무선통신과 레이다 간의 주파수 공유 기술 및 연구동향

김 동 환 · 정 방 철

충남대학교

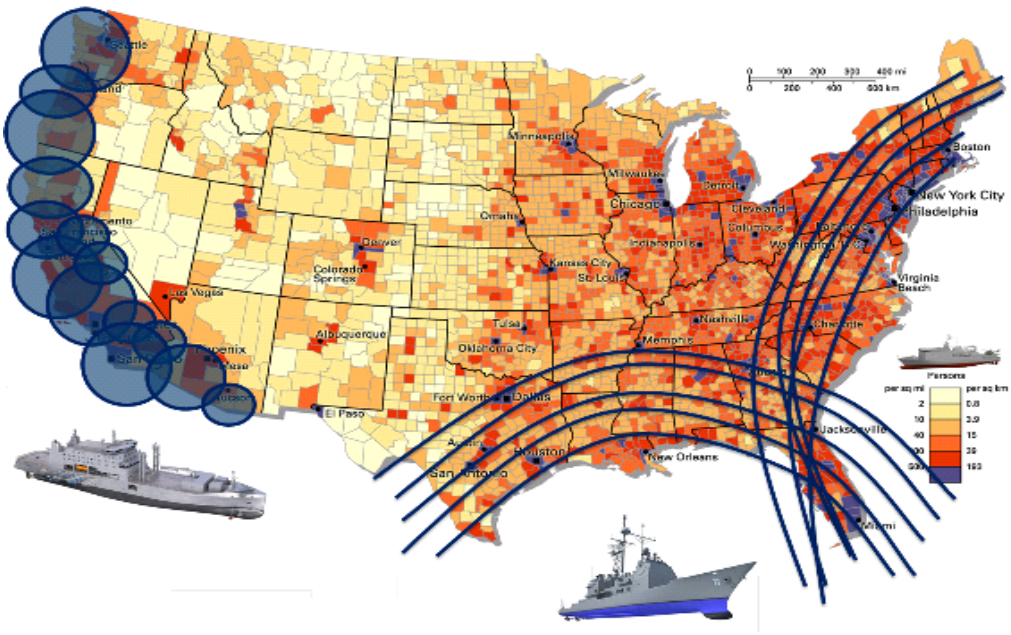
Ⅰ. 서 론

무선 주파수 스펙트럼은 감시/정찰, 관측, 항법, 통신 및 방송 등을 포함한 많은 서비스에 이용되는 매우 중요하지만 희소한 자원이다. 그런데, 최근 5G 등을 포함한 무선통신 기술의 급격한 발전과 스마트폰 및 태블릿 PC 등으로 대표되는 이동 가능한 통신 및 데이터 단말기 등의 급속한 보급으로 상용에서 사용주인 무선 주파수 스펙트럼의 부족 현상이 심화되고 있다. 반면에, 현재 사용 중인 주파수 스펙트럼의 사용 실태를 보면 도심 지역에서 조차도 정부가 사용중인 주파수 스펙트럼 대역은 충분히 활용되고 있지 않다. 특히, 미국 주파수 스펙트럼 규제 기관인 연방통신위원회(FCC)와 정보통신국(NTIA)의 근래 연구에 따르면 도심 지역에서 연방 정부가 사용하고 있는 주파수 대역은 낮은 이용률을 보이는 반면, 이동통신을 포함한 상용에서 사용 중인 주파수 대역은 더 이상 여유가 없을 정도로 이용 중임을 보였다[1],[2].

위와 같은 현상으로 말미암아 상용 무선통신 운용자측은 지속적으로 연방정부가 사용 중인 주파수 대역을 줄이거나 공유하도록 제안하고 있고, 이에 따라 FCC와 NTIA는 현재 연방정부에 할당되어 사용 중인 3,550~3,650 MHz 주파수 대역을 효율적으로 사용하기 위하여 상용 무선통신 사업자와 함께 공유하는 것을 제안하였다[3]. 이 주파수 대역은 국가 방위에 중요한 해상, 지상 및 항공기 탑재 군용 레이다 시스템에서 주로 사용되고 있다. 희소한 자원인 주파수 스펙트럼을 효율적으로 사용하는 측면과 경제 및 사회적인 측면을 고려할 때 주파수 대역을 공유하는 것은 필수불가결하다. 하지만, 레이다와 무선통신 시스템 사이에 주파수 공유 시험결과, 서로 간의 해로운 간섭으로부터 각각의 시스템을 보호하기 위해서는 물리적으로 상당히 먼 거리가 떨어져 있어야 함을 보였다[4]. [그림 1]은 레이다와 WiMAX 시스템 사이에 서로에게 미치는 해로운 간섭으로부터 두 시스템을 보호하기 위해 요구되는 물리적인 거리를 보여준다. 이렇게 상당한 물리적인 거리가 필요한 이유는 송수신 전력 측면에서 무선 통신시스템은 상대적으로 레이다 시스템에 비해 낮은 전력을 다루기 때문에 레이다 시스템의 높은 송신 전력과 부엽 준위로부터 무선 통신시스템의 수신기 포화를 방지하고 또한, 수백에서 수천 km 거리에서 되돌아오는 레이다의 수신신호를 탐지하기 위해 레이다의 수신기는 매우 민감하기 때문에 통신시스템으로부터 들어오는 간섭을 최소화하기 위함이다. [그림 1]에서 보여지는 상호 배타구역은 높은 전력의 WiMAX 기지국 대신에 저전력의 이동통신 기지국 등을 전개하는 등의 방식으로 어느 정도 줄일 수는 있지만, 미 대륙 전체로 보면 여전히 상당한 상호 배타구역이 필요하다[5]. 따라서 이러한 접근 방식으로는 상호 배타구역을 완전히 제거할 수 없으므로, 상당한 물리적인 보호구역 없이 레이다와 무선 통신시스템 사이에 주파수 스펙트럼 공유를 위해서는 새로운 방법이 필요하다. 그에 따라 무선통신 시스템과 레이다 시스템 사이의 주파수 공유 기술은 최근 매우 중요한 연구 및 개발 분야가 되었으며, 특히, 6 GHz 이하 대역에서 운용 중인 레이다는 무선통신 시스템과 비슷한 주파수 대역을 공유하고 있어 레이다 및 무선통신 시스템 관련 커뮤니티에서 물리적인 보호구역 없이 비슷한 영역에서 주파수 공유를 위한 많은 연구들이 이루어지고 있다.

따라서 본 논문에서는 주파수 공유 기술이 무엇인지, 어떠한 과정을 통해 주파수 공유가 이루어지는지에 대한 개념에서부터 레이다와 무선통신 시스템 사이에 주파수 스펙트럼을 공유하기 위해 필요한 고려사항이 무엇이고, 과거 초

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019-0-00964-001, 스펙트럼 챌린지를 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발).



[그림 1] 간섭으로부터 레이다와 WiMAX 시스템을 보호하기 위해 요구되는 exclusion zones[5].

기의 주파수 공유기술에서부터 현재 진행되고 있는 주파수 공유 관련 기술을 알아보고, 앞으로 어떠한 연구들이 진행될지 관련 연구동향에 대해 살펴보고자 한다.

Ⅱ. 주파수 공유기술 개요

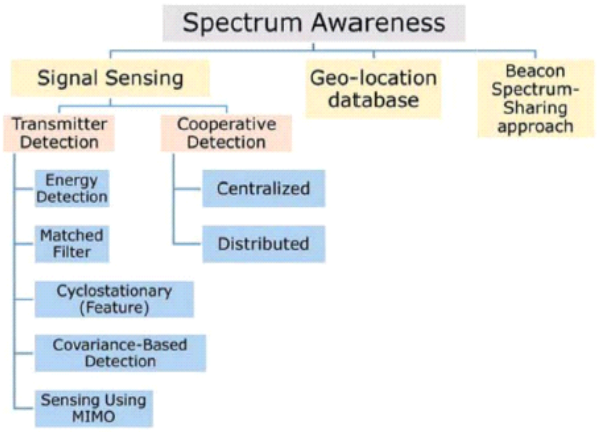
주파수 공유는 독점적으로 스펙트럼 대역을 할당받은 즉, 주 사용자(Primary User)의 주파수 대역을 제2의 다른 사용자(Secondary User)가 서로에게 미치는 해로운 간섭 없이 같은 주파수 대역을 사용하는 것을 의미한다. 과거에는 레이다나 무선통신 시스템과 같이 전파를 이용하는 시스템은 서로에게 미치는 간섭을 막는 것이 매우 중요했기 때문에 주파수 스펙트럼을 공유하기 보다는 독점적으로 할당받아 사용하였다. 그러나, 최근 무선통신 기술 및 인지 무선(Cognitive Radio) 기술의 급격한 발전과 주파수 스펙트럼 관련 규제가 유연해짐에 따라 동일한 시간 및 공간에서 주파수 스펙트럼 공유가 점점 현실화되어 가고 있다[6]~[8].

주파수 공유 기술은 크게 무선 환경을 감지하는 스펙트럼 인지(Spectrum Awareness) 과정과 어떠한 방식으로 사용하고자 원하는 주파수 대역에 접속할 것인가에 대한 스펙트럼 접속(Spectrum Access) 과정으로 구분된다[9].

2-1 스펙트럼 인지(Spectrum Awareness) 기술

스펙트럼 인지란 스펙트럼을 사용하고 있는 다른 사용자에 관하여 알기 위하여 주변 무선 환경에 관한 정보를 획득하거나 감지하는 일련의 과정이다. [그림 2]는 공통으로 쓰이는 스펙트럼 인지 기술의 예를 보여준다.

신호 검파(Signal Sensing) 스펙트럼 인지기술은 주파수 스펙트럼에 탐지 가능한 신호가 존재할 때 그 신호를 수신



[그림 2] 공통의 스펙트럼 인지기술의 예[9]

하고, 처리하여 관심 있는 대역의 신호인지를 알아내는 기술로써 비협력 탐지기술인 송신기 탐지(Transmitter Detection) 기술과 협력 탐지(Cooperative Detection) 기술의 두 가지 형태로 구분할 수 있다.

송신기 탐지 기술은 에너지 탐지(Energy Detection) 방법, 정합 필터(Matched Filter) 방법, 주기적 정상성(Cyclostationary) 방법, 공분산(Covariance) 탐지 기법, 다중 안테나(MIMO)를 사용한 검파 방법으로 분류할 수 있다[10].

1) 에너지 탐지 방법은 관심 대역 내에서 수신된 에너지를 사전에 정의된 임계값과 비교하여 채널의 상태를 판단하는 방식으로, 이 방식은 송신된 신호의 사전 정보 없이 적용 가능한 반면, 낮은 SNR 상태에서는 잡음과 주변에서 수신되는 입력 신호와의 구분이 어려워 잘 동작하지 않는 문제가 있다.
2) 정합 필터 방식은 송신된 신호의 특성을 사전에 알고 있다면 수신된 신호와의 상관(Correlation)을 통해 신호의 존재 유무를 판단하는 방식으로 짧은 검파 시간과 낮은 SNR 상황에서도 잘 동작하는 장점이 있는 반면, 주 사용자의 송신된 신호의 특성에 대한 추정이 정확하지 않다면 성능 저하가 발생한다.
3) 주기적 정상성 검파방법은 수신된 변조 신호를 정현파 캐리어(sine-wave carriers), 펄스 열(pulse trains), 호핑 시퀀스(hopping sequence), 주기적 전치 부호(cyclic prefixes) 등과 같이 주기성을 가진 신호와의 상관을 통해 신호의 존재 유무는 물론 대상 신호를 식별하는데 사용된다. 이 방법은 잡음에 강인한 특성으로 인해 수신된 신호를 잡음과 구별하는 성능 면에서 에너지 검파 방법보다 우수한 반면, 계산이 복잡하고, 정합 필터 방식과 에너지 검파 방법에 비해 신호를 검출하는데 오랜 시간이 요구된다.
4) 공분산 탐지 기법은 주 사용자 신호의 파형, 잡음 전력, 반송파 등 어떠한 정보도 이용이 불가할 때 주 사용자 신호를 검출하는데 사용 가능한 블라인드 스펙트럼 감지(Blind Spectrum Sensing) 기법 중 하나이다. 이 기법은 수신 신호와 시간 지연이 없는 신호와의 상관을 가지고 수신 신호와 시간 지연이 있는 신호와의 상관의 비교를 통해 신호의 존재 유무를 파악한다. 이 방법은 잡음 분산에 대한 사전 정보 없이 적용 가능하여 잡음 전력의 불확실성에 강인하다.
5) 다중안테나를 사용한 검파 방법은 스펙트럼을 인지하는 장치가 다중 안테나를 구비하고 있다면 고유치 기반 탐지(Eigen-based Detection) 방법을 통해 신호 검출이 가능하다.

협력 탐지 기술은 지리적으로 분산되어 있는 여러 센서들의 스펙트럼 측정결과를 공유하여 신호의 존재 유무를 판별하는 기술로써 다른 여러 센서로부터 모아진 정보를 중앙에서 처리하여 신호의 검출을 판단하면 중앙 집중(Centralized) 탐지 방식이라고 하고, 여러 센서들 사이에서 모아진 스펙트럼 측정결과 정보를 서로 공유는 하지만 신호의 존재 유무는 각각의 장치가 스스로 결정하면 분산(Distributed) 탐지 방식이라고 한다. 분산 탐지 방식이 복잡도 측면이나 신뢰도 및 강인성 측면에서의 장점으로 중앙 집중 방식보다 좀 더 현실적이고 더 많은 관심을 받고 있다[11].

다른 스펙트럼 인지 기술은 주 사용자에 관한 정보를 담고 있는 지리위치정보(Geo-location) 데이터베이스를 이용하는 것이다. 특히, 이 방법은 위치가 고정되어 설치된 레이다 시스템과 같이 고정된 위치를 갖는 시스템에 유용하며, 인지 장치(Cognitive Device)는 지리적 위치 정보를 얻기 위해 GPS와 같은 지리위치정보 획득 시스템이 구비되어 있어야 한다[11].

마지막으로 비콘 스펙트럼 공유(Beacon spectrum-sharing) 접근방식은 부 사용자가 주 사용자가 사용하고 있는 스펙트럼에 접속하고자 할 때는 스펙트럼 공유가 허용된 주기 동안에 주 사용자 시스템에 의해 보내진 특정 통제 신호(Beacon Signal)를 수신한 이후에만 접속이 가능하다. 즉, 이 비콘 신호의 수신 없이는 부 사용자 시스템은 송신을 시작해서는 안된다. 또한, 접속 중에도 비콘 신호의 수신이 멈추면, 접속을 중단해야 한다[11].

2-2 스펙트럼 접속(Spectrum Access) 방법

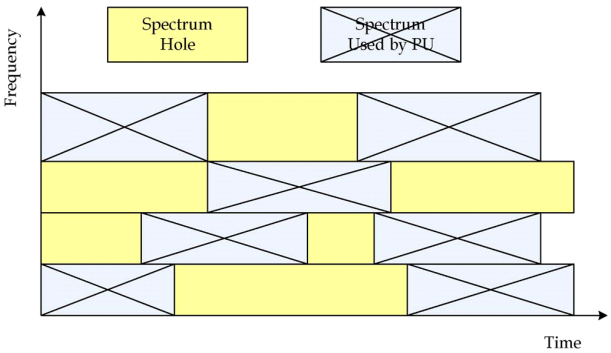
스펙트럼 접속 방식은 크게 주 사용자가 일시적으로 혹은 주기적으로 할당받은 대역을 사용하지 않을 때 부 사용자가 접속해서 사용하는 즉, 기회주의적인 방식(Opportunistic

manner)의 기회주의적 스펙트럼 접속(Opportunistic Spectrum Access, 이하 OSA) 방식과 주 사용자와 부 사용자가 공정한 방식(Fair manner)으로 각 시스템의 수신기에서 다른 시스템으로부터 들어오는 간섭신호가 미리 설정한 특정 임계값 아래로 발생하게 하거나, 혹은 서로에게 미치는 간섭을 경감시키는 새로운 알고리즘을 적용하여 항상 동시에 접속 가능하도록 하는 동시 스펙트럼 접속(Concurrent Spectrum Access, 이하 CSA) 방식의 두 가지 모델이 있다.

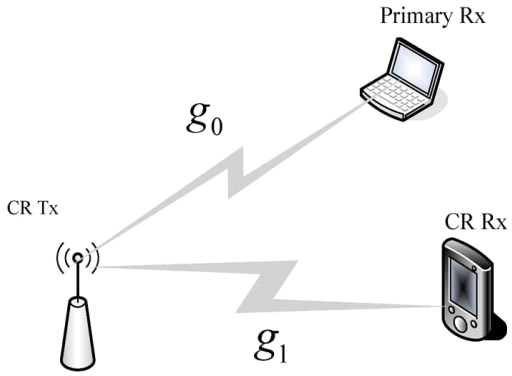
[그림 3]은 OSA 모델의 개념을 보여준다. 이 모델은 그림에서 보듯이 부 사용자는 스펙트럼을 할당받은 주 사용자가 특정 시간에 사용하지 않고 있는 대역(Spectrum Hole)을 탐지하여 사용하지 않고 있다고 식별된 대역을 이용하는 방식이다. 이 방식을 사용하기 위해서는 부 사용자는 자주 그리고 주기적으로 주 사용자의 스펙트럼을 감시하여 언제 어떤 대역을 사용할지 그리고 비어 있다고 탐지되어 부 사용자에 의해 사용되던 주파수 대역에 주 사용자가 활성화되면 즉시 그 대역을 비워주어야 한다.

[그림 4]는 CSA 모델의 운용개념을 보여준다. 앞서 언급한 것처럼 이 모델의 개념은 주 사용자와 부 사용자가 서로에게 미치는 간섭을 감내할 수 있는 특정 임계값 이하로 설정하거나 또는, 서로에게 미치는 간섭을 어느 한쪽이 경감 혹은 양쪽 모두가 협력적으로 경감시키는 방안을 적용하여 시간과 공간의 제약 없이 동시에 같은 주파수 대역을 사용할 수 있도록 하는 접속 방법이다[10].

서로 다른 시스템이 동일한 주파수 스펙트럼을 공유하기 위해서는 주변 무선 환경에 대한 정확한 인지를 통해 상대



[그림 3] Opportunistic Spectrum Access(OSA) model[10].



[그림 4] Concurrent Spectrum Access(CSA) model[10].

방 시스템의 성능에 미치는 영향을 최소화해야 한다. 따라서 효과적인 주파수 공유 알고리즘을 개발하기 위해서는 각 시스템이 서로에게 미치는 영향을 분석하는 것이 선행되어야 한다.

Ⅲ. 주파수 공유 영향성 분석

무선통신 시스템과 레이다간의 주파수를 공유하기 위해서는 주파수를 공유했을 때 각각의 시스템이 서로에게 미치는 영향성을 먼저 분석하여 그에 적합한 접근 및 대응 알고리즘을 개발하여야 한다. 이를 위해 레이다 및 무선통신 시스템 관련 분야에서는 각 시스템이 야기한 간섭이 서로의 시스템에 미치는 영향성에 대해 활발한 연구를 진행하였다.

3-1 레이다에 미치는 통신시스템의 영향성

정부기관 및 군에서 운용 중인 대부분의 레이다 시스템은 항공 안전, 보안 및 국토방위 등의 중대한 임무에 운용 중이기 때문에 상용 무선통신 시스템과의 주파수 공유 관련 영향성 및 기술에 관한 초기 연구는 주로 무선통신 시스템 분야에서 이루어졌으며, 부 사용자인 통신시스템에서 야기된 해로운 간섭으로부터 주 사용자인 레이다 시스템을 보호하기 위한 거의 모든 부담을 통신시스템에서 갖고 있었다. 또한, 독점적으로 주파수를 할당받아 사용해온 레이다 시스템이 주파수 공유를 염두해 두고 설계되지 않았기 때문에, 초기의 레이다에 미치는 통신시스템의 영향성 분석은 주로 시스템 레벨에서 두 시스템이 격리된 거리와 주파수 간격에 따라 시스템 성능에 미치는 영향성을 다루었다[12]. 이와 더

불어 레이다에 미치는 통신시스템의 영향성을 분석하기 위해 두 시스템을 적절하게 모델링하여 레이다가 적절하게 통신시스템이 야기한 간섭을 억제하거나 경감하지 못할 경우 레이다의 성능에 상당한 저하가 발생함을 보여 주었다[13],[14]. 또한, 현재 가장 급격한 발전과 스펙트럼의 과밀화를 보이고 있는 상용 이동통신 시스템과 군용 레이다 사이에 주파수 공유를 위한 영향성 분석도 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 수학적인 모델링을 통해 이동통신 시스템에서 야기된 간섭이 레이다 성능, 즉 표적 탐지에 미치는 영향을 시뮬레이션 결과뿐만 아니라, 해석적 방법을 통해 보여 주었다[15]. 이 밖에도 통신시스템의 신호가 레이다 시스템의 성능에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 많은 연구가 이루어졌다[16]~[18].

3-2 통신시스템에 미치는 레이다의 영향성

레이다가 점유하고 있는 주파수 대역을 무선통신 시스템이 공유하기 위해서 통신시스템에 미치는 레이다의 영향성 또한 많은 연구가 진행되었으며, 특히, 레이다로부터 야기된 간섭이 존재할 때 통신시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 통신시스템의 대표적인 성능지표인 비트 오류율(Bit Error Rate, 이하 BER)에 대한 수학적 분석을 수행하였다. 그 결과, 통신시스템에서 레이다의 간섭을 억제하거나 경감시킬 수 있는 알고리즘이나 기법이 적용되지 않는 한 두 시스템 사이에 상당한 물리적 거리와 주파수 격리가 필요함을 보여 주었다[19]. 또한, 최근에는 레이다와 무선통신 시스템의 공존을 효과적으로 설계하기 위해 현재 존재하는 시스템을 변경하지 않고 서로에게 미치는 영향성을 분석적인 모델을 통해 레이다의 신호가 통신시스템의 BER에 미치는 영향을 보여 주었다[20]. 비슷한 연구로 회전하는 레이다가 WiMAX 수신기에 미치는 영향성을 BER 시뮬레이션을 통해 보여 주었으며[21], 어떻게 레이다가 다른 시스템의 수신기를 포화시킬 수 있는지를 정성적으로 보여 주었다[22]. 또 다른 연구로 시스템 레벨에서 함정 및 지상에 설치된 S-band 레이다로부터의 간섭의 영향이 LTE 시스템의 성능에 어떠한 영향을 미치는지 야외 시험을 통해 정량적으로 분석하여 보여 주었으며, 이를 통해 기존에 상용 통신시스템의 성능을 보호하기 위해 설정된 배타 구역(Exclusion Zones)이 너무 보수적으로 설정되어 있음을 확인하였다[23],[24].

레이다와 통신시스템간의 상호 영향성 연구결과를 보면, 레이다 시스템은 원거리에서 들어오는 신호를 탐지해야 하는 시스템의 특성으로 말미암아 수신기의 민감도가 매우 커서 통신시스템에서 야기된 간섭에 매우 취약한 특성을 보였고, 이로 말미암아 레이다는 레이다의 탐지성능에 영향을 주는 간섭을 억제하거나 경감시키는 매우 정교한 알고리즘 및 기술이 필요하였다. 이에 반해 통신시스템은 레이다 시스템이 독점적으로 할당받아 사용하고 있는 주파수 대역을 공유하고자 그 동안 많은 연구와 기술개발이 이루어져 상대적으로 간섭을 관리하는 기법이나 간섭 변형 기법, 간섭 억제 및 경감 기술 등을 활용하고 있었으며, 보다 새롭고 진보된 기술이 연구 및 개발되고 있었다.

Ⅳ. 주파수 공유 기술 및 연구동향

레이다와 무선통신 시스템간의 주파수 공유 기술은 접근하는 방식에 따라 크게 3가지 범주로 분류할 수 있다[25]. 첫 번째 범주는 레이다 시스템은 할당받은 주파수 대역의 주 사용자로써 같은 주파수 대역을 공유하고자 원하는 통신시스템이 레이다에 미치는 해로운 간섭에 대한 모든 책임을 갖고 레이다에 미치는 간섭을 억제하거나 경감해야 한다. 즉, 레이다 시스템의 성능은 통신시스템의 간섭에 의해 저하되지 않아야 하고, 부 사용자로서 레이다 스펙트럼을 사용하는 통신시스템은 자체 성능을 스스로 최적화해야 한다. 이 첫 번째 범주가 통신시스템이 주변 무선 환경을 스스로 인지하고, 레이다에 미치는 해로운 간섭을 적응적으로 억제하거나 경감시켜야 한다는 측면에서 인지 통신 기술(Cognitive Communication Techniques)로 불리운다. 두 번째 범주는 통신시스템에 미치는 간섭을 레이다가 억제하거나 경감시켜 통신시스템의 성능에 영향을 미치지 않게 하거나 통신시스템에 의해 야기된 간섭을 레이다가 스스로 인지하여 레이다의 성능에 미치는 영향을 최소화하여야 한다. 이 두 번째 범주는 레이다와 통신시스템에 영향을 주는 간섭에 대한 책임이 레이다에 있고, 레이다가 주변 무선 환경에 대해 인지하여 서로에게 미치는 간섭의 영향을 억제하거나 경감시켜야 하므로 인지 레이다 기술(Cognitive Radar Techniques)이라고 칭한다. 마지막으로 세 번째 범주는 레이다와 통신

시스템 양측에 가장 많은 이득을 가져다 줄 수 있는 가장 정교하고 자유도가 많은 접근 방식이다. 이 범주에서는 레이다와 통신시스템이 서로에게 미치는 해로운 간섭을 상호 협동하여 협력적으로 억제하거나 경감시키며, 필요에 따라 간섭 저감 기술을 두 시스템의 설계단계에서부터 협력하여 적용시킬 필요가 있다. 이 세 번째 범주는 두 시스템이 상호 협력하여 서로에게 미치는 해로운 간섭을 인지 및 경감시키는 측면에서 합동 인지 기술(Joint Cognition Techniques)이라고 하며, 많은 장점과 추가적인 자유도로 인해 최근 더욱 많은 관심을 받고 있다.

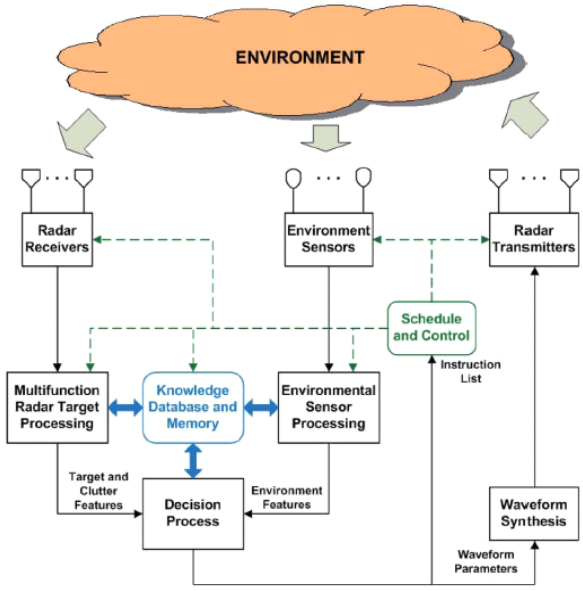
4-1 인지 통신 기술(Cognitive Communications)

인지 통신 기술은 통신시스템이 레이다 시스템과 주파수 스펙트럼을 공유하기 위해 인지무선(Cognitive Radio) 기술(주변 무선 스펙트럼(Radio Frequency) 환경을 센싱하여 주어진 무선 환경을 예측 및 학습하는 기술)을 활용하여 통신시스템의 송신 전력, 변수 및 파형 등을 적응적으로 변형시켜 레이다 시스템에 미치는 간섭을 최소화하는 기법이다. 이러한 인지무선 기술을 이용하여 서로 다른 시스템 간에 주파수를 공유하기 위해서는 효과적이고 효율적으로 주변에서 사용 중인 무선 환경을 센싱할 수 있어야 한다. 이렇게 부 사용자로써 통신시스템이 레이다가 사용하고 있는 주파수 스펙트럼에 접속하기 위해 여러 센서나 여러 사용자 단말기를 협력적으로 사용하여 주변 무선 환경을 센싱하는 능력을 개선하고 최적화하는 등의 많은 연구가 통신시스템 관련 분야에서 이루어졌다[26]~[30]. 이와 더불어 레이다에 할당되어 있는 주파수 대역을 공유하기 위해 통신시스템이 주변 무선 환경을 인지하는데 인지능력 향상을 위해 무선 환경 지도(Radio Environment Map)를 활용하는 방법도 있다[31],[32].

이러한 인지 통신 기술을 활용하여 현존하는 무선 통신 시스템과 레이다의 주파수 공유 기술에 관한 많은 연구가 수행되었다. 특히, 지상에 설치된 S-band 레이다와 인접한 주파수 대역을 사용하는 WiMAX 네트워크 사이에 발생 가능한 간섭 메카니즘에 대해 설명하고, 간섭을 경감시키는데 사용가능한 4가지 주된 간섭 저감 기술 즉, 공간 필터링 기법, 스펙트럼 필터링 기법, 시간 필터링 기법, 시스템 레벨 접근 기법에 대한 연구가 소개되었고[33], 회전하는 레이다와 OFDM 통신시스템 사이에 기회주의적으로 주파수를 공유하는 알고리즘도 연구되었다[34]. 이 경우에 통신시스템은 레이다 근처에서 레이다에 해로운 간섭을 일으키지 않는 범위 내에서 회전하는 레이다 시스템의 동작에 기초하여 시간에 따라 최대 허용 가능한 송신 전력을 바꿔가면서 주파수 대역을 공유한 결과를 보여주었다. 또한, 수학적인 시뮬레이션을 통해 LTE 이동통신 시스템과 항공 교통관제 레이다(Air Traffic Control Radar) 사이에 주파수 공유에 관한 구현 가능성 연구도 수행되었다[35].

4-2 인지 레이다 기술(Cognitive Radar)

레이다 기술 또한 클러터나 재밍과 같은 주변 환경을 인지하고 적응적으로 대응할 수 있는 알고리즘의 개발, 전자적으로 빔을 매우 빠르게 조향할 수 있는 능동위상배열 안테나의 개발과 아날로그 수신 신호를 디지털적으로 빠르게 변환 및 처리할 수 있는 연산능력의 지속적인 증대로 앞서 설명한 인지무선 기술을 레이다에도 적용하려는 많은 연구들이 수행되었다. 인지무선 기술을 레이다에 적용하여 인지 레이다의 개념을 소개하고[36], 적용 방안 및 발전 방향에 대한 연구가 진행되었고, 인지 레이다 기술을 적용하여 레이다의 전반적인 성능이 향상된 결과를 보여주었다[37]. [그림 5]는 일반적인 인지 레이다의 구성을 보여준다. 그림에서 보



[그림 5] Generalized cognitive radar framework[37].

는 것처럼 인지 레이다는 주변 환경을 적응적으로 인지하기 위한 센서가 있으며(Environment Sensors), 이러한 센서 신호를 사용하여 주변 환경을 처리 및 분석하고(Environmental Sensor Processing), 레이다 수신기(Radar Receivers)에서 획득한 표적 및 환경에 대한 정보(클러터 및 재밍 환경 등)를 다기능 레이다 표적 처리(Multifunction Radar Target Processing)기에서 통합하여 지식기반 데이터베이스 및 메모리(Knowledge Database and Memory)에 저장된 과거와 현재의 표적정보와 클러터 특성 및 재밍 환경 등을 종합적으로 활용하여 결정과정(Decision Process)을 통해 적응적으로 다음 송신 파형 합성을 위한 파형 변수 등을 생성시켜 환경 변화에 적응적으로 송신 신호를 변화시키는 시스템이다. 이렇게 인지 레이다 관점에서 부 사용자로써 레이다가 주 사용자인 통신시스템의 스펙트럼을 공유하기 위해서 스펙트럼 환경을 센싱하는 여러 연구가 수행되었다[38]~[40].

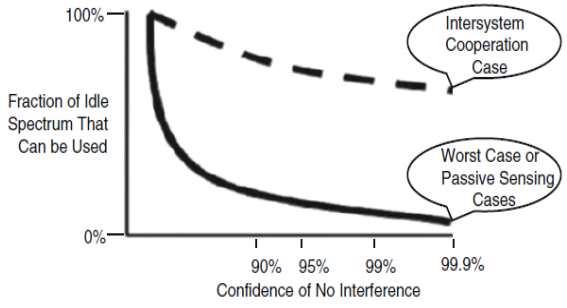
최근 레이다 시스템의 연구 동향 및 발전 방향을 보면 크게 MIMO 레이다와 인지 레이다로 볼 수 있다. 이 두 가지 기술을 사용하여 레이다 시스템은 수신 파형을 변형하거나 앞선 수신 신호를 바탕으로 다음번 송신 파형을 변경할 수 있다. 이를 통해 레이다는 간섭과 재밍에 대한 대응력을 크게 향상시킬 수 있다.

인지 레이다 시스템이 MIMO 구조를 사용하여 수신 신호의 파형을 변형할 수 있는 능력을 파형 변형(Waveform Shaping) 기술이라고 한다. 종래의 레이다 시스템은 적응 배열 처리 기술(Adaptive Array Processing Techniques)을 사용하여 안테나의 부엽(Sidelobes)으로 들어오는 재밍이나 간섭 신호만을 제거할 수 있었다. 하지만, 최신 MIMO 레이다 기술을 활용하여 주엽(Mainlobe)이나 부엽에 상관없이, 즉 방향에 상관없이 들어오는 간섭 신호의 영향을 최소화하는 알고리즘이 제안되었으며, 수학적인 증명과 시뮬레이션을 통해 무선 통신시스템으로부터 야기된 간섭을 제거하는 성능을 보여주었다[41],[42]. 또한, MIMO 레이다와 통신시스템 사이에 주파수 공유를 위하여 두 시스템 사이 간섭 채널의 널(Null) 공간에 레이다의 파형을 투영(Projection)하는 알고리즘을 제안하고, 수학적인 성능 지표 즉, 최대 우도(Maximum Likelihood) 추정법과 Cramer-Rao 하한법을 통해 분석적이고, 정량적으로 통신시스템의 성능저하 없이 레이다의 성능에 미치는 해로운 영향을 경감시킬 수 있음을 보여주었다[43]~[45].

수신 신호의 파형을 변형시키는 기술과 더불어 인지 레이다는 앞선 수신 신호에 기초하여 다음 송신 파형을 바꿀 수 있다. 즉, 송신 파형의 설계(Waveform Design)를 다시 할 수 있다. 이러한 연구로 SNR에 기초한 'waterfilling' 기법을 사용하여 통신시스템이 레이다로부터 받은 간섭의 영향을 심벌 에러율(Symbol Error Rate)의 성능분석을 통해 레이다와 통신시스템이 스펙트럼을 공유할 수 있음을 보였다[46]. 이와 더불어 MIMO 레이다 시스템에서 레이다가 통신시스템에 미치는 간섭을 경감시키기 위한 MIMO 레이다 파형 설계 기술에 대한 여러 연구가 진행되었다[47],[48].

4-3 합동 인지 기술(Joint Cognitive)

앞서 설명한 것처럼 많은 장점과 추가적인 자유도로 인해 주파수 공유 성능을 향상시킬 수 있는 합동 인지 기술이 최근 더욱 많은 관심을 받고 있다. 특히, 앞선 두 가지 공유 방식에서는 주 사용자는 부 사용자와의 주파수 공유를 염두해 두고 설계되지 않았기 때문에 부 사용자가 주파수를 공유하기 위해서는 상대방의 간섭에 대해 성능을 보장하기 위해서 모든 가능한 최악의 경우를 고려해야 하기 때문에 매우 보수적인 공유 기준을 가져야 한다. 그러나, 만약에 주 사용자가 시스템 설계 단계에서부터 새로운 부 사용자와의 주파수 공유를 염두해 두고 설계된다면 특정 시점에 쓰이고 있지 않는 스펙트럼의 많은 부분을 상당히 높은 비율로 이용할 수 있을 것이다[49]. [그림 6]은 최악의 경우 혹은 한쪽의 일방적인 스펙트럼 센싱의 경우와 상호 협력하는 경우에 쓰이고 있지 않은 스펙트럼의 사용되어질 수 있는 비율을



[그림 6] Fraction of idle spectrum[49].

보여준다. 이 결과를 토대로 효과적이고, 효율적인 주파수 공유를 위해서는 설계 단계에서부터 혁신적인 공유 기술이 필요함을 알 수 있다.

합동 인지 기술을 활용한 주파수 공유 관련 연구도 다양한 측면에서 시도되었다. 먼저, 시스템 운용 측면에서 다양한 모드로 운용되는 다기능 레이다가 모드에 따라 사용하는 주파수 대역폭이 다르다는데 착안하여 모드에 따라 사용하지 않고 남아있는 대역을 통신시스템이 이용하는 주파수 공유 기술을 소개하였다[50]. 이때, 레이다와 통신시스템 사이에 이용 가능한 대역폭을 최대로 사용하기 위해 다목적 최적화(Multi-objective Optimization) 방법이 사용되었으며, 통신시스템과 주파수를 공유하는 상황에서도 레이다가 자원을 효율적으로 사용하기 위해 고성능 스케줄링 기법이 이용되었다. 파형 설계 측면에서는 레이다의 성능 지표인 탐지 성능과 통신시스템의 성능 지표인 채널 용량을 동시에 고려한 OFDM 파형설계 최적화 연구가 있었으며[51], 근래 많은 연구가 되고 있는 MIMO 레이다와 MIMO 통신시스템 사이에 상호 간섭을 경감시키기 위해 인지무선 기술을 활용하여 상호 협력에 기초한 협동 설계(Joint Design)접근 방식에 관한 여러 연구가 진행되었다[52]~[54]. 또한, 가장 최근에는 MIMO 레이다와 MIMO 통신시스템 사이에 간섭 정렬(Interference Alignment) 기법을 사용하여 레이다 시스템의 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)을 극대화하는 동시에 통신시스템의 Sum-rate 혹은 BER 성능을 극대화하는 최적화 알고리즘을 두 시스템간의 주파수 공유에 활용하는 연구가 진행되었다[55],[56]. 아직은 연구의 초기 단계에 있지만 이론적 분석과 시뮬레이션 결과를 통해 레이다와 통신시스템 사이의 주파수 공유에 간섭 정렬 기법을 효과적으로 적용할 수 있음을 보여 주었다.

Ⅴ. 결론 및 향후 발전방향

무선 통신시스템과 레이다간의 주파수 공유는 현재 과밀화되고 부족한 무선 주파수 스펙트럼 문제를 해결할 수 있는 중요한 해결책 중 하나로써 레이다 및 통신시스템 관련 분야에서 동시에 많은 관심을 받고 있는 연구 주제이다. 특히, 서로의 해로운 간섭으로부터 두 시스템을 보호하기 위한 물리적인 거리, 즉 상호 배타구역의 설정 없이 지리적으로 같은 영역에서 동시에 두 시스템 간 주파수 스펙트럼을 공유하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 서로 다른 시스템이 같은 공간에서 동시에 같은 주파수 대역을 사용하기 위해서 먼저, 두 시스템 사이에 주파수를 공유했을 때 서로에게 어떠한 영향을 미치는지에 대한 영향성 분석을 통해 그에 적합한 접근 및 대응 알고리즘에 대해 고찰해 보았다. 이를 통해 어떠한 접근 방식으로 주파수 공유 기술 관련 연구가 진행되고 있는지 살펴보았다. 그 결과, 레이다의 성능에 영향을 미치는 해로운 간섭을 통신시스템에서 경감시키는 범주(Cognitive Communications), 통신시스템에 미치는 간섭을 레이다가 억제하거나 경감시켜 통신시스템의 성능에 영향을 미치지 않게 하거나 통신시스템에 의해 야기된 간섭을 레이다가 스스로 인지하여 레이다의 성능에 미치는 영향을 최소화하는 범주(Cognitive Radar), 마지막으로 레이다와 통신시스템이 서로에게 미치는 해로운 간섭을 상호 협동하여 협력적으로 억제하거나 경감시키는 범주(Joint Cognitive)로 크게 나누어 볼 수 있었다. 이중에서도 많은 장점과 추가적인 자유도로 인해 세 번째 범주인 합동 인지 기술이 최근 많은 관심을 받고 있다.

본 논문을 통해 희소하고 부족한 자원인 주파수 스펙트럼을 효율적이고 공정하게 사용하고, 상용 무선 통신시스템의 부족한 대역폭에 대한 해결책으로 무선 통신시스템과 레이다간의 주파수 공유는 거스를 수 없는 흐름임과 동시에 가장 유망한 방법으로 생각된다. 또한, 통신시스템의 성능을 극대화하는 동시에 레이다의 성능 저하 없이 주파수를 공유하기 위해서는 아직도 많은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] Federal Communications Commission (FCC), "Connecting America: The national broadband plan", https://www.fcc.gov/general/national-broadband-plan, Mar. 2010.

[2] The Presidents Council of Advisors on Science and Technology (PCAST), "Realizing the full potential of government-held spectrum to spur economic growth", https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a565091.pdf, Jul. 2012.

[3] Federal Communications Commission (FCC), "FCC proposes innovative small cell use in 3.5 GHz band", https://

www.fcc.gov/document/fcc-proposes-innovative-small-cell-use-35-ghz-band, Dec. 2012.

[4] National Telecommunications and Information Administration (NTIA) "An assessment of the near-term viability of accommodating wireless broadband systems in the 1675~1710 MHz, 1755~1780 MHz, 3,500~3,650 MHz, 4,200-4,220 MHz, and 4,380-4,400 MHz bands", https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/fasttrackvaluation_11152010.pdf, Oct. 2014.

[5] A. Khawar, "Spectrum Sharing between Radar and Communication Systems", Dissertation of PhD in Virginia Polytechnic Institute and State University, Jun. 2015.

[6] A. Ghasemi, E. Sousa, "Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments", *IEEE Trans. Wireless Commun.,* vol. 6, no. 2, pp. 649-658, Feb 2007.

[7] F. Khozeimeh, S. Haykin, "Dynamic spectrum management for cognitive radio: an overview", *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 1447-1459 Jan. 2009.

[8] E. Axell, G. Leus, E. Larsson, and H. Poor, "Spectrum sensing for cognitive radio : State-of-the-art and recent advances", *IEEE Signal Processing Mag.,* vol. 29, no. 3, pp.101-116, May 2012.

[9] M. Labib, V. Mareojevic, A. F. Martone, J. H. Reed, and A. I. Zaghloui, "Coexistence between communications and radar systems: A survey", *URSI Radio Science Bulletin*, vol. 2017, no. 362, pp. 74-82, Sep. 2017.

[10] Y.-C. Liang, K.-C. Chen, G. Y. Li, and P. Mahonen, "Cognitive radio networking and communications: An overview", *IEEE Trans. Veh. Technol.,* vol. 60, no. 7, pp. 3386-3407, Sep. 2011.

[11] Rebecca Blank, Lawrence E. Strickling, "Evaluation of the 5,350~5,470 MHz and 5,850~5,925 MHz Bands Pursuant to Section 6406(b) of The Middle Class Tax Relief and Job Creation Act of 2012", *Department of Commerce, Technical Report*, Jan. 2013.

[12] W. Liu, J. Fang, H. Tan, B. Huang and W. Wang, "Coexistence studies for LD-LTE with radar system in the band 2,300~2,400 MHz", *International Conference on Communications, Circuits and Systems(ICCCAS)*, pp. 49-53 Jul. 2010.

[13] B. D. Cordill, S. A. Seguin and L. Cohen, "Electromagnetic interference to radar receivers due to in-band OFEM communications systems", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC),* pp. 72-75, Aug. 2013.

[14] M. R. Bell, N. Devroye, D. Erricolo, T. Koduri, S. Rao, and D. Tuninett, "Results on spectrum sharing between a Radar and a communications system", *International Conference on Electromagnetics in Anvanced Applications (ICEAA)*, pp. 826-829, Aug. 2014.

[15] A. Khawar, A. Abdelhadi, and T. C. Clancy, "A mathematical analysis of cellular interference on the performance of s-band military radar systems", *IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, pp. 1-8 Apr. 2014.

[16] G. Antonini, G. Fedele, P. Repaci, and F. A. Studer, "Performance comparison of radar receivers subject to amplitude and frequency modulated audio interference", *IEEE International Radar Conference,* pp. 233-238, May. 1995.

[17] F. H. Sanders, R. L. Sole, B. L. Bedford, D. Franc, and T. Pawlowitz, "Effects of RF interference on radar receivers", *NTIA Technical Report, TR-06-444*, Sep. 2006.

[18] F. H. Sanders, R. L. Sole, J. E. Carroll, G. S. Secrest, and T. L. Allmon, "Analysis and resolution of RF interference to radars operating in the band 2,700~2,900 MHz from broadband communication transmitters", *U.S. Dept. of Commerce, National Telecommunications and Information Administration(NTLA), Tech. Rep. TR-13-490,* Oct. 2012.

[19] H. B. Wang, W. Wang, Y. Zhang, and W. Xia, "Analysis for the BER of LTE system with the interference from radar", *IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011),* pp. 452-456, Oct. 2011.

[20] N. Nartasilpa, D. Tuninetti, N. Devroye, and D. Erricolo, "Let's share CommRad: Effect of radar interference on an uncoded data communication system", *IEEE Radar Conference (RadarCon),* pp. 1-5, May 2016.

[21] L. Wang, J. McGeehan, C. Williams, and A. Doufexi,

"Radar spectrum opportunities for cognitive communications transmission", *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWN-COM),* pp. 1-6, May 2008.

[22] Radiocommunication Sector of ITU (ITU-R), "Procedures for determining the potential for interference between radars operating in the radio determination service and systems in other services", *ITU-R Recommendation, Technical Report ,* 1461-1, Jan. 2003.

[23] M. Ghorbanzadeh, E. Visotsky, P. Moorut, W. Yang, and C. Clancy, "Radar inband and out-of-band interferecne into LTE macar and small cell uplinks in the 3.5 GHz band", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC),* pp. 1829-1834, Mar. 2015.

[24] J. H. Reed, A. W. Clegg, A. V. Padaki, T. Yang, R. Nealy, C. Dietrich, C. R. Anderson, and D. M. Mearns, "On the co-existence of TD-LTE and radar over 3.5 GHz band: An experimental study", *IEEE Wireless Commun. Lett.,* vol. 5, no. 4, pp. 368-371, Aug. 2016.

[25] H. T. Hayvaci, B. Tavli, "Spectrum sharing in radar and wireless communication systems: A review", *International Conference on Electromagnetic in Advanced Applications (ICEAA)*, pp. 810-813, Aug. 2014.

[26] A. Ghasemi, E. S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments", *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN,* pp. 131-136, Nov. 2005.

[27] S. M. Mishra, A. Sahai, and R. W. Broderson, "Cooperative sensing among cognitive", *IEEE International Conference on Communications(ICC),* pp. 1658-1663, Jun. 2006.

[28] E. Peh, Y. C. Liang, "Optimization for cooperative sensing in cognitive radio network", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC),* pp. 27-32, Mar. 2007.

[29] L. S. Wang, J. P. McGeehan, C. Williams, and A. Doufexi, "Application of cooperative sensing in radar-communications coexistence", *IET Communications*, vol. 2, no. 6, pp. 856-868, Jan. 2008.

[30] L. Wang, A. Doufexi, C. Williams, and 1. McGeehan, "Cognitive node selection and assignment algorithms for weight cooperative sensing in radar systems", *IEEE Wireless communications and Networking Conference,* pp. 1-6, Apr. 2009.

[31] Z. Wei, Q. Zhang, Z. Feng, W. Li, and T. A. Gulliver, "On the construction of radio environment maps for cognitive radio networks", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC),* pp. 1-6, Feb. 2013.

[32] F. Paisana, Z. Khan, J. Lehtomaki, L. A. DaSilva, and R. Vuohtoniemi, "Exploring radio environment map architectures for spectrum sharing in the radar bands", *23rd International Conference on Telecommunications (ICT),* pp. 1-6, May. 2016.

[33] A. Lackpour, M. Luddy, and J. Winters, "Overview of interference mitigation techniques between WiMAX networks and ground based radar", *Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*, pp. 1-5, Apr. 2011.

[34] R. Saruthirathanaworakun, J. M. Peha, and L. M. Correia, "Opportunistic sharing between rotating radar and cellular", *IEEE J. Sel. Areas Commun.,* vol. 30, no. 10, pp. 1900-1910, Nov. 2012.

[35] H. Wang, J. Johnson, C. Baker, L. Ye, and C. Zhang, "On spectrum sharing between communications and air traffic control radar systems", *IEEE Radar Conference (RadarCon),* pp. 1545-1550, May 2015.

[36] S. Haykin, "Cognitive radar: A way of the future", *IEEE Signal Processing Mag.,* pp. 30-40, Jan. 2006.

[37] A. F. Martone, "Cognitive radar demystified", *URSI Radio Science Bulletin,* pp. 10-22, Sep. 2014.

[38] P. Stinco, M. Greco, F. Gini, and M. La Manna, "Compressed Spectrum-sensing in cognitive radars", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASP),* pp. 81-85, May 2014.

[39] M. T. Mushtaq, F. A. Butt, and A. Malik, "An overview of spectrum sensing in cognitive radar systems", *IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium*

(MRRS), pp. 115-118, Sep. 2014.

[40] P. Stinco, M. Greco, and F. Gini, "Spectrum sensing and sharing for cognitive radars", *IET Radar, Sonar and Navigation,* pp. 595-602, Mar. 2016.

[41] H. Deng, B. Himed, "Interference mitigation processing for spectrum-sharing between and wireless communications systems", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.,* pp. 1911-1919, Jul. 2013.

[42] Z. Geng, H. Deng, and B. Himed, "Adaptive radar beamforming for interference mitigation in radar-wireless spectrum sharing", *IEEE Signal Processing Lett.,* pp. 484-488, Apr. 2015.

[43] S. Sodagari, A. Khawar, T. C. Clancy, and R. McGwie, "A projection based approach for radar and telecommunication systems coexistence", *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 5232-5236 Dec. 2012.

[44] A. Khawar, A. Abdelhadi, and T. C. Clancy, "Spectrum sharing between S-band radar and LTE cellular system: A spatial approach", *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Network(ISDSAN),* pp. 7-14, Apr. 2014.

[45] A. Khawar, A. Abdelhadi, and T. C. Clancy, "On the impact of time-varying interference-channel on the spatial approach of spectrum sharing between S-band radar and communication system", *IEEE Military Communications Conference(MILCOM),* pp. 807-812, Oct. 2014.

[46] K. D. Shepherd, R. A. Romero, "Radar waveform design in active communications channel", *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers(ACSSC),* pp. 1515-1519, Nov. 2013.

[47] A. Khawar, A. Abdelhadi, and T. C. Clancy, "MIMO radar waveform design for coexistence with cellular systems", *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks: SSPARC Workshop,* pp. 20-26, Apr. 2014.

[48] S. Amuru R. M. Buehrer, R. Tandon, and S. Sodagari, "MIMO radar waveform design to support spectrum sharing", *IEEE Military Communications Conference(MILCOM),* pp. 1535-1540, Nov. 2013.

[49] M. J. Marcus, "New approaches to private sector sharing of federal government spectrum", *New America Foundation Issue Brief #26,* pp. 1-8, Jun. 2009.

[50] S. S. Bhat R. M. Narayanan, and M. Rangaswamy, "Bandwidth sharing and scheduling for multimodal radar and communications and tracking", *IEEE 7th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM),* pp. 233-236, Jun. 2012.

[51] S. Gogineni, M. Rangaswamy, "Multi-modal OFDM waveform design", *IEEE Radar Conference (RadarCon),* pp. 1-5, Apr. 2013.

[52] B. Li, A. P. Petropulu, "Spectrum sharing between matrix completion based MIMO radars and a MIMO communication system", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing,* pp. 2444-2448, Apr. 2015.

[53] B. Li, H. Kumar, and A. P. Petropulu, "A joint design approach for spectrum sharing between radar and communication systems", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing,* pp. 3306-3310, Mar. 2016.

[54] B. Li, A. P. Petropulu, and W. Trappe, "Optimum co-design for spectrum sharing between matrix completion based MIMO radars and a MIMO communication system", *IEEE Transactions on Signal Processing,* pp. 4562-4575, Sep. 2016.

[55] M. Rihan, L. Huang, “Optimum co-design of spectrum sharing between MIMO radar and MIMO communication systems: An interference alignment approach”, *IEEE Trans. Veh. Techno.,* vol. 67, no. 12, Dec. 2018.

[56] B. Hong, W. Q. Wang, C. -C. Liu, “Ergodic interference alignment for spectrum sharing radar-communication systems”, *IEEE Trans. Veh. Technol.,* vol. 68, no. 10, Oct. 2019.

≡ 필자소개 ≡

김 동 환

2005년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 서울대학교 전기 및 컴퓨터공학부 (공학석사)
2007년 2월～현재: 국방과학연구소 선임연구원
2016년 3월～현재: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 박사과정
[주 관심분야] AESA Radar System Design, Radar Signal Processing, Spectrum Sharing between Radar and Wireless Communications

정 방 철

2002년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
2004년 8월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학석사)
2008년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)
2008년 3월～2009년 8월: 한국과학기술원 IT 융합연구소 팀장
2009년 9월～2010년 2월: 한국과학기술원 IT 융합연구소 연구교수
2010년 3월～2014년 2월: 경상대학교 정보통신공학과 조교수
2014년 3월～2015년 8월: 경상대학교 정보통신공학과 부교수
2015년 9월～현재: 충남대학교 전자공학과 정교수
[주 관심분야] Wireless Communication, Stochastic Signal Processing, Information Theory, Compressed Sensing, Mobile Communication