

Cognitive Radio 성능 향상을 위한 전이중 통신기술

김 준 수

한국산업기술대학교 전자공학부

I. 서 론

주파수 자원을 매체로 사용하는 전통적인 무선통신 시스템은 무선 채널의 개방성으로 인해 발생할 수 있는 혼선과 혼신의 문제를 극복하기 위해 통신 객체별로 독립적인 주파수 자원을 독점적으로 할당하였다. 그러나 무선통신 서비스에 대한 수요가 폭발적으로 증가하면서 주파수 자원에 대한 수요 또한 동시에 증가하게 되었고, 기존의 배타적인 주파수 할당으로 인한 주파수 자원의 고갈 문제가 발생하고 있다. 이는 차세대 이동통신 시스템을 위해 우선적으로 해결해야 할 문제로 인식되고 있다.

이러한 주파수 자원 고갈 문제를 해결하기 위한 노력은 크게 두 방향으로 진행되고 있다. 즉, 신규 주파수 대역의 확보와 기존 주파수의 효율적 재사용이다. 신규 주파수 대역의 확보는 이전에 사용하지 못했던 초고주파 영역, 즉 밀리미터 웨이브 대역을 활용하는 기술 개발에 초점이 맞춰져 있으며, 기존 주파수의 효율적 재사용은 주파수 재분배와 주파수 공동 사용이라는 방향으로 추진되고 있다.

본 논문에서 다루는 CR(Cognitive Radio), 즉 인지무선기술은 주파수 공동 사용을 위한 대표적인 기술이라 할 수 있다. CR은 특정 대역을 우선적으로 사용하는 주 사용자(primary user)에 해를 끼치지 않는 한도 내에서, 혹은 주 사용자가 허용하는 한도 내에서 2차 사용자(secondary user)에 대역을 개방해 주파수 사용 효율을 극대화할 수 있는 기술이다^[1].

한편, 무선통신 분야의 주요 이슈로 전이중(Full Duplex) 통신기술에 많은 연구자의 관심이 집중되고 있다. 전이중 통신이란 동일한 주파수 대역에서 수신과 송신이 동시에 이루어지는 통신을 의미한다. 일반적으로 전파의 방사특성을 갖는 무선 통신시스템의 경우, 송신 안테나에서 방사된 전파가 자신의 수신 안테나에 되돌아 들어와 간섭(interference)으로 작용하여 원활한 수신을 방해하기 때문에, 수신과 송신을 시간적으로 구분하는 반이중(Half Duplex) 통신방식을 사용

한다. 그러나 전송효율을 극단적으로 높이기 위해서는 반이중 통신으로 발생하는 전송효율 저하를 극복해야만 한다. 이를 위해 동일 단말의 수신회로와 송신회로의 전기적 혹은 논리적 격리(isolation)를 통한 전이중 통신기술의 연구가 활발히 진행되고 있다.

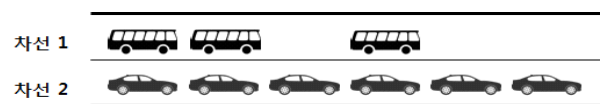
최근 전이중 통신기술을 CR에 적용하여 시스템의 성능을 극대화하기 위한 연구가 진행되고 있다. 본 논문은 CR 분야의 새로운 연구 분야로 떠오르고 있는 전이중 통신과 CR 기술과의 융합에 관련된 주요 기술을 소개하고, CR 시스템의 성능을 극대화하기 위한 방안을 모색한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문의 주요 이슈인 CR과 전이중 통신에 대해 소개한다. III장에서 전이중 통신 기술이 적용된 CR 시스템의 구조를 소개하고, 이를 통해 얻을 수 있는 이득과 향후 진행해야 할 연구 주제에 대해 논한 뒤 IV장에서 결론을 언급하는 것으로 본 논문을 마무리한다.

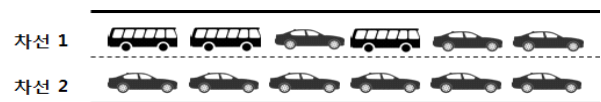
II. 배 경

2-1 인지무선(CR) 기술

[그림 1]과 [그림 2]는 CR 기술의 개념을 간략하게 도식화한 것이다.



[그림 1] 전용 차선이 지정된 고속도로.



[그림 2] 차선이 개방된 고속도로.

[그림 1]은 전용 차선이 지정된 고속도로의 예이고, [그림 2]는 차선이 개방된 고속도로의 예를 나타낸다. [그림 1]에서 차선 1은 버스에게, 차선 2는 승용차에게 고정적으로 할당된 차선이다. [그림 1]에서 차선 2는 과밀화된 반면, 차선 1은 일부 비어있는 것을 알 수 있다. 이는 현재 고속도로가 충분히 활용되지 못하고 있음을 의미한다.

반면, [그림 2]의 상황은 차선 1과 2를 개방하여 승용차도 1차선을 이용할 수 있도록 한 것이다. 따라서 1차선에 버스가 없는 경우, 승용차가 사용할 수 있다. 결과적으로 그림 1에 비해 전체 고속도로에서 통행할 수 있는 차량의 수가 많아진다. 즉, 도로의 활용 효율이 증가된 것이다.

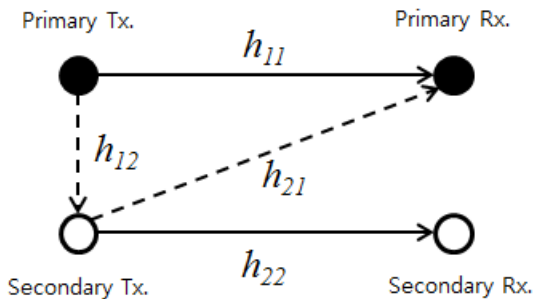
[그림 1]과 [그림 2]의 각 차선은 무선통신의 주파수 채널을 나타내며, 고속도로 상의 자동차는 무선 데이터를 의미한다. 기존의 배타적인 통신 방식은 [그림 1]과 같다. 서로 다른 채널을 사용하는 통신 시스템은 자신에게 할당된 채널 이외의 채널을 사용할 수 없도록 엄격히 규제된다. 따라서 자신의 채널이 과밀하더라도 인접 채널을 사용할 수 없다. 이때 CR은 [그림 2]와 같이 채널 간 장벽을 낮추어, 일시적으로 자신의 채널을 다른 시스템이 사용할 수 있도록 허용하는 기술이다. CR은 기본적으로 각 채널의 주 사용자, 즉 1차선의 버스, 2차선의 승용차에게 우선적으로 자신의 채널을 사용할 권리를 부여하고, 2차 사용자, 즉 1차선의 승용차, 2차선의 버스에게 일시적인 채널 사용권을 부여한다. 이때 2차 사용자는 주 사용자를 방해해서는 안 된다.

이러한 CR 개념을 실현하기 위한 구체적인 기술은 오버레이(overlay) 방식과 언더레이(underlay) 방식으로 구체화할 수 있다¹⁾.

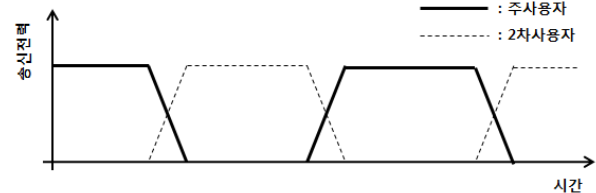
- 오버레이(Overlay) CR: 2차 사용자는 주 사용자의 활성화도, 즉 채널 사용 여부를 판단하여 주 사용자가 채널을 사용하지 않을 경우 채널을 사용한다. 이를 위해 2차 사용자는 항상 주 사용자를 관찰해야 하며, 이를 주파수 검출(spectrum sensing)이라 한다. [그림 3]은 일반적인 CR 모델을 나타낸다. 그림에서 검정색 두 점은 주 사용자 송신단과 수신단을 나타내며, 흰색 두 점은 2차 사용자

자의 송신단과 수신단이다. 실선은 데이터 신호를, 점선은 간섭을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, CR 객체 사이에 네 개의 주요한 채널이 형성된다. 채널 h_{12} 는 주 사용자 송신단과 2차 사용자 송신단 사이의 채널로 2차 사용자가 주 사용자의 채널 사용 여부를 판단하는 채널이다. 즉, 주파수 검출 채널(sensing channel)로 2차 사용자 송신단은 h_{12} 를 통해 수신되는 신호의 세기를 지속적으로 관찰하여 주 사용자가 현재 채널을 사용하는지 여부를 판단한다.

오버레이 CR의 경우, 주 사용자가 채널을 사용하지 않는다고 판단된 경우에만 2차 사용자 송신단이 데이터를 전송할 수 있다¹⁾. 이때 채널 검출 오류로 인해 주 사용자가 채널을 사용 중임에도 불구하고, 2차 사용자 송신단이 데이터를 전송하면 채널 h_{12} 을 통해 주 사용자에게 간섭을 야기하게 된다. 따라서 주파수 검출을 위한 채널 h_{12} 에 따라 주 사용자 보호와 2차 사용자 전송효율이 영향을 받는다. [그림 4]는 이상적인 오버레이 CR의 동작



[그림 3] CR 모델.



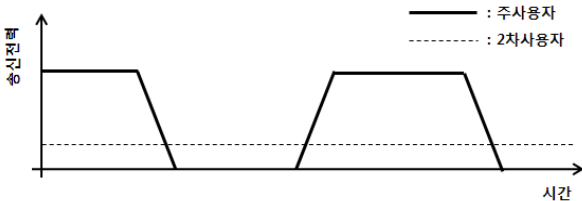
[그림 4] 오버레이 CR 동작 모델.

1) 주 사용자가 사용하지 않는 주파수 대역의 빈 공간을 스펙트럼 홀 (spectrum hole)이라 한다. 주파수 검출의 목표는 스펙트럼 홀을 정확히 찾는 것이다.

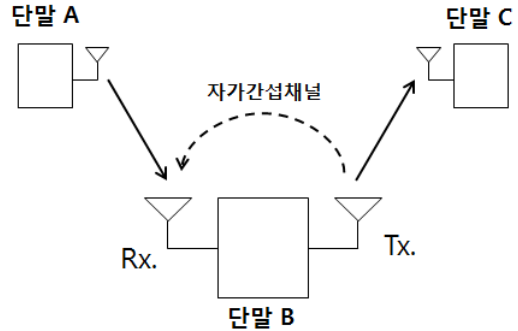
을 나타낸다. 즉, 주 사용자의 채널 사용 여부를 정확히 알아내 2차 사용자가 채널을 사용함으로써 주파수 공유 효율을 극대화하는 것이다.

- 언더레이(Underlay) CR: 오버레이 모델은 주파수 검출 성능에 많은 영향을 받는다. 또한 주 사용자의 활성도가 높은 경우, 즉 주 사용자가 채널을 장시간 점유하는 경우 2차 사용자의 전송 기회가 매우 낮아지는 문제를 가지고 있다. 따라서 언더레이 CR은 2차 사용자가 주 사용자와 동시에 채널을 사용할 수 있도록 하는 동시에 2차 사용자에게 의해 발생하는 간섭을 일정값 이하로 유지하도록 하는 방식이다. 2차 사용자가 주 사용자와 동시에 데이터를 전송하면 [그림 3]에서 간섭채널 h_{12} 이 형성된다. 따라서 2차 사용자는 자신의 전송전력을 조절하여 채널 h_{12} 을 통해 주 사용자 수신단에 도착하는 간섭량이 미리 정해진 허용간섭량²⁾ 이하에 머물도록 해야 한다. [그림 5]는 언더레이 CR의 개념적인 동작을 나타낸다. [그림 4]에 비해 낮은 전력이지만, 주 사용자의 채널사용 여부와 상관없이 전송할 수 있는 특징을 가지고 있다. 그러나 언더레이 CR이 정상적으로 동작하기 위해서는 채널 h_{12} 의 정보를 2차 사용자 송신단이 알아야 한다. 이는 주 사용자 수신단에서 측정하여 2차 사용자 송신단에게 보고하는 방식을 사용할 수 있으나, 주 사용자 시스템에 지나치게 많은 협력을 요청하는 것으로 현실적인 구현 가능성은 다소 낮다. 따라서 언더레이 CR은 사용될 수 있는 시나리오는 오버레이 방식에 비해 다소 제한적이다.

2-2 전이중(FD) 기술



[그림 5] 언더레이 CR 동작 모델.



[그림 6] 전이중 통신의 구조.

전이중 통신 기술의 개념을 [그림 6]에 표시하였다. [그림 6]에서 단말 A는 단말 B에 데이터를 전송하려 하고 단말 B는 단말 C에 데이터를 전송하고자 한다. 이때 두 데이터는 서로 같을 수도 혹은 다를 수도 있다. 이런 상황에서 기존의 통신 방식은 반이중 방식으로 시간을 두 개의 슬롯으로 나누어 첫번째 슬롯에서는 A에서 B로 데이터를 전송하고, 두번째 슬롯에서는 B에서 C로 전송하도록 한다. 이 경우, A~B 링크와 B~C 링크가 시간적으로 분리되므로 상호간의 간섭이 발생하지 않는 반면, 전체 시간을 두 조각으로 나뉘어야 하므로 전송 효율이 약 절반으로 줄어든다.

그러나 전이중 통신을 사용하면 A~B 링크와 B~C 링크가 동시에 활성화된다. 즉, 단말 B는 A로부터 데이터를 받으면서 동시에 C로 데이터를 송신한다. 하나의 단말 B에 집적된 송신단과 수신단이 동시에 활성화됨에 따라 [그림 6]에서와 같이 송신단에서 출발한 신호의 일부가 수신단으로 돌아 들어오게 되는데, 이는 단말 A로부터 수신한 신호의 관점에서 정상적 수신을 방해하는 자가간섭(self-interference)이 된다. 따라서 전이중 통신은 반이중에 비해 수신과 송신의 시간을 나누지 않으므로 시간적 측면에서 전송 자유도가 증가하는 반면, 자가간섭에 의해 SINR(Signal-to-Interference-and-Noise Ratio)이 감소한다. 따라서 전이중 통신을 통한 전체 전송률 증가 여부는 자가간섭을 얼마나 제거할 수 있는지 여부의 문제와 동일하다. 최근 아날로그 및 디지털 영역에서의 자가간섭 제거 기술이 활발히 연구되고 있어, 수년

2) 이를 간섭온도(Interference temperature)라 한다.

내 실용화 가능할 것으로 예상된다²⁾.

III. 전이중 인지무선 시스템

3-1 LAT 프로토콜

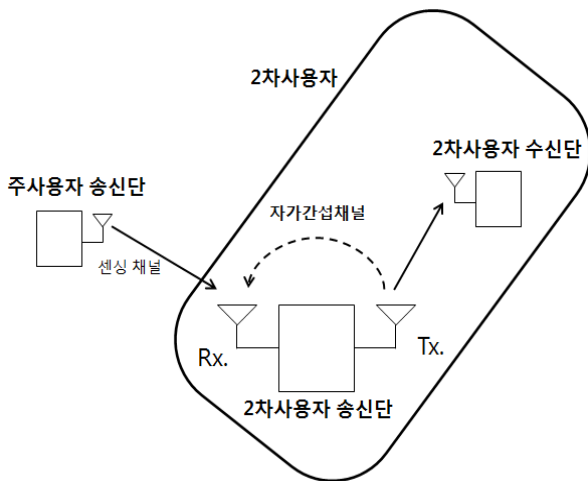
앞서 소개한 오버레이 CR 기술에 전이중 통신 방식을 적용한 것으로 LAT(Listen-And-Talk)라는 방식이 제안된 바 있다^{3),4)}.

[그림 7]은 LAT의 동작모델을 나타낸다. LAT는 2차 사용자 송신단이 전이중 통신이 가능한 경우 적용할 수 있다. 즉, 2차 사용자 송신단의 수신안테나는 주 사용자의 채널 사용 여부를 판단하기 위한 주파수 검출 용도로 활용하고, 동시에 송신안테나를 이용해 2차 사용자 수신단에 데이터를 전송하는 것이다. 기존의 반이중 오버레이 CR과의 차이는 전이중 기능을 이용해 주파수 검출과 데이터 전송을 동시에 수행하는 것이다. LAT 알고리즘이 이상적으로 동작하는 경우 다음과 같은 두 가지 이득을 얻을 수 있다.

첫째, 주 사용자의 채널 사용 여부를 연속적으로 관찰할 수 있기 때문에 검출 정확도를 높여 주 사용자 보호 및 전송 효율 극대화를 달성할 수 있다. 반이중 방식의 오버레이 CR

에서는 시간을 슬롯으로 나누고, 각 슬롯의 시작부에서 주파수 검출을 실시한다. 검출 결과, 주 사용자가 채널을 사용하지 않는다고 판단한 경우, 슬롯의 남은 시간동안 데이터를 전송한다. 이러한 동작을 매 슬롯 반복하게 되므로 주파수 검출은 최소 한 슬롯 단위로 이루어진다. 따라서 LAT를 활용하는 경우, 슬롯에 상관없이 연속적으로 주 사용자 활성도를 관찰할 수 있기 때문에 검출 정확도가 향상된다. 두번째는 주파수 검출을 위한 별도의 안테나를 활용하므로 데이터 전송 효율이 증가한다는 점이다. 즉, 한 슬롯 내에서 주파수 검출을 위해 별도의 시간을 할당할 필요가 없기 때문에 전 슬롯을 데이터 전송에 활용하여 전송율을 극대화할 수 있다.

그러나 모든 전이중 통신 방식이 갖는 자가간섭의 문제가 LAT에서도 발생한다. 즉, 2차 사용자 송신단이 데이터를 전송하는 경우, 그 신호의 일부가 데이터 검출에 사용되는 수신안테나에 간섭으로 되돌아온다. 따라서 주 사용자 검출을 위한 신호의 성능이 저하되므로 자연스럽게 검출 정확도가 떨어질 수 있다. 이 부분에서 2차 사용자 송신단의 송신 전력에 따른 트레이드오프 관계를 생각할 수 있다. 즉, 2차 사용자 송신단의 송신전력을 높이면 2차 사용자 전송효율이 올라가는 반면, 자가간섭이 커져 주파수 검출 정확도가 떨어진다. 주파수 검출 정확도가 떨어졌을 때 발생할 수 있는 시나리오는 두 가지이다. 즉 주 사용자가 채널을 실제로 사용하고 있는데 사용하지 않는 것으로 잘못 판단하여 2차 사용자가 데이터를 송신하는 경우³⁾와 주 사용자가 실제로는 채널을 사용하고 있지 않지만 사용하는 것으로 판단하여 2차 사용자도 데이터를 전송하지 않는 경우⁴⁾이다. 전자의 경우 주 사용자를 보호하지 못하는 경우이고, 후자의 경우, 아무도 채널을 사용하지 않아 전송효율이 저하되는 경우이다. 결국 전이중 통신으로 인한 자가간섭은 전송효율과 주 사용자 보호 사이의 상보적 관계를 만든다. 따라서 상황에 따라 최적의 2차 사용자 전송전력이 존재할 가능성이 있다. 최근에 진행된 몇몇 연구에서 2차 사용자의 전송효율과 주 사용자 보호를 동시에 고려한 시스템 성능을 최적화하는 2차 사용자 송신전력이 존재함을 보인 바 있다^{3),4)}.



[그림 7] LAT 동작모델.

3) 오검출(mis-detection)이라 한다.

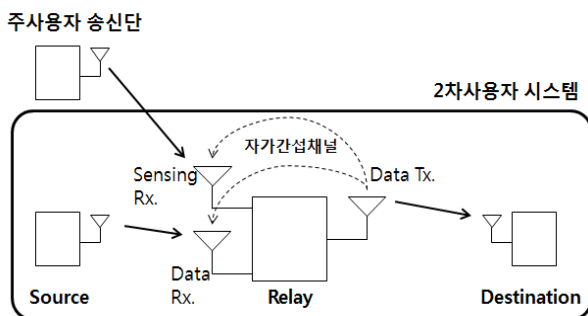
4) 오경보(false-alarm)라 한다.

3-2 전이중 CR 기술의 응용

앞서 살펴본 바와 같이, CR 시스템에 전이중 기술을 적용하면 연속적인 주파수 검출과 데이터 전송시간의 확대라는 순기능과 자가간섭에 의한 주파수 검출 오류의 가능성이라는 역기능을 함께 얻게 된다. 따라서 응용 시나리오와 자가간섭채널의 환경에 따라 적응적으로 활용하면 성능 개선을 달성할 수 있다. 전이중 CR을 적용해 성능을 개선할 수 있는 대표적인 응용 서비스를 살펴보면 다음과 같다^[2].

- 분산형 스펙트럼 액세스 시스템: 동일한 주파수 대역을 사용하는 다중 노드들이 상호간에 제어 신호를 주고받지 않고, 분산적으로 공유 주파수를 통해 데이터를 전송하는 경우, 앞서 제안한 LAT 프로토콜을 적용할 수 있다. 대표적인 시나리오는 분산형 센서 네트워크를 들 수 있다. 저전력 센서 노드들이 넓은 지역에 무작위적으로 분포하면서 간헐적으로 센싱 데이터를 전송하고자 하는 경우, 이동통신 시스템과 같이 중앙 집중적인 제어가 비효율적일 수 있다. 따라서 이러한 경우, 전이중 CR 기법을 응용하면 효율적인 분산형 스펙트럼 액세스 시스템을 구성할 수 있다.
- 전이중 CR기반 중계 시스템: 협력형 중계 시스템은 반이중 통신에 의해 전송 효율이 저하되는 대표적인 시스템이다.

[그림 8]은 전이중 CR기반 중계 시스템의 구조를 나타낸다. 2차 사용자 시스템으로 나타낸 중계 시스템에서 relay는 두 개의 수신 안테나와 하나의 송신 안테나를 가지고 있다. 이때 수신 안테나는 각각 주파수 검출과 source로부터 데이터를 수신하는 용도로 할당하였다. 이 모델에 LAT를 적용



[그림 8] 전이중 CR기반 중계 시스템.

하면 2차 사용자 시스템의 데이터 전송률을 향상시킬 수 있다. 그 이득은 두 가지 측면으로부터 얻을 수 있다. 첫째, LAT를 통한 주파수 검출 정확도 향상에 따른 주파수 이용 효율의 향상이다. 두 번째는, 전이중 방식의 중계를 통해 기존의 중계 시스템이 가지고 있던 전송 자유도 저하 문제를 어느 정도 극복할 수 있다는 것이다. [그림 8]과 같은 시나리오 역시 relay의 전송 전력에 따른 상보 관계가 형성되어 환경에 따른 최적 전송전력이 존재한다.

IV. 결 론

현재 4세대(4G) 이동통신 시스템이 상용화되고, 5G 이동통신 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 5G 이동통신 시스템은 기존의 시스템보다 1,000배 높은 전송 용량을 목표로 하고 있다. 이는 쉽게 달성 가능한 수치가 아니다. 특히 목표 달성을 어렵게 하는 가장 큰 장애 요인은 주파수 자원의 고갈이다. 많은 연구자들은 주파수 자원의 고갈을 해결하기 위한 핵심 기술로 인지무선 기술을 주목하고 있다. 뿐만 아니라, 기존에는 기술적 한계로 구현하지 못했던 전이중 통신 기술에 대한 연구 역시 활발히 진행되어 수년 내 구현 및 상용화가 가능한 수준에 이르고 있다. 따라서 향후 이동통신 기술 분야에서 인지무선과 전이중 통신기술은 가장 중요한 두 키워드로 자리 잡을 것이다.

본 논문에서는 그동안 학계에서 논의된 인지무선과 전이중 통신 기술의 융합 가능성과 주요 응용 기술에 대해 살펴보았다. 수학적이고 이론적인 부분은 일부 제외하고 개념적으로 접근하였으나, 두 기술의 융합이 전송률 향상에 크게 기여할 수 있음을 확인하였다. 앞으로 남은 과제는 전이중 통신 기술이 근본적으로 가지고 있는 자가간섭 제거 기술에 대한 연구를 통해 전이중 CR 시스템을 구체화하고 현실화하는 것이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.

- [2] X. Zhang, W. Cheng and H. Zhang, "Full-duplex transmission in phy and mac layers for 5G mobile wireless networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 112-121, Oct. 2015.
- [3] Y. Liao, L. Song, Z. Han and Y. Li, "Full duplex cognitive radio: A new design paradigm for enhancing spectrum usage", *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 5, pp. 138-145, May 2015.
- [4] Y. Liao, T. Wang, L. Song and Z. Han, "Listen-and-talk: Full-duplex cognitive radio networks", *2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, TX*, pp. 3068-3073, 2014.

≡ 필자소개 ≡

김 준 수



2001년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학사)

2003년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학석사)

2009년 1월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학박사)

2011년 9월~현재: 한국산업기술대학교 전자공

학부 부교수

[주 관심분야] Radio Resource Management, Cognitive Radio