으로 인한 QoS 등도 고려되어야 할 사항이다.

CR에서 사용되는 기술은 단지 IEEE 802.22뿐만 아니라 다중 채널에 대한 무선 채널에 대한 무선 채널 관리와 분배, 간섭 검출 기술로서 향후 차세대 무선 통신과 연동하여 서로 상호 보완적으로 사용될 가능성이 높다. 예를 들어서 셀룰라 환경에서 발생하는 음영 지역이나 셀의 크기를 키워야 하는 시골 지역에서 CR은 주파수 간섭을 일으키지 않고 효율적으로 고속 데이터를 전송할 수 있는 좋은 대안 기술이다.

## VI. 결 론

무선 스펙트럼 분석은 특정 주파수 환경에서 간섭 및 노이즈 성분을 파악하고 비어 있는 주파수를 검출하는 기술로서 물리 계층의 연구 분야이다. 비어 있는 주파수 검출 기능은 일반적으로 정합필터 방식과 에너지 검출 방식, 연관성(correlation) 방식 등으로 구분되며, 에너지 검출 기능은 분산 방식(spreading)을 이용한 통신 방식에 대한 검출이 용이하지 않기 때문에 연관성을 이용한 검출 방식이 많이 사용된다. 그러나 주파수 선택의 자유도를 증가시키기 위해서는 넓은 주파수 대역을 감시하고 검출하는 것이 필요하며, 이때 이를 구현하기 위한 복잡도가 고려되어야 한다.

CR 기술은 단기적으로 상업성이 매우 낮을 것으로 보이나, 무선 자원이 갖는 자연적인 희소성을 고려할 때 주파수 자원의 활용성을 극대화하는 차원에서 궁극적으로는 모든 무선 통신의 핵심 기술이 될 것으로 예상된다. 또한, 이를 통해 무선 자원의 희소성과 규제로부터 자유로워짐으로써 새로운 형태의 무선통신 기기와 서비스가 개발될 수 있으며, 이는 무선 통신 산업이 성장할 수 있는 새로운 기회를 제공할 수도 있다.

## 참고문헌

- [1] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, Feb. 2005.
- [2] Mitola, "Ph. D dissertation defense materials," *Royal Institute of Technology*, 2000.
- [3] 정재학, 이원철, "Cognitive Radio 기술 동향," *전파지 5·6 전파특집 3*, 2005.
- [4] W. A. Gardner, "signal Interception: A unifying theoretical framework for feature detection," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 36, no. 8, pp. 897-906, Aug. 1988.
- [5] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," *Proc. IEEE Asilomar Conf. Signals, Syst. & Computers 2004*, vol. 1, pp. 772-776, Pacific Grove, USA, Nov. 2004.
- [6] Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless

- Communications," *IEEE J. on Select. Areas in Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [7] J.Mitola III and G.Q. Maruire Jr, "Cognitive radio: making software radios more personal", *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18. Aug. 1999.
- [8] J.Mitola III, "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications", *Mobile Multimedia Communications, IEEE International Workshop*, pp. 3, 1999.
- [9] D. Cabic, "A cognitive PHY/MAC paradigm for spectrum sensing, allocation and control," Nov. 2004.

### 저자소개

#### 이 상 현



2005년: 목원대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학사)  
2005년~현재: 목원대학교 IT공학부 석사과정  
※관심분야: 멀티미디어 통신, Cognitive Radio, 무선통신 시스템

#### 강 희 조



1994년: 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과 졸업(공학박사)  
1996년 8월~1997년 8월: 오사카대학교 공학부 통신공학과 객원교수  
1990년 3월~2003년 2월: 동신대학교 전자정보통신공학부 교수  
2003년 3월~현재: 목원대학교 컴퓨터공학부 조교수  
※관심 분야: 멀티미디어 통신, 유비쿼터스, 텔레메틱스, 무선통신, 가시광통신, 이동통신 및 위성통신, 환경전자공학, 무선광통신, 디지털콘텐츠, RFID